



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKDÖRTGEN ve T KESİTLİ PREFABRİK KAFES
TAKVİYELİ KİRİŞLERİN EĞİLME YÜKLERİ
ALTINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

ABDÜLKADİR GÜLEÇ

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

KAHRAMANMARAŞ 2020

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKDÖRTGEN ve T KESİTLİ PREFABRİK KAFES
TAKVİYELİ KİRİŞLERİN EĞİLME YÜKLERİ
ALTINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

ABDÜLKADİR GÜLEÇ

DOKTORA TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

KAHRAMANMARAŞ 2020

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Abdülkadir Güleç



Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 2017 / 7-191 D.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

DİKDÖRTGEN ve T KESİTLİ PREFABRİK KAFES TAKVİYELİ KİRİŞLERİN EĞİLME YÜKLERİ ALTINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

(DOKTORA TEZİ)

ABDÜLKADİR GÜLEÇ

ÖZET

Betonarme sistemler inşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan taşıyıcı sistemlerin başında gelmektedir. Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının yükler altındaki performansları tüm taşıyıcı sisteme etki eder. Özellikle eğilme yükleri altındaki betonarme elemanların performansı donatı sisteminden doğrudan etkilenir. Bu sebeple betonarme elemanlarda kullanılacak alternatif donatı sistemleri üzerine yapılan çalışmalar giderek yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada, geleneksel donatı sistemine alternatif olarak önerilen Prefabrik Kafes Sistemin (PCS) eğilme yüklerine maruz kalan betonarme elemanlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda PCS donatılı dikdörtgen ve T kesitli kirişlerin eğilme performansları, aynı eşdeğer donatı alanına ve kesit özelliklerine sahip geleneksel donatılı kirişlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma iki etapta gerçekleştirilmiştir. İlk etapta PCS donatılı dikdörtgen kesitli kirişlerin eğilme performansı geleneksel donatılı kirişlerle karşılaştırılmıştır. İkinci etapta ise T kesitli PCS donatılı kirişlerin eğilme performansları geleneksel donatılı kirişlerle karşılaştırılmıştır. Eğilme performansları 4 noktalı eğilme deneyi uygulanarak tespit edilmiştir. Çalışmada farklı beton tipleri, kesit büyüklükleri ve donatı oranları gibi parametrelerin eğilme performanslarına etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada eğilme yükleri altında kirişlerin nihai kapasiteleri, moment-yer değiştirme ilişkileri, göçme modları, düktilite oranları ve enerji yutma kabiliyetleri gibi çeşitli parametreler karşılaştırılarak PCS donatısının betonarme elemanlarda kullanılabilirliği tartışılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda PCS donatısının, eğilme yükleri altında kirişlerin eğilme kapasitelerini, düktilite oranlarını ve enerji yutma yeteneklerini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Prefabrik Kafes Sistem, eğilme dayanımı, düktilite

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020

Danışman: Prof. Dr. M. Metin Köse

Sayfa sayısı: 104

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF RECTANGULAR AND T-SECTION PREFABRICATED CAGE REINFORCED BEAMS UNDER FLEXURAL LOADS

(Ph.D. THESIS)

ABDÜLKADİR GÜLEÇ

ABSTRACT

Reinforced concrete systems are among the most widely used structural systems in the construction industry. The performances of structural system elements under loads affect the entire system. The performance of reinforced concrete elements, especially under flexural loads, is directly affected by the reinforcement system. For this reason, studies on alternative reinforcement systems that can be used in reinforced concrete elements have increased gradually. In this study, the usability of the Prefabricated Cage System (PCS) proposed as an alternative to the conventional reinforcement system in structural elements exposed to flexural loads was investigated. In this context, the flexural performances of PCS reinforced rectangular and T-section beams were compared with conventional reinforced beams with the same equivalent reinforcement area and cross section properties. The study was carried out in two stages. In the first stage, the flexural performance of PCS reinforced rectangular beams was compared with conventional reinforced beams. In the second stage, the flexural performances of T-section PCS reinforced beams were compared with conventional reinforced beams. Flexural performances were determined by applying 4-point bending test. The effects of parameters such as different concrete types, cross-section sizes and reinforcement ratios on flexural performance were investigated. In this study, the usability of PCS reinforcement in reinforced concrete elements was discussed by comparing various parameters such as final capacities of beams, moment-displacement relations, failure modes, ductility rates and energy absorbability under flexural loads. As a result of the study, it was concluded that the PCS reinforcement increases the flexural capacity, ductility ratio and energy absorption capabilities of beams under flexural loads.

Keywords: Prefabricated Cage System, flexural capacity, ductility.

Kahramanmaraş Sutcu Imam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering, 2020

Supervisor: Prof. Dr. M. Metin Köse

Page number: 104

TEŞEKKÜR

Dikdörtgen ve T Kesitli Prefabrik Kafes Takviyeli Kirişlerin Eğilme Yükleri Altında Kullanılabilirliğinin İncelenmesini konu alan bu çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasında her konuda yardım, öneri ve desteğinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Metin KÖSE'ye,

Bu çalışmanın her aşamasında fikir ve önerilerinden istifade ettiğim, Sayın Prof. Dr. Abdülkadir Çevik'e ve Dr. Öğr. Ü. Alırıza İlker AKGÖNEN'e

Tez çalışmalarımın deney aşamasında teknik destek ve yardımından çokça faydalandığım Doç. Dr. M. Tolga Göğüş'e,

Numune hazırlanması aşamasında yardımlarından faydalandığım Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi personellerine ve öğrencilerine,

Çalışmama destek veren Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine

Teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca, doktora eğitimim süresince her zaman yanımda olan annem Nazire, babam Ali Fuat, oğlum Ali Fuat, kızım Zeynep ve özellikle akademik tecrübelerinden sıklıkla yararlandığım eşim Ayşegül Güleç'e teşekkür eder, bu çalışmanın vatana ve millete faydalı olmasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Önemi ve Amacı.....	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Betonla Doldurulmuş Çelik Boru Sistemleri (CFST).....	5
2.1.1. CFST sistemleri ile ilgili yapılan önceki çalışmalar	8
2.2. Lif Takviyeli Polimer (FRP) Donatılı Betonarme Sistemler	10
2.2.1. FRP donatı betonarme sistemler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar	12
2.3. Kaynaklı Hasır Donatılı (WWR) Betonarme Sistemler	16
2.3.1. WWR takviye betonarme sistemler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar	17
2.4. Beton Kaplamalı Çelik Kompozitler	19
2.4.1. Beton kaplamalı çelik kompozitler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar	21
2.5. Prefabrik Kafes Donatılı (PCS) Betonarme Sistemler.....	25
2.5.1..PCS donatılı betonarme sistemler ile diğer betonarme sistemlerin karşılaştırılması.....	27
2.5.2. PCS donatılı betonarme sistemler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar... ..	29
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1 Materyal.....	35
3.1.1. PCS ve geleneksel donatılı numuneleri oluşturan malzemeler ve özellikleri	35
3.1.1.1. Kendinden yerleşen beton.....	35
3.1.1.2. Hafif beton	39
3.1.1.3. Prefabrik ve geleneksel donatı	41
3.1.1.4. Deneyde kullanılacak kiriş numunelerinin hazırlanması.....	44
3.2. Yöntem.....	48
3.2.1. Deneysel çalışma.....	53
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	64
4.1. Dikdörtgen Kesitli Numuneleri Sonuçları	64
4.1.1. Dikdörtgen kesitli PCS ve geleneksel donatılı kesitlerin yük kapasiteleri, göçme modları ve test gözlemleri.....	64
4.1.2. Dikdörtgen kesitli PCS ve geleneksel donatılı kesitlerin moment-yer değiştirme ilişkileri	68

4.1.3. Dikdörtgen kesitli PCS ve geleneksel donatılı kirişlerin artan moment altında yer değiştirme eğrileri	71
4.1.4. Dikdörtgen kesitli PCS ve geleneksel donatılı kirişlerin duktilite oranları	72
4.2. T Kesitli Numunelerin Sonuçları	75
4.2.1 T kesitli PCS ve geleneksel donatılı kesitlerin yük kapasiteleri, göçme modları ve test gözlemleri.....	75
4.2.2 T kesitli PCS ve geleneksel donatılı kesitlerin moment-yer değiştirme ilişkileri	79
4.2.3. T kesitli PCS ve geleneksel donatılı kirişlerin duktilite oranları	83
4.2.4. T kesitli PCS ve geleneksel donatılı kirişlerin enerji yutma kapasiteleri oranları	84
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	86
KAYNAKLAR.....	90
EKLER.....	100
ÖZGEÇMİŞ.....	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1 CFST ile tasarlanan Wangcang East River Köprüsü (Han ve ark., 2014).....	7
Şekil 2.2 Tipik CFST kolon kesitleri (Han ve ark., 2014).....	7
Şekil 2.3 Avrupa'da fiber takviyeli donatılı ilk beton yaya köprüsü (Fico, 2007).....	10
Şekil 2.4 Değişik tiplerde FRP donatı örnekleri.....	11
Şekil 2.5 Takviye elemanlarının reçineye daldırılması işlemi (Durmaz, 2018).....	12
Şekil 2.6 Lifler yardımıyla donatı güçlendirilmesi çizimleri (Stites, 1943).....	13
Şekil 2.7 Kaynaklı hasır donatı.....	17
Şekil 2.8 Hasır kaynaklı donatılı I tipi betonarme kirişin test esnasındaki durumu (Akhnouk ve Xie, 2010).....	18
Şekil 2.9 Değişik tiplerde beton kaplamalı çelik kompozit kolonlar.....	20
Şekil 2.10 Çelik kompozit kolonun hazırlanışı (Lai ve ark., 2019)	23
Şekil 2.11 PCS takviyeli betonarme kolonlar (Shamsai, 2006)	26
Şekil 2.12 Test edilmiş PCS ve geleneksel donatılı kolonlar (Sezen ve ark., 2008).....	29
Şekil 2.13 Geleneksel donatılı ve PCS donatı kolon kiriş birleşim örnekleri (Fisher ve Sezen, 2011).....	31
Şekil 3.1 Beton karışımının hazırlanması	36
Şekil 3.2 Kükürt başlık yapılmış silindir numuneler a) Test öncesi b) Test sonrası.....	37
Şekil 3.3 a) Beton basınç dayanım testi, b) Test sonuçları.....	38
Şekil 3.4 Yayılma deneyleri.....	39
Şekil 3.5 a) Pomza taşı b) 100x200 mm ebatlarındaki hafif beton numunesi ağırlığı.....	41
Şekil 3.6 Lazer kesim metodu ile kupon numune alınan kutu profil.....	42
Şekil 3.7 Kupon numunelere uygulanan çekme deneyi.....	42
Şekil 3.8 Çekme testinde kullanılan kutu profil numuneleri a) Numunelerin çekme testinden önceki durumları b) Numunelerin çekme testinden sonraki durumları.....	43
Şekil 3.9 Çekme testinde kullanılan inşaat çelik numuneleri a) Numunelerin çekme testi önceki durumları b) Numunelerin çekme testi sonraki durum	44

Şekil 3.10 Kalıplar için sökülebilir çelik köşebent imalatı.....	45
Şekil 3.11 Dikdörtgen ve T kalıp örnekleri.....	46
Şekil 3.12 PCS donatının imalatı.....	47
Şekil 3.13 Geleneksel donatı imalatı.....	47
Şekil 3.14 Eşdeğer donatı alanına sahip geleneksel ve PCS donatı sistemleri.....	48
Şekil 3.15 Kalıp içerisinde prefabrik donatı.....	49
Şekil 3.16 Prefabrik donatının 3 boyutlu görüntüsü ve kesit görüntüsü.....	49
Şekil 3.17 T kiriş numunelerine ait kesit ölçüleri.....	50
Şekil 3.18 Kalıptaki taze dökülmüş beton.....	52
Şekil 3.19 Kalıptan çıkarılmış T kesitli numuneler.....	53
Şekil 3.20 4 noktalı eğilme deney düzeneği.....	55
Şekil 3.21 Yüklemeden dolayı oluşan kesit diyagramları.....	56
Şekil 3.22 Yer değiştirme bazlı düktilite oranı diyagramı (Park, 1988).....	57
Şekil 3.23 Enerji bazlı süneklik indeksini belirleyen grafik (Naaman ve Jeong, 1995).....	58
Şekil 3.24 SOLID eleman.....	59
Şekil 3.25 LINK eleman.....	60
Şekil 3.26 Sonlu elemanlara ayrılmış betonarme kiriş modeli.....	60
Şekil 3.27 Bilgisayar modelinde yükleme ve mesnet koşulları.....	61
Şekil 3.28 Bilgisayar programı için hazırlanan geleneksel donatı.....	61
Şekil 3.29 Bilgisayar programı için hazırlanan PCS donatı.....	62
Şekil 3.30 Beton malzemesi için tanımlanan Drucker-Prager akma kriteri.....	63
Şekil 3.31 Çelik malzemesi için tanımlanan bilineer izotropik pekleşme modeli.....	63
Şekil 4.1 Dikdörtgen kesitli numunelerin maksimum taşıma kapasiteleri.....	66
Şekil 4.2 Test edilmiş dikdörtgen kesitli kirişlerin çatlak desenleri.....	67
Şekil 4.3 Çekme donatısında akma, basınç donatısında burkulma davranışı.....	67
Şekil 4.4 NO1 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri.....	69

Şekil 4.5 NO2 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri.....	69
Şekil 4.6 NO3 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri.....	69
Şekil 4.7 NO4 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri.....	70
Şekil 4.8 NO5 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri.....	70
Şekil 4.9 NO6 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri.....	70
Şekil 4.10 PCS donatılı kirişin sonlu eleman analiz sonucu görüntüsü.....	71
Şekil 4.11 NO1-CONTROL numunesinin artan yükler altında yer değiştirme eğrileri.....	71
Şekil 4.12 NO1-SCCPCS numunesinin artan yükler altında yer değiştirme eğrileri.....	72
Şekil 4.13 NO1-LWPCS numunesinin artan yükler altında yer değiştirme eğrileri	72
Şekil 4.14 T kesitli numunelerin maksimum taşıma kapasiteleri.....	75
Şekil 4.15 Test edilmiş T kesitli kirişlerin çatlak desenleri.....	76
Şekil 4.16 Nihai kapasitesine ulaşmış T kesitli geleneksel donatılı kiriş.....	77
Şekil 4.17 Nihai kapasitesine ulaşmış T kesitli PCS donatılı kiriş.....	77
Şekil 4.18 PCS donatılı kirişin sonlu eleman analiz sonucu görüntüsü.....	79
Şekil 4.19 PCS donatısının sonlu eleman analiz sonucu eğilme yükleri altındaki durumu...	79
Şekil 4.20 NO1-4 numunelerinin Moment-Yer değiştirme grafikleri.....	80
Şekil 4.21 NO1-5 numunelerinin Moment-Yer değiştirme grafikleri.....	80
Şekil 4.22 NO2-4 numunelerinin Moment-Yer değiştirme grafikleri.....	81
Şekil 4.23 NO2-5 numunesinin Moment-Yer değiştirme grafikleri.....	81
Şekil 4.24 NO3-4 numunesinin Moment-Yer değiştirme grafikleri.....	81
Şekil 4.25 NO3-5 numunesinin Moment-Yer değiştirme grafikleri.....	82
Şekil 4.26 Geleneksel donatılı kirişlerin Moment-Yer değiştirme grafiği.....	82
Şekil 4.27 Prefabrik donatılı kirişlerin Moment-Yer değiştirme grafiği.....	83
Şekil 4.28 T kesitli numunelerin karşılaştırmalı enerji yutma oranları.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1 Kullanılan çimentonun kimyasal birleşimi.....	36
Çizelge 3.2 Dikdörtgen kesitli numunelerde kullanılan kendiliğinden yerleşen beton karışım oranları.....	37
Çizelge 3.3 T kesitli numunelerde kullanılan kendiliğinden yerleşen beton karışım oranları.....	37
Çizelge 3.4 Dikdörtgen kesitli numunelerde kullanılan betonun işlenebilirlik özellikleri....	38
Çizelge 3.5 T kesitli numunelerde kullanılan betonun işlenebilirlik özellikleri.....	38
Çizelge 3.6 Hafif betonda kullanılan silika fümenin kimyasal birleşimi.....	40
Çizelge 3.7 Hafif beton karışım oranları.....	40
Çizelge 3.8 Kullanılan kutu profil ve geleneksel donatının fiziksel özellikleri.....	43
Çizelge 3.9 Kullanılan çelik profilin kimyasal analizi.....	43
Çizelge 3.10 Deneysel çalışmada kullanılan dikdörtgen kesitli numunelerin özellikleri.....	50
Çizelge 3.11 Deneysel çalışmada kullanılan T kesitli numunelerin özellikleri.....	51
Çizelge 4.1 Dikdörtgen kesitli numunelerin eğilme deneyi sonuçları.....	65
Çizelge 4.2 Enerji bazlı duktilite oranları.....	74
Çizelge 4.3 T kesitli kirişlerin eğilme deneyi sonuçları.....	78
Çizelge 4.4 T kesitli numunelerin enerji yutma oranları.....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AFRP: Aramid lif takviyeli polimer

ASTM: Uluslararası amerikan test ve materyalleri topluluğu

BFRP: Bazalt lifi takviyeli polimer

CFRP: Karbon lif takviyeli polimer

CFST: Betonla doldurulmuş çelik boru sistemleri

CONTROL: Dikdörtgen kesitli geleneksel donatılı kiriş

EFNARC: Avrupa yapı ve beton sistemleri uzmanları topluluğu

FRP: Lif takviyeli polimer

GFRP: Cam lif takviyeli polimer

LWPCS: Dikdörtgen kesitli hafif betonlu prefabrik donatılı kiriş

LWPCS-E: Dikdörtgen kesitli hafif betonlu prefabrik donatılı kirişin deneysel analiz sonucu

LWPCS-N: Dikdörtgen kesitli hafif betonlu prefabrik donatılı kirişin sonlu eleman analiz sonucu

PCS: Prefabrik kafes sistem

SCCPCS: Dikdörtgen kesitli kendinden yerleşen betonlu prefabrik donatılı kiriş

SCCPCS-E: Dikdörtgen kesitli kendinden yerleşen betonlu prefabrik donatılı kirişin deneysel analiz sonucu

SCCPCS-N: Dikdörtgen kesitli kendinden yerleşen betonlu prefabrik donatılı kirişin sonlu eleman analiz sonucu

TCON: T kesitli geleneksel donatılı kiriş

TCON-E: T kesitli geleneksel donatılı kirişin deneysel analiz sonucu

TCON-N: T kesitli geleneksel donatılı kirişin sonlu eleman analiz sonucu

TPCS: T kesitli prefabrik donatılı kiriş

TPCS-E: T kesitli prefabrik donatılı kirişin deneysel analiz sonucu

TPCS-N: T kesitli prefabrik donatılı kirişin sonlu eleman analiz sonucu

WWR: Kaynaklı hasır donatı

1.GİRİŞ

Betonarme, çelik ve betondan oluşan çeliğin çekme, betonun ise basınç gerilmelerini karşıladığı, iki malzemenin tek bir yapısal eleman olarak çalışabildiği kompozit bir yapıdır. Beton basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük, dış etkilere karşı dayanıklı gevrek bir malzemedir. Bununla birlikte çelik ise yüksek basınç ve çekme dayanımına sahip, dış etkilere karşı çok dayanıklı olmayan sünek bir malzemedir. Bu noktada betonarme sistemlerde çelik ve beton, birbirlerinin eksikliklerini tamamlayan, yükler altında mükemmel bir uyum içinde çalışabilen iki farklı yapı malzemesi olarak düşünülebilir. Betonarme yapı sistemlerinin sahip olduğu yüksek rijitlik, dış etkilere karşı dayanıklılık, bakım ihtiyacının az olması, işçilik kolaylığı, ekonomik olması ve ömrünün uzunluğu gibi parametreler betonarmenin diğer yapı sistemlerine göre günümüzde daha çok kullanılmasının nedenleridir. Betonarme sistemin varlığından söz edilebilmesi için beton ve çelik malzemelerinin tam bir uyumla çalışmaları ve aralarındaki kenetlenmenin de tam olarak sağlanması gerekir. Bu şekilde yükler altında çelik ve etrafını saran betonunun deformasyonu farklı olmaz ve çeliğin betondan sıyrılması önlenmiş olur.

Betonarme taşıyıcı sistem elemanları genel olarak döşemeler (plaklar), kirişler, kolonlar-perdeler ve temellerden oluşur. Betonarme kirişler üzerine gelen düşey yüklerden dolayı eğilmeye çalışırlar. Eğilmeye ek olarak yüklemeye ve mesnetleme şartlarına bağlı olarak kesme kuvveti, burulma momenti ve normal kuvvet de oluşabilir. Eğilmeye çalışan kiriş elemanında çekme gerilmeleri meydana gelir. Betonun çekme gerilmelerine karşı dayanımı çok düşük olduğundan bu gerilmeleri karşılama görevini donatı yerine getirir. Bu nedenle eğilmeye çalışan betonarme kiriş elemanında donatı kritik öneme sahiptir. Donatının tipi, akma dayanımı, yerleşimi, gerilme-şekil değiştirme davranışı, elastisite modülü, kenetlenme durumu, oranı gibi tüm özellikleri betonarme kirişin yükler altındaki performansına ve eğilme davranışına etki edecek ana parametrelerdir.

Donatının yapı elemanının performansındaki önemli rolü, bununla ilgili birçok çalışmayı beraberinde getirmiştir. Günümüzde geleneksel donatı sistemine alternatif olarak birçok sistem mevcuttur. Betonla doldurulmuş çelik boru sistemleri (CFST), Çelik-Beton kompozit sistemleri, Kaynaklı Hasır Donatılı (WWR) betonarme sistemleri, Lif Takviyeli Polimer (FRP) donatılı betonarme sistemler, Prefabrik Kafes Sistem (PCS) donatılı betonarme sistemler gibi birçok sistemi örnek olarak gösterebilmek mümkündür.

Yapı elemanın performansının arttırılmasının bir diğer ayağı da betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesidir. Bu noktada yapı elemanın kapasitesinin arttırılması maksadıyla geliştirilen yüksek mukavemetli betonlar, yapının ağırlığının azaltılabilmesi için kullanılan hafif betonlar ve işlenebilirliğin arttırılabilmesi için kendinden yerleşen betonlar kullanılmaktadır.

PCS, Shamsai ve Sezen (2005) tarafından önerilen geleneksel donatı sistemine alternatif yeni bir donatı sistemidir. PCS betonarme elemanda hem boyuna donatının hem de enine donatının işlevini yerine getirebilecek monolitik bir sistem olarak önerilmiştir. PCS, çelik bir plakada herhangi bir kesim yöntemi kullanılarak dikdörtgen açıklıklar oluşturulması sonrası plakanın kenarı boyunca sürekli bir kaynakla istenilen kesitin oluşturulması prensibi ile imal edilir. Dikey şeritler boyuna donatı işlevi görürken yatay şeritler ise enine donatı (etriye) işlevi görür. Yapılacak hesaplara göre kafes sistem üzerindeki açıklık boyutları değiştirilmek suretiyle boyuna ve enine donatı miktarı istenildiği gibi değiştirilebilir. Bu sayede farklı dayanım ve yer değiştirme kapasitelerine imkân verebilecek tasarımlar yapılabilir. PCS fabrikasyon üretim tarzından dolayı geleneksel donatı sistemine göre çok daha yüksek hassasiyetle üretilmiş bir donatı modelidir. Geleneksel donatı sistemindeki işçilik hataları ve donatı fireleri bu sistemde minimum düzeydedir. Bu durum imalatta ciddi bir zaman ve maliyet tasarrufu anlamına gelir.

1.1 Çalışmanın Önemi ve Amacı

Yapı mühendisliği kapsamında son yıllarda yapılan araştırmalar incelendiğinde, yapı elemanlarının yükler altındaki performanslarının arttırılması, betonarme elemanlarda geleneksel donatı sistemi yerine alternatif çözümler üretilmesi ve bu bağlamda mühendislik ekonomisinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların son yıllarda hız kazandığı görülmektedir. Bu konuda yapılan literatür araştırması neticesinde geleneksel donatıya alternatif birçok sistem önerildiği görülmüştür. CFST sistemleri başta olmak üzere birçok alternatif sistem hakkında sayısız çalışma mevcuttur. Yapılan araştırmalar neticesinde bahse konu alternatif donatı sistemlerinin temel yapısal davranışları hakkında geniş bir bilgi birikimi sağlanmıştır.

Literatürde PCS donatılı betonarme yapı elemanlarının yükler altındaki davranışı ve performansı hakkında yapılan çalışmalar, diğer alternatif donatı sistemleri ile kıyasla oldukça sınırlı sayıdadır. Bunun sebebi olarak henüz yeni sayılabilecek bir zamanda PCS

sistemlerinin patentinin alınması ve imalatının günümüz teknolojisiyle nispeten diğer donatı sistemlerine göre daha zor olması gösterilebilir.

Ancak yapılan sınırlı sayıdaki deneysel ve analitik çalışmalar bile PCS donatılı elemanların, eşdeğer donatı alanlı geleneksel donatılı betonarme elemanlara kıyasla yükler altında daha iyi performanslar gösterdiklerini, süneklik kapasitelerinin yüksek olduğunu, zaman ve maliyet parametreleri açısından da geleneksel sistemlere göre daha ekonomik olduklarını ortaya koymuşlardır. (Shamsai ve ark.,2007; Sezen ve ark.,2008; Shamsai ve Sezen 2011).

PCS donatı sistemi ile ilgili yapılan çalışmalar genellikle kolonlar üzerine yoğunlaşmıştır. PCS donatılı kiriş ve döşeme türü eğilmeye çalışan yapı elemanları ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu tezin konusu PCS donatılı dikdörtgen ve T kesitli (tablalı) betonarme kirişlerin 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmak suretiyle, eğilme performanslarının ve kullanılabilirlik durumlarının incelenmesi üzerine olacaktır. Bu bağlamda deneysel çalışmada test parametreleri oldukça geniş tutulmuş olup; donatı oranı, kesit tipleri, kesit ölçüleri, beton dayanımları ve beton tipleri gibi parametrelerin PCS donatılı kirişlerin eğilme yükleri altında performanslarına etkileri ve kullanılabilirlik durumları, eşdeğer donatılı geleneksel betonarme kiriş numuneleriyle karşılaştırılacaktır. PCS donatılı ve geleneksel donatılı kirişlerin yük kapasiteleri, moment-yer değiştirme ilişkileri, göçme mekanizmaları, düktilite oranları gibi birçok parametresi birbirleriyle karşılaştırılıp tartışılacaktır. Yapılan pilot çalışmalar neticesinde, kafes sistemin doğası gereği, normal betonun kalıp içerisindeki yerleşiminde sıkıntılar görülmüş, normal beton yerine kendinden yerleşen beton kullanılması kararı alınmıştır. Bu sayede betonun çelik kafes içerisine ve kalıba tam olarak yerleşmesinin sağlanması hedeflenmiştir. Araştırmanın bir başka amacı ise hafif betonun PCS donatılı dikdörtgen kesitli kiriş elemanında kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. İmalat kolaylığının sağlanması ve bükme-kaynaklama sırasında oluşabilecek zafiyetlerin önüne geçilebilmesi amacıyla donatı olarak düz çelik sac yerine çelik tüp (kutu profil) kullanılmıştır.

Yapılacak çalışma neticesinde eğilme yükleri altında PCS donatısı kullanımının kiriş kapasitesini ve yer değiştirme kabiliyetini arttırması beklenmektedir. Ayrıca PCS donatılı dikdörtgen kesitli bir kirişte normal beton yerine hafif betonun kullanılabilirliği de araştırılacaktır. Bu noktada hafif beton kullanılmış PCS donatılı kirişlerin kapasitesinde herhangi bir düşüş yaşanmadan ağırlıklarının azaltılması hedeflenmektedir. Yapılacak

deneysel ve analitik çalışmaların, kendinden yerleşen ve hafif betona sahip PCS donatılı kirişlerin kullanılabilirlik durumları ve performansları hakkında literatüre katkı yapılması ön görülmektedir. Ayrıca bu çalışmanın ileride yapılması muhtemel PCS donatılı farklı tipte taşıyıcı elemanlarla (Perde duvar, döşeme, çerçeve sistem vb.) ilgili çalışmalara da esin kaynağı olması da beklenen hedefler arasındadır. Bu tezin ana hedefi ise deneysel ve analitik çalışmalar sonucu PCS donatılı sistemlerin inşaat sektöründe kullanılabilirliği noktasında önemli bir ilerleme kaydedilebilmesine vesile olabilmektir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Betonarme sistemlerde geleneksel donatı sistemleri halen en çok kullanılan donatı sistemleridir. Geleneksel donatı sistemleri dairesel kesitli çelik donatı çubuğunun beton içerisine enine ve boyuna bir biçimde yerleştirilmesiyle oluşur. Enine ve boyuna donatılar birbirlerine teller vasıtasıyla bağlanırlar. Betonarme sistemlerde çelik donatı ile beton birbirlerine tam olarak kenetlenirler. Boyuna donatı betonarme elemanlarda esas olarak çekme gerilmelerine karşı koymak ve sünekliği arttırmak maksadı ile kullanılır. Ayrıca düşey yük taşıyan elemanlarda da betona basınç gerilmelerinin karşılanmasında yardımcı olurlar. Enine donatı ise boyuna donatıya dik bir şekilde yerleştirilen, kalıp içerisinde boyuna donatıyı bir arada tutan donatıdır. Enine donatı betonda sargı etkisi oluşturarak sünekliği artırır ve kesme gerilmelerine karşı koyar. Ayrıca etriye, boyuna donatıları kısaltarak burkulmayı önler.

Geleneksel donatılı betonarme sistemlerin yükler altında gösterdikleri performans-davranış ve hangi parametrelerin bu davranışlara etkili olduğu konusunda yeteri kadar bilgi ve araştırma bulunmaktadır. Betonarme elemanlarda geleneksel donatı sistemi halen en çok kullanılan sistem olmakla beraber alternatif sistemler üzerine birçok çalışmalar yapılmaktadır. Geleneksel donatı sisteminin yoğun iş gücü ve zaman gerektiren imalat yapısı, imalat sırasında yaşanan malzeme kayıpları (fire), çelik donatının korozyona karşı dayanıklılığının düşük olması ve bilhassa işçilikte oluşabilecek hatalar, alternatif donatı sistemleri üzerine yapılan çalışmaların temel nedenleridir. Ayrıca kullanılabilirliği ispat edilmesi muhtemel yeni bir donatı sisteminin, ciddi bir ticari karşılığının olma ihtimalinin de araştırmacılara ekstra bir motivasyon sağladığı da gerçektir.

Bu bölümde bu bilgiler ışığında, geleneksel donatı sistemine alternatif olarak önerilen farklı donatı sistemleri ve bu tezin konusu olan prefabrik kafes takviyeli kompozit ile ilgili yapılan önceki çalışmalara yer verilecektir.

2.1. Betonla Doldurulmuş Çelik Boru Sistemleri (CFST)

Betonla doldurulmuş çelik boru- Concrete Filled Steel Tube (CFST) geleneksel olarak içi boş çelik bir boru içerisine beton doldurmak suretiyle imal edilen kompozit bir yapı elemanıdır. Bu sistem hem betonun hem de çeliğin avantajlı özelliklerini optimize eder. CFST elemanları yükler altında çelik ve betonun kullanışlı özelliklerini birleştirme ve

istenmeyen özellikleri de bertaraf etme yeteneğine sahiptir. Bu sistemde çelik betonu tamamen sardığından beton üzerinde büyük bir sargı etkisi gözlenir. Bu durum beton çekirdeğinin sünekliğini ve dayanımı artıran bir özelliktir. Buna karşılık çelik tüpün içerisindeki beton da borunun iç burkulmasını önler (Al-Shaar, 2018).

CFST imalatında yumuşak çelik (normal karbon), yüksek dayanımlı çelik, ateşe dayanıklı yüksek performanslı çelik ve bunlar gibi farklı çelik malzeme türleri kullanılabilir. Çelik boru özellikleri, çelik malzeme özelliklerine uygun olmalıdır. Çelik borunun dış kısmı ve et kalınlığının seçilmesinde ilgili şartname esasları dikkate alınır. Çelik tüpün içine doldurulacak beton normal beton veya kendiliğinden yerleşen beton olabilir. Çeşitli tasarım kurallarına göre izin verilen basınç dayanımı 20 MPa ile 80 MPa arasındadır. Su/Çimento oranının 0,4'ten fazla olmaması önerilir (Han ve ark., 2014).

Kendiliğinden yerleşen betonun kullanımı ekstra bir titreşime ihtiyaç duyulmadan çelik tüpün içine yerleşebilmesi sebebiyle çelik boru sistemlerinde önemli bir yere sahiptir. Ayrıca kendiliğinden yerleşen betona sahip çelik boru sistemlerinde yüksek süneklik ve enerji dağılımı görülebilmektedir (Han et al., 2005).

Yapısal davranışın iyileştirilebilmesi için kullanılacak beton ve çeliğin dayanımlarının birbiriyle uyumlu olması önerilmektedir. Yüksek dayanımlı beton ile yüksek dayanımlı çelik veya düşük dayanımlı beton ile düşük dayanımlı çelik kombinasyonlarının kullanılması uygundur (DBJ / T13-51-2010).

CFST yüksek mukavemeti, yangın dayanımı, yüksek süneklik ve büyük enerji emme kapasiteleri gibi özellikleri birçok yapısal avantaj sunar. İmalat aşamasında kalıp kullanımına gerek olmaması inşaat maliyetleri ve süresini ciddi manada azaltır. Bu avantajlar bu tür betonarme boruların yapılarda yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlar. (Han ve ark., 2014). Yüksek süneklik kapasitesi sayesinde deformasyon toleransının önemli olduğu, sismik aktivitesi yüksek olan yerlerde geniş kullanım alanına sahiptir (Elchalakani ve ark., 2004; Varma et al., 2004).

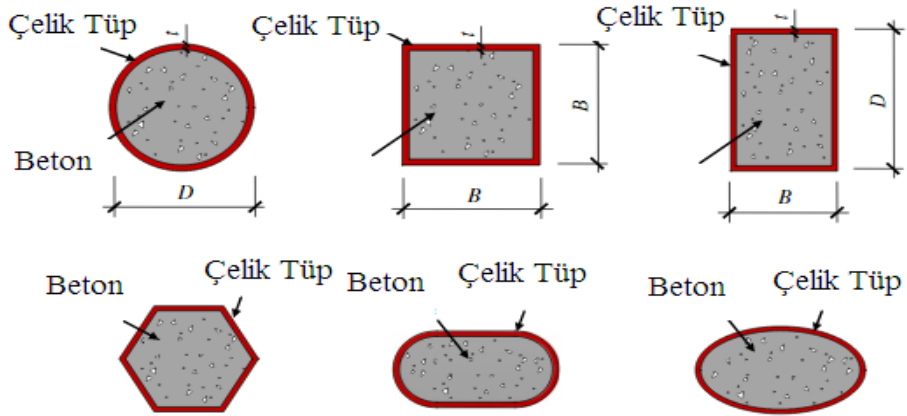
Yapısal avantajlarından dolayı CFST yüksek binalarda, geniş açıklıklı yapılarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de örneği görülebileceği gibi sadece yüksek binalarda değil trafikten etkilenen köprülerde, demiryollarında da kullanılmaktadır. Ayrıca depolama tanklarında ve yüksek katlı yapıların desteklenmesinde kazık olarak da kullanılmaktadırlar (Shanmugam ve ark., 2001).



Şekil 2.1 CFST ile tasarlanan Wangcang East River Köprüsü (Han ve ark., 2014)

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi CFST kolonları çeşitli kesitlerde olabilirler. Dairesel, kare ve dikdörtgen kesitler uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Poligonal, yuvarlak uçlu dikdörtgen, eliptik ve değişik kesit formları özel durumlarda kullanılabilir (Han ve ark., 2014; Uy ve Liew, 2003).

Kare ve dikdörtgen kesitlerin yerel burkulmalardan daha çok etkilendiği görülmüştür. Buna karşılık betonda en büyük sargı etkisinin dairesel kesitler tarafından oluşturulduğu tespit edilmiştir. Ancak tasarım kolaylığı, kolon-kiriş bağlantılarının görece daha kolay yapılabilmesi ve eğilme rijitliklerinin yüksek olması kare ve dikdörtgen kesitlerin yapılarda daha çok kullanılması beraberinde getirmiştir.



Şekil 2.2 Tipik CFST kolon kesitleri (Han ve ark., 2014)

2.1.1. CFST sistemleri ile ilgili yapılan önceki çalışmalar

CFST'lerin eğilme performansı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. İlk çalışmalardan birini yapan Furlong (1967), CFST kirişlerinin eğilme kapasitesinin boş çelik tüpe göre %50 oranında yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Lu ve Kennedy (1994), normal beton dayanımına (40.5 MPa- 47.1 MPa) ve 350 MPa akma dayanımına sahip çelik malzemelerine sahip kare ve dikdörtgen kesitli CFST kirişlerinin farklı derinlik/ genişlik ile farklı genişlik/kalınlık oranları göz önüne alınarak eğilme performanslarını incelemişlerdir. Buna göre test edilen kirişlerin içi boş tüplere oranla eğilme kapasitelerinin %10 ila %30 arasında fazla çıktığı, CFST kirişlerinin eğilme rijitliklerinin yüksek olduğu ve açıklık/derinlik oranlarının eğilme performansı üzerinde ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.

Uy (2000), eğilme ve basınç yüklerine maruz kalan betonla doldurulmuş kolonların davranışlarını incelemiştir. Deney sonucunda göçme modlarının oldukça sünek ve çeliğin üst kısmının lokal olarak burkulduğunu tespit etmiştir. Lokal burkulmanın CFST kirişlerinin performansında önemli bir etkiye sebep olduğunu göstermiştir.

Han (2004) sekizer adet dikdörtgen ve kare kesitli CFST kirişlerinin eğilme performansını incelemiştir. Çalışmada akma dayanımları 293.8-321.1 MPa arasında değişen sacların kaynaklanması yoluyla imal edilen çelik borular ve basınç dayanımları 27.3-40.0 MPa arasında olan beton kullanılmıştır. Test edilen kirişlerin eğilme performanslarının sünek bir biçimde gerçekleştiği, çeliğin beton çekirdeği baskılaması sonucu oluşan kompozit hareketin eğilme performansına olumlu etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca nihai eğilme kapasitesini hesaplamak ve kirişin eğilme davranışı tahmin etmek için mekanik bir model oluşturmuştur. Oluşturulan modelin test sonuçlarıyla örtüştüğü görülmüştür.

Chitawadagi and Narasimhan (2009), 9 adet dairesel kesitli CFST kirişinin eğilme performansını incelemiştir. Değişik basınç dayanımlarına sahip beton (20-40 MPa) ve 250 MPa akma dayanımına sahip soğuk şekillendirilmiş yumuşak çelik kullanılmıştır. Çalışma sonucunda içi betonla dolu dairesel kesitli tüplerin, içi boş tüplere göre sünekliğinde ve eğriliğinde büyük artış gözlemlenmiştir.

Nghiem ve ark. (2018), tam ölçekli değişik genişlik/kalınlık oranları olan açık ve kapalı uçlu 5 adet dairesel kesitli CFST kirişin saf eğilme yükleri altında eğilme kapasitesini incelemiştir. Deney sonuçları incelediğinde tüplerin kapalı uçlu olarak kullanılmasının eğilme performansı üzerinde dikkate değer bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır.

Al Zand ve ark. (2020), CFST kirişlerinin eğilme kapasitesini ve eğilme rijitliğini teorik olarak tahmin etmek için çeşitli amprik yöntemler sunmuşlardır. Bu noktada sonlu elemanlar yazılımı kullanarak 144 farklı sayısal model geliştirilmiştir. Eğilme kapasitesinin bulunabilmesi için 2 farklı amprik formül önerilmiştir. İlk amprik formülde çeliğin sargı etkisi ve betonun kesit alanının kompozit kesitin alanına oranı parametreleri dikkate alınırken ikinci amprik formülde sadece çeliğin sargı etkisi faktörü dikkate alınmıştır. Eğilme rijitliğinin tahmininde de önerilen amprik model önceden yapılan çalışmalara kıyasla en yakın tahminleri vermiştir. Elde edilen tüm sonuçlar daha önceki yapılan deneysel çalışmalar ile doğrulanmışlardır.

Al-Shaar ve Göğüş (2018) hafif ve kendiliğinden yerleşen betonlu doldurulmuş kare kesitli 20 adet CFST kirişinin eğilme davranışlarını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada beton tipi, kullanılan sacın genişlik/kalınlık oranı ve sargı faktörü gibi parametreler değiştirilmek üzere kirişlerin maksimum eğilme kapasiteleri karşılaştırılmıştır. İçi boş çelik tüplerin hafif veya kendinden yerleşen betonla doldurulması eğilme rijitliğini veya sünekliği önemli ölçüde arttırmıştır. Yazarlar, bu artışı betonun çeliğin üst bölgesindeki yerel burkulmasını geciktirme yeteneğinin bir sonucu olarak ifade etmişlerdir. Geleneksel betona sahip numunelerle, kendiliğinden yerleşen ve hafif betonlu numunelerin göçme mekanizmaları birbirine benzer biçimde gelişmiştir. Ancak hafif betonlu numunelerin süneklik indeksinin diğer numunelere göre düşük çıktığı belirtilmiştir. Bunun sebebinin hafif agreganın zayıf mekanik özellikleri ve gözenekli yapısından dolayı olduğu değerlendirilmiştir. Aynı yükseklik ve genişliğe sahip numunelerin eğilme rijitliği ve moment kapasitesinin genişlik/kalınlık oranıyla ters orantılı olduğu belirtilmiştir. Donatı ve sargı oranı arttıkça kapasitenin arttığı görülmüştür. Bu durumun düşük genişlik/kalınlık oranına sahip profillerin yerel burkulmaya daha az duyarlı olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Test sonuçları beton çekirdeğinin tipinin ve basınç dayanımının kirişlerin eğilme kapasiteleri ve süneklikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya koymuştur.

Yapılan literatür araştırması sonucunda özet olarak gerek kolon gerek kiriş CFST elemanlarının geleneksel donatıya sahip betonarme kiriş ve kolon elemanlara göre kıyasla yüksek dayanım ve süneklik özelliklerine sahip oldukları, eğilme kapasitelerinin de daha yüksek seviyelerde seyrettiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte CFST elemanlarının benzer kompozit betonarme elemanlara kıyasla hızlı imalat avantajı olduğu, lokal burkulmalara ve yangın etkilerine karşı da daha dayanıklı oldukları belirtilmiştir (Moon ve ark., 2012).

2.2. Lif Takviyeli Polimer (FRP) Donatılı Betonarme Sistemler

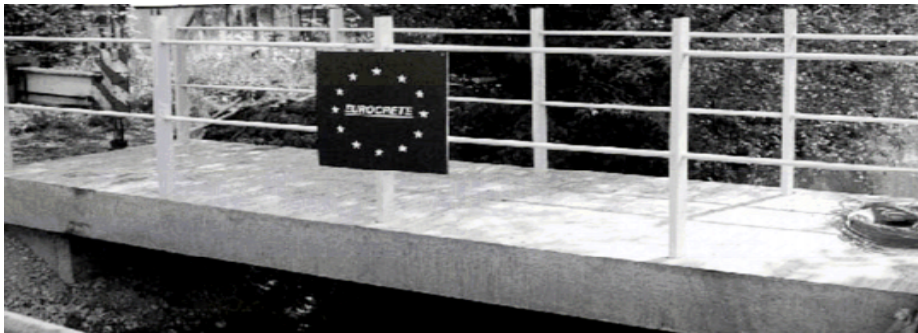
Organik veya inorganik bir matris içine gömülmüş sürekli liflerden yapılmış kompozit malzemelerin inşaat endüstrisinde son yıllarda büyük bir artış göstermiştir. Özellikle fiber takviyeli polimer- Fiber Reinforced Polimer (FRP) malzemeler betonarme sistemlerin kapasitelerini ve sünekliklerini arttırmak için yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Teng ve ark.,2002)

FRP'lerin hafif olmalarına rağmen dayanımlarının yüksek olmaları, korozyona karşı yüksek dayanıklılık göstermeleri ve çelik, metal gibi geleneksel malzemelerle uyumlu bir birliktelik gösterebilmeleri inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabilmelerinin önünü açmıştır (Mosallam ve ark.,2004).

Ayrıca polimerin tipine bağlı olmak üzere, nispeten düşük elastisite modülü, göçme anına kadar doğrusal bir gerilme şekil değiştirme ilişkisine sahip olması, değişken bağ yapısı, manyetik olmaması ve yüksek dayanımı bu malzemenin başlıca avantajlarındanır (Galanti ve ark.,2004)

FRP'lerin yukarıda belirtilen avantajlı özellikleri ve korozyona karşı direncinin yüksek olması, çevresel şartların zorlayıcı olduğu durumlarda betonarme elemanlarda geleneksel donatıya alternatif olarak kullanılması fikrini geliştirmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalar FRP takviyeli donatıların betonarme yapılarda kullanılabileceğini göstermiştir (Davalos ve ark.,2008)

Betonda FRP donatıları ilk kez 90'lı yıllarda yüzen deniz yapıları, köprüler (Şekil 2.3) ve manyetik hassasiyet gereken projelerde kullanılmaya başlanmıştır (Fico, 2007).



Şekil 2.3 Avrupa'da fiber takviyeli donatılı ilk beton yaya köprüsü (Fico,2007)

Günümüzde en çok kullanılan FRP donatılar; karbon lifi takviyeli polimer (CFRP), cam lif takviyeli polimer (GFRP), aramid lif takviyeli polimer (AFRP) ve bazalt lifi takviyeli

polimer (BFRP) sayılabilir. Bu donatıların üretim aşamasında farklı yöntemler kullanılarak yüzey şekilleri ve özellikleri değiştirilebilmektedir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4 Değişik tiplerde FRP donatı örnekleri

Bu konuda GFRP donatısı en çok kullanılan örneklerden biridir. Düşük maliyet, yüksek çekme dayanımı, yüksek kimyasal dayanımı ve mükemmel yalıtım özellikleri bunun en büyük nedenlerindedir. E, Z, A ve C tipi fiberler en çok kullanılan cam elyaf çeşitleridir (Ganga Rao ve Vijay 2007).

Bazalt elyafı da fiber takviyede sıklıkla kullanılan ürünlerdendir. Bazalt elyafı, bazalt kayanın eritilmesiyle üretilir. Cam elyafa göre çekme dayanımı daha yüksektir. Ayrıca darbe ve yangına etkilerine karşı iyi direnç sağlar (Sim ve ark.,2005).

Karbon lifler genellikle poliakrilonitril'in (PAN), 1000-1500°C'da karbonlaştırılması ile üretilmektedir. Boyutsal açıdan kararlı oluşları, neme ve birçok kimyasala direnç göstermeleri ve elektriksel/ısısal iletkenliklerinin yüksek oluşu karbon liflerin avantajlarındandır. Dezavantajları ise siyah rengi ve yüksek maliyetidir (Yavuz, 2011).

Aramid lifleri darbelere karşı çok dirençli ve yüksek dayanımlı bir lif türüdür. Aramid liflerin yoğunluğu karbon ve cam liflerine göre çok düşüktür. Ayrıca mükemmel elektriksel ve termal yalıtım sergiler (Mahroug, 2014).

FRP donatılarının mekanik özelliklerinin yanında yaygınlaşmasındaki diğer sebep de bu malzemelerin üretim tekniklerindeki yaşanan gelişmelerdir. Bu tip kompozitlerin hazırlanmasında işçilik süresini, karıştırma hatalarını azaltan ve üretim verimi arttıran tekniklerin ilerlemesi FRP donatı imalatını yaygınlaştırmıştır. Bu kompozitlerin imalatında

birçok metot gelişmiştir. Bu yöntemler içerisinde taşıyıcı yapı elemanı üretilen en verimli metot pultrüzyon metodu.

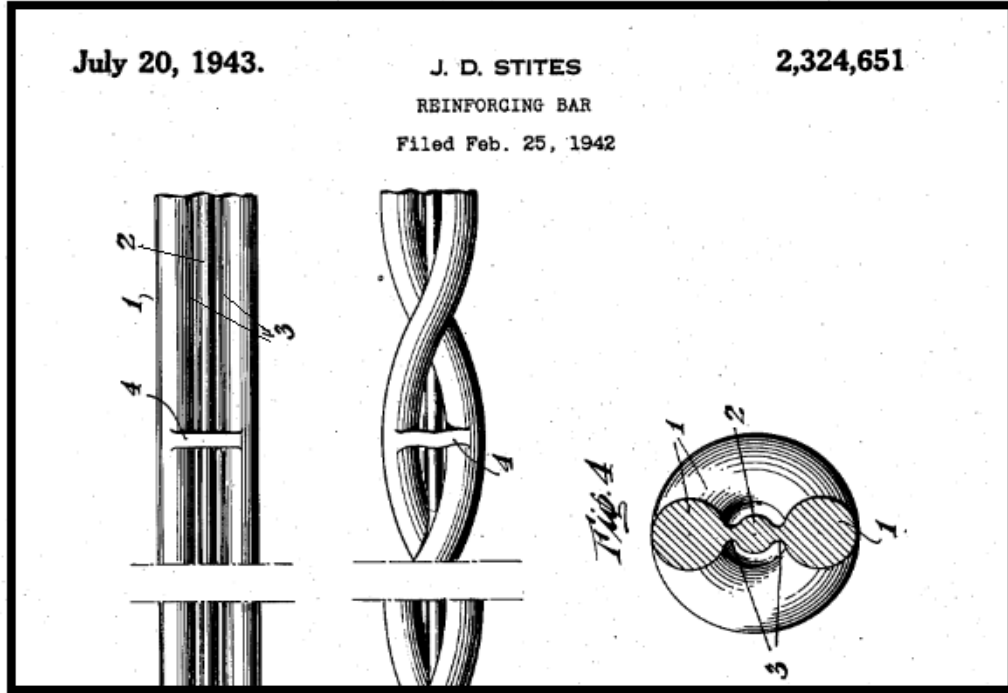
Pultrüzyon, takviye malzemesinin bir reçine matrisi ile birleştirilerek sıcak bir kalıptan çekilmesi suretiyle yapılan profil imalatıdır. Şekil 2.5’de görüldüğü gibi takviye malzemesi olarak kullanılan lifler önce reçine tankının bulunduğu bu bölümden geçerek reçineye bulanırlar. Bu işlemden sonra lifler kalıba girer ve fazla reçine süzülür. Ayrıca, reçinenin takviye malzemesine en yüksek düzeyde teması sağlanmış olur. Ön kalıptan çıkan malzeme, esas kalıba girmeden önce, yüzey kaplama işlemi denilen, atmosfer ve diğer dış etmenlerden korunması için yüzeyi karışık yönlü lif lifleri ile kaplanır. Bu yöntemde, lif/hacim oranı yaklaşık %55-85'e kadar varan kompozit üretimi gerçekleştirilebilir (Halliwell, 2000).



Şekil 2.5 Takviye elemanlarının reçineye daldırılması işlemi (Durmaz,2018)

2.2.1. FRP donatı betonarme sistemler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar

FRP donatılar 1940’lı yıllardan bu yana kullanılmaktadır (Al-Zahrani ve ark.,1999). Şekil 2.6’da teknik çizimi verilen, beton içerisindeki donatının lifler kullanılarak güçlendirilmesiyle ilgili yapılan ilk patentli çalışmalar Stites (1943) ve Jakson (1947) tarafından yapılmıştır.



Şekil 2.6 Lifler yardımıyla donatı güçlendirilmesi çizimleri (Stites,1943)

FRP donatıların geleneksel donatı yerine kullanılması ilgili çalışmalar yıllardan beri süregelse de son yıllarda çalışmalar oldukça artmış ve bu konu ile ilgili ciddi bir literatür havuzu oluşmuştur. Yapılan çalışmalar büyük oranda fiber katkıların donatının çekme dayanımını artırıcı özelliklerinden dolayı eğilme üzerine yoğunlaşmıştır.

Chaallal ve Benmokrane (1996), GFRP donatı çubuklarını geleneksel inşaat donatısı yerine kullanarak, yapı elemanın eğilme yükleri altındaki performanslarını incelemiştir. Bu çalışmada çekme gerilmeleri altındaki yapı elemanlarının maksimum kapasitesine ulaşmaya kadar FRP donatısının doğrusal bir davranış gösterdiği, dayanım/ağırlık oranının yüksek olduğu ve yapı elemanlarında kullanılabilirliği ifade edilmiştir. FRP donatılı sistemlerin maliyetinin geleneksel donatılı yapılara göre çok daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ancak çevresel şartların agresif olduğu ortamlarda ileri ki yıllarda yapılması gereken bakım onarım veya tadilat gibi masraflar göz önüne alındığında ekonomik anlamda FRP donatısı kullanılmasının mantıklı hale gelebileceği vurgulanmıştır.

Almusallam (1997), FRP donatılı kirişlerde oluşan yer değiştirmelerin hesabı için sayısal bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Önerilen yöntemde, betonun basınç etkisi altındaki en uç lifinde oluşan şekil değiştirme değeri için bir kabul yapılarak çözüme başlanmakta ve kesitte oluşan tarafsız eksen değeri iteratif bir yöntemle elde edilmektedir. Bu yöntem FRP donatılı kirişlerin analiz ve tasarımı için genel bir çözüm yöntemi olmaktan uzaktır.

Tezuka ve ark. (1995), FRP donatıya sahip 2 açıklıklı betonarme kirişlerin moment dağılımlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada CFRP ve AFRP donatılı kirişlerle ile geleneksel donatılı kirişlerin davranışları deneysel ve analitik olarak karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda analitik çözümlerden çıkan eğriliklerin deneysel verilerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tighiouart ve ark. (1998), FRP donatıların beton ile arasındaki bağ kuvveti deneysel olarak araştırmışlardır. 2 tip FRP donatılı toplam 64 kiriş incelenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre montaj uzunluğu arttıkça FRP donatılarının geleneksel donatıya göre daha düşük bağ kuvveti değerlerine ulaştığı görülmüştür.

Grace ve ark. (1998), GFRP ve CFRP donatılı farklı boyuna ve enine donatı düzenine sahip 7 adet iki açıklıklı betonarme kirişin eğilme performansını incelemişlerdir. Test sonucunda fiber takviyeli elemanlara sahip betonarme kirişlerin geleneksel donatıya sahip betonarme kirişlerle eğilme yükleri altında yakın kapasitelere ulaştıkları ancak fiber takviyeli numunelerin daha büyük yer değiştirmeler yaptıklarını belirtmişlerdir.

Razaqpur ve Mostofinejad (1999), CFRP boyuna ve enine donatıya sahip 4 adet betonarme kirişin eğilme performanslarını incelemişlerdir. Farklı donatı oranlarının davranışa etkisinin incelendiği bu çalışmada yüksek donatı oranlarında CFRP donatılı kirişlerin yarı sünek bir davranış gösterdiği sonucunda varılmıştır.

Tautanji ve Deng (2000), GFRP donatılı basit mesnetli betonarme kirişlerde oluşan yer değiştirmelerin tespit edilebilmesi için ACI 440.1.R-06 (2006) tarafından önerilen denklemlerin uygulanabilirliğini araştırmışlar ve önerilen bu denklemlerin iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Barris vd. (2009), GFRP donatılı betonarme kirişleri iki noktasal yük etkisi altında deneysel olarak yüklemeye tabi tutarak, donatı ve etkili derinlik/kesit yüksekliği oranının davranışa olan etkisini araştırmışlardır. Ayrıca ACI 440-06 (2006)'nın önerdiği etkili atalet momentleri aracılığı ile elde edilen yer değiştirme değerlerini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Servis yükleri düzeyinde bu modellerin uygun sonuçlar verdiği fakat yükün taşıma gücüne yaklaştığı durumlarda sonuçlarda farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir.

Muhammad ve Nadjai (2009), FRP donatılı betonarme kirişlerin yük-yer değiştirme eğrileri ile ACI 440 tarafından önerilen yer değiştirme modellerini karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçların analitik tahminlerle yakın sonuçlar verdikleri tespit edilmiştir.

Kassem ve ark. (2011) yaptıkları bir çalışmada eğilme yükleri altında FRP donatılı betonarme kirişlerde oluşan çatlak genişliklerinin yükün uygulandığı ilk andan göçmeye kadar doğrusal olarak değiştiği ve yüksek donatı oranlarında çatlak genişliklerinin azaldığını belirtmiştir.

İlker ve ark. (2012) FRP donatılı betonarme kirişlerin moment kapasitesini tahmin etmek için sayısal bir yöntem önermişlerdir. Deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalar, önerilen sayısal tekniğin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca yüksek miktarda fiber takviyenin artışı moment kapasitesini az miktarda arttırmıştır. Beton basınç dayanımının da eğilme kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucunda varılmıştır.

Brozda ve ark. (2017), CFRP, GFRP ve AFRP donatılı kirişlerin eğilme kapasitelerini birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Yapılan hesaplama ve analizler Amerikan şartnamesindeki (ACI 440.1R-06) kodlara uygun olarak yapılmıştır. Çeşitli takviye türlerine bağlı olarak elde edilen özellikler belirtilmiştir. Yapılan analiz sonucunda CFRP donatılı kirişlerin performansı diğer takviyelere göre en yüksek değeri vermiştir. AFRP donatılı kirişlerin eğilme kapasitesi CFRP donatılı numunelere göre %30 düşük çıkmıştır. GFRP donatılı kiriş kapasitesi AFRP donatılı kirişe yakın olmakla beraber, deney grupları arasında en düşük değerlerdedir. Bu durumun en büyük nedenini karbon elyafın çekme dayanımının ve elastisite modülünün yüksek olmasına bağlamışlardır.

Hasan ve ark. (2019), FRP donatılı kolonların aksel yük altında maksimum aksel yük taşıma kapasitesini hesaplamak için yeni bir denklem önermişlerdir. Önerilen denklem daha önceki yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda FRP donatılarının elastisite modülü baz alarak yapılan analizlerin, maksimum çekme dayanımı baz alınarak yapılan analizlerden daha gerçekçi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Önerilen denklem bu nedenle FRP donatıların çekme gerilmesine ve elastisite modülüne bağlı olarak hazırlanmıştır. Ayrıca beton basınç dayanımına dayanan bir amprik denklem de maksimum yük durumunda kolonlardaki FRP donatısının birim şekil değiştirmesini hesaplamak üzere geliştirilmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntemin, normal ve yüksek mukavemetli betona sahip, FRP donatılarla güçlendirilmiş betonarme kolonların maksimum taşıyabileceği aksel yükü bulmak için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Ruan ve ark. (2020), GFRP donatılı betonarme kirişlerle, geleneksel donatılı betonarme kirişlerin eğilme yükleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar teorik modellerle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda FRP

donatılı betonarme kirişlerle, geleneksel donatılı betonarme kirişlerin ilk çatlama momentinde belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Aynı donatı alanlı FRP donatılı kirişlerin eğilme kapasitesinin geleneksel donatılı betonarme kirişe göre %5 oranında düşük çıktığı görülmüştür. FRP donatı oranı arttıkça düşük lif takviyeli numunelere göre süneklik indeksinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca FRP donatılı kirişlerin yük altındaki maksimum çatlak genişliği geleneksel donatılı numunelere göre daha büyüktür ve artan donatı oranıyla birlikte artış gösterdiği belirtilmiştir.

Yapılan literatür çalışması sonucu FRP donatılı yapısal elemanların taşıyıcı betonarme elemanlarda kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır. Literatürde liflerin çekme dayanımlarının yüksek olması sebebiyle genel olarak eğilme yükleri altındaki kirişlerin davranışlarına etkileri incelenmiştir. FRP donatıların üretim tekniklerinin gelişmesiyle birlikte gerek üst düzey mekanik özellikleri gerekse de olumsuz çevresel şartlara karşı dayanıklılıklarının yüksek olması sebebiyle betonarme elemanlarda gelecekte daha çok kullanılır hale gelebilecekleri anlaşılmaktadır.

2.3. Kaynaklı Hasır Donatılı (WWR) Betonarme Sistemler

Kaynaklı hasır donatı- Welded Wire Reinforcement (WWR), kare veya dikdörtgen biçiminde birbirine kaynak yapılmış yüksek dayanımlı, soğuk çekilmiş veya soğuk haddelenmiş paralel serilerden oluşan prefabrik bir takviyedir (Şekil 2.7). Her donatı keşişimi elektrik kaynağıyla kaynaklanır ve tek parça homojen bir yapı haline getirilir. Yapısal elemanlar yüksek dayanımlı ve düzgün dağılımı yapılmış kaynaklı hasır donatı sistemiyle ekonomik ve başarılı bir biçimde güçlendirilebilmektedir. Küçük çaplı ve yakın aralıklı donatıya sahip hasır donatı sistemleri yükler altında düzgün bir gerilme dağılımı ve çatlak kontrolüne olanak tanır. WWR'yi oluşturan donatı çubuklarının akma dayanımı genel olarak geleneksel donatı çubuklarından daha yüksektir. Ancak soğuk çekme işlemi nedeniyle WWR'nin sünekliği geleneksel donatı çubuklarına göre daha düşüktür. WWR, hızlı imalata uygun üretim tekniği sayesinde zaman ve imalat açısından ciddi bir tasarruf sağlar. Bu da toplam proje maliyetini önemli ölçüde düşüremeye katkı sağlar (Wire Reinforcement Institute (WRI), 2016).



Şekil 2.7 Kaynaklı hasır donatı

Maliyet etkinliği ve imalat kolaylığı sayesinde WWR günümüzde ticari ve konut yapıları, otoyollar, köprüler, havaalanları, duvarlar, bariyerler, tüneller gibi birçok yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Morcoux ve ark.,2011).

Literatürde WWR ile ilgili yapılan çalışmalar genel olarak döşeme ve plaklar üzerine yoğunlaşmıştır. Yükler altında bahse konu donatı sisteminin kirişler ve kolonlar üzerinde etkisini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Literatür bilgisi olarak WWR'nin kolon ve kiriş davranışı üzerindeki etkisini araştıran sınırlı sayıda çalışmaya değinilecektir.

2.3.1. WWR takviye betonarme sistemler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar

Mo ve Kuo (1997), WWR imalatı sırasında yapılan kaynak işleminden dolayı donatıda metalürjik bir çentikler oluştuğunu ve çelik parçacıkların mikro yapısının tekrar aktive olarak akma noktasından sonraki nihai birim uzama miktarının azaldığını bildirmişlerdir. Bu durum WWR'nin geleneksel donatıya göre neden daha gevrek olduğunu açıklamaktadır.

Ravzi ve Saatçioğlu (1989), WWR ile donatılmış betonarme kolonların eksenel yük altında, süneklik ve dayanımlarının %40 oranında arttığını belirtmişlerdir.

Reiterman (1992) WWR takviyeli kolonlar üzerinde yaptığı çalışmalarda numunelerin test sonuçlarına göre maksimum uzamaların kontrol numunelerine göre %30 ila %40 arasında fazla olduğunu, WWR takviyeli kolonların dayanımı, sünekliği ve maliyet etkinliği açısından kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur

Kusuma ve ark. (2015), WWR takviyeli kolonlarda uzunlamasına çelik donatıyla birlikte enine donatı olarak hasır kaynaklı donatı kullanılmasının yükler altında beton pas payının parçalandıktan sonra bile kolona önemli süneklik ve dayanım artışı kazandırdığını belirtmişlerdir. Çeşitli etriye konfigürasyonları ve aralıkların kolonun kayma dayanımını ve tokluğunu arttırdığını ifade etmişlerdir.

Xuan ve ark. (1987), WWR takviyeli ön germeli T kirişlerin kesme davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucu kaynaklı hasır donatı kullanılmasının çatlak dağılımını iyileştirdiği belirtilmiştir.

Akhnoukh ve Xie (2010), ultra yüksek performanslı betona ve yüksek kesme dayanımına sahip I tipi betonarme kirişlerde WWR kullanımının performansına nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Test sonuçları hasır kaynaklı donatıyla güçlendirilmiş kirişlerin kesme kapasitelerinde artış olduğunu ortaya koydu. Genellikle köprü yapımında kullanılan bu kiriş tipi için gerek maliyet etkinliği gerekse de imalat kolaylığı açısından WWR kullanılmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.8'de WWR takviyeli I kesitli kirişin eğilme testi sırasındaki görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Hasır kaynaklı donatılı I tipi betonarme kirişin test esnasındaki durumu
Akhnoukh ve Xie (2010)

Gilbert ve Smith (2006), WWR takviyeli toplam 8 adet minimum donatı oranına sahip 2 açıklıklı döşeme numunesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda betonda kaynak yerleri yakınlarında çatlakların meydana geldiği ve donatının küçük bir kısmında gerilme yoğunlaşmalarının oluştuğunu bildirmişlerdir. Kritik kesitlerde davranış sünek olmasına rağmen birtakım deformasyonların belli noktalarda olması numunenin yük altında gevrek kırılmasıyla sonuçlanmıştır. Bu çalışmada betonarme yapısal

malzemenin en önemli özelliklerinden süneklik avantajının bu nedenlerle kaybolduğu belirtilmiştir.

Tuladhar ve ark. (2013), WWR takviyeli betonarme döşemelerdeki süneklik problemini çözmek amacıyla FRP ile güçlendirilmiş 8 adet WWR takviyeli döşemenin eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar düşük sünekliğe sahip WWR takviyeli döşemenin FRP kullanılarak süneklik davranışlarının önemli ölçüde iyileştiğini ortaya koymaktadır.

Shawani ve ark. (2019), 50 adet basitçe desteklenmiş WWR takviyeli betonarme kirişin eğilme yükleri altında davranışını incelemişlerdir. Yerel deformasyonların incelenmesi amaçlayan bu çalışmada 2 parametre üzerinden çalışma yürütülmüştür. Bu parametreler donatı kaynak aralıkları ve donatı çapıdır. Bu iki parametrenin WWR takviyeli betonarme kirişin dayanımına, sünekliğine ve kırılma davranışına olan etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kaynak aralıkları azaldıkça sünekliğin azaldığını ancak donatının birim uzama yeteneğinin sünekliğe etkisinin kaynak aralığından daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Süneklik problemi yaşanmaması için kaynak aralıklarının 355 mm'den büyük olması önerilmiştir.

2.4. Beton Kaplamalı Çelik Kompozitler

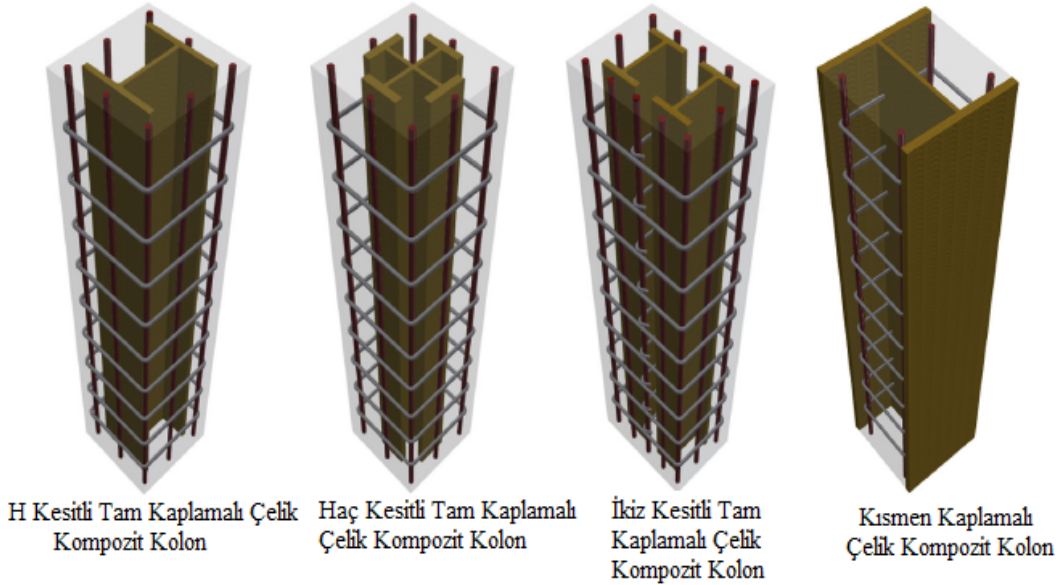
Betonarme yapı tasarımında beton kaplamalı çelik tüm dünyada yaygın olarak kullanılan yapı sistemlerinden biridir. Betonarme sistemde beton sargılı çelik çoğunlukla geleneksel donatıya sahip kolon ve kiriş elemanlarına alternatif olarak kullanılabilir

Beton kaplamalı çelik kompozit kolonlar, geleneksel çelik kolonlara ve betonarme kolonlara kıyasla üstün yapısal performansları nedeniyle yeraltı inşaatlarında ve yukarıdan aşağı (Top-Down) inşaat sisteminde son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Yapısal olarak incelendiğinde çelik profil betonla sarılarak çeliğin yerel burkulması önlenmiş olur. Böylece dayanım, tokluk ve süneklik büyük ölçüde artırılabilir. Ayrıca çelik profilin varlığı kesme çatlaklarını geciktirebilir veya kısıtlayabilir. Böylece kompozit kolonların genel kesme direnci artırılabilir. (Zhu ve ark., 2010)

Yüksek binaların yapımında da yaygın olarak kullanılan beton kaplamalı çelik kompozit kolon, geleneksel betonarme kolonlara kıyasla yük taşıma kapasitesi, süneklik ve yangına dayanıklılık açısından belirgin avantajlar sunar. Donatı montajı ardından beton dökümünden sonra kalıcı kompozit kolon oluşur ve ilave bir yangın koruması da gerekmez.

Yapı tasarımında beton kaplamalı çelik sistemleri için farklı şartnamelerde farklı sınırlamalar getirilmiştir. AISC 360-16 şartnamesine göre, beton kaplamalı kompozit kolon için çelik çekirdeğin kesit alanı toplam kompozit kesit alanının en az %1'i ile sınırlandırmıştır. (AISC 360-16, 2016). EN 1994-1-1 EN, B. (2004) ve AS/NZS 2327 (2017) standartları ise çelik katkı oranı tabirini kullanmaktadır. Bu şartnamelere göre sadece çelik kesit alanı değil aynı zamanda çelik kesitin akma dayanımı da dikkate alınır. Bu kodlara göre çelik katkı oranı 0,2 ile 0,9 arasında sınırlandırılmıştır.

Beton kaplamalı çelik kompozit kolonlar, tam kaplamalı ve kısmen kaplamalı çelik kompozit kolonlar olmak üzere iki farklı kısımda incelenir (Şekil 2.9). Tam kaplamalı beton sargılı çelik kompozit kolon, çelik profilin varlığı haricinde geleneksel betonarme kolonla benzer geometrik konfigürasyona sahiptir (Bogdan ve ark., 2019). Tam kaplamalı beton sargılı çelik kolonlar, betonla doldurulmuş çelik kolonlara göre yangın ve korozyon açısından daha iyi performans gösterir. Kısmen kaplamalı çelik kompozit kolonlar ise yalnızca çelik flanşların arasına beton doldurulmuş suretiyle imal edilir. Çelik tamamen beton ile sınırlandırılmadığından lokal burkulmayı önlemek için plaka incelik oranının ek kontrolü gereklidir (Lai ve ark., 2020).



Şekil 2.9 Değişik tiplerde beton kaplamalı çelik kompozit kolonlar.

Beton kaplamalı çelik kompozit kolonlarda donatı olarak sadece çelik profiller değil aynı zamanda geleneksel sistemde kullanılan çelik donatı çubukları da bulunabilir. Boyuna çelik donatı çubukları beton kesiti boyunca yerleştirilir ve belirli aralıklarla etriyeler vasıtasıyla yanal olarak sınırlandırılır. Sismik direnci veya sargı etkisini arttırmak için çapraz

yan bağlar boyunca donatıya dik olacak şekilde yerleştirilebilir. Çelik ve beton arasındaki doğal bağ kompozit etkiyi sağlar (Lai ve ark., 2019).

2.4.1. Beton kaplamalı çelik kompozitler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar

Fillion (1998) ve Tremblay ve ark., (1998), kısmen kaplamalı çelik kompozit kolonların aksenal yük altındaki davranışları ile ilgili ilk çalışmaları yapmışlardır. 300x300 ve 450x450 mm kare kesitli ve kesit boyutunun 5 kat uzunluğunda boylara sahip kısa kolonlar üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada kompozit etkinin anlaşılabilmesi için farklı enine bağlantı aralıkları ve flanş incelik oranları da göz önünde bulundurularak çıplak çelik kolon ve beton kaplamalı çelik kolon, aksenal yük altında ayrı ayrı test edilerek davranışları karşılaştırılmıştır. Chicoine ve ark. (2000)'da benzer biçimde boyut etkisini incelemek için 600x600 kare kesitli kolonları aksenal yük altında test etmiş ve flanş incelik oranları ve bağlantı aralıklarını değiştirerek ilk test serileri ile karşılaştırmıştır.

Yapılan testler sonucunda aksenal yük altında çıplak çelik kolonlar yerel burkulmalar sebebiyle taşıma kapasitesine ulaşırken, beton kaplamalı çelik kolonlar taşıma kapasitelerine; çeliğin akması, betonun ezilmesi ve çelik flanşların yerel burkulmalarının bir kombinasyonu ile ulaştığını bildirmişlerdir. Flanş plaklarının inceliğine bağlantı aralıklarına bağlı olmak üzere lokal burkulmaların tepe yüküne yakın seviyelerde gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Chicoine ve ark., (2003) beton kaplamalı çelik kompozit kolonların uzun süreli yükler altındaki davranışlarını araştırmışlardır. Örnekler 150 gün boyunca aksenal yüke maruz bırakılmışlardır. Yapılan testler sonucunda uzun süreli yüklenen örneklerle önceden yükleme yapılmayan örnekler arasında nihai kapasite ve göçme mekanizması açısından herhangi bir farka rastlanmamıştır.

Gutiu ve ark., (2006) betonla kaplanmış çelik kompozit kolonlarda çelik profil ile beton arasındaki kesme bağlantısı aparatının tasarımı ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada kısmen beton kaplı çelik I-şekil kesitli kompozit kolonlar için beton ve çelik bileşen arasındaki ara yüzey üzerindeki kayma gerilmelerinin değerlendirilmesi için analitik bir yöntem sunulmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda beton ile çelik arasındaki doğal bağ (aderans) yeterli değilse kesme aparatlarının (konektörleri) kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Begum ve ark., (2013) yüksek dayanımlı betona sahip kısmen beton kaplamalı çelik kompozit kolonların aksenal yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada yükler altında kompozit kolonunun tepe noktasından sonraki davranışını tahmin edebilen bir sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Bu modelle normal beton yerine yüksek dayanımlı beton kullanılmasının kısmen beton kaplamalı çelik kompozit kolonun dayanım ve göçme davranışına etkisi incelenmiştir. Yapılan parametrik çalışma sonucu kompozit kolonun ebat oranlarının nispeten küçük bir artışına rağmen yüksek dayanımlı beton kullanılması sonucu aksenal kapasitesi büyük oranda artmıştır. Bununla birlikte yüksek dayanımlı betona sahip kompozit kolonun yükler altında normal dayanımlı kompozit kolona kıyasla kırılma davranışının nispeten daha gevrek bir yapıda olduğu görülmüştür.

Lai ve ark., (2019) yüksek dayanımlı betona sahip tamamen kaplamalı çelik kompozit kısa kolonların aksenal yük altındaki davranışını deneysel olarak araştırmışlardır (Şekil 2.10). Çalışmada beton dayanımı, enine donatı aralıkları ve betona ilave edilen çelik lif gibi parametrelerin değişimlerinin kompozit kolonun yapısal performans, yük deformasyon eğrisi ve göçme mekanizmasına etkisi incelenmiştir. Deneysel araştırmanın sonucunda yüksek betona sahip numunelerde kapasite artışı görülmesine rağmen normal mukavemetli betona göre daha gevrek bir kırılma davranışı göstermiştir. Enine donatı aralığının azaltılması kompozit kolonun kapasitesini arttırmış ve maksimum yükten sonraki süneklik davranışı üzerinde önemsiz sayılabilecek bir düşüşe sebep olmuştur. Deneysel gözlemlere dayanarak geleneksel betonarme kolonlardaki beton sargı modellerin tamamen kaplamalı çelik kompozit kolonlar için kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Tasarım yapılırken sargısız beton dayanımının kullanılmasının daha ihtiyatlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca betona eklenecek %0.5 oranında lif takviyesinin bile beton pas payının yükler altında erken parçalanmasını engellediği, bunun sonucu olarak da yük taşıma kapasitesi ve süneklik üzerine olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.10 Çelik kompozit kolonun hazırlanışı (Lai ve ark., 2019)

Mao ve Kodur (2011) beton kaplı çelik kompozit kolonların yangın direncinin değerlendirilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda 7 adet numune test edilmiştir. Değişken test parametreleri yük yoğunluğu, yük eksantrikliği, 3 veya 4 yüzünden yangına maruz kalma olarak belirlenmiştir. Test sonuçları belirtilen parametrelerin beton kaplı çelik kolonların termal ve yapısal tepkisine olan etkisini ortaya çıkarmıştır. Buna göre beton kaplı çelik kompozit kolonların 3 taraflı ısıtma altında 4 taraflı ısıtmaya göre daha iyi bir yangın direnci olduğunu ortaya koymuştur. Isı artışının hızlı olması betonda dökülmeyi ve çatlamayı hızlandırmaktadır. 3 taraflı ısıtma altında sıcaklık artışı 4 taraflı ısıtmaya göre doğal olarak daha yavaş gerçekleşir. Ayrıca yük yoğunluğu ve eksantrikliğin yangın dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğu anlaşılmıştır. Yük seviyesinin ve eksantrikliğin fazla olması yangın direncini düşürmektedir. Beton pas payının dökülmesi yangın dayanımını azaltmıştır. Çekme gerilmelerinin olduğu kısımlarda yangın yalıtımı sağlanmasının yangın direncini önemli ölçüde arttırdığı belirtilmiştir

Jiang ve ark., (2016) kısmen kaplı çelik kompozit kirişin eğilme yükleri altındaki davranışını incelemiştir. Bir tanesi geleneksel betonarme kiriş, üç tanesi kısmen kaplı çelik kompozit olmak üzere dört adet kiriş eğilme testine tabi tutulmuşlardır. Çelik kompozit kirişte ana değişken parametre çekme bölgesindeki boyuna donatı miktarı olarak belirlenmiştir. Yükleme sonucunda kısmen beton kaplı çelik kirişin çekme bölgesinde çatlak oluşumunun daha yavaş olduğu, nihai kapasitesinin daha yüksek olduğu ve daha sünek bir davranış gösterdiği belirtilmiştir. Çekme bölgesindeki boyuna donatı miktarı arttıkça moment dağılım derecesi azalmaktadır.

Chen ve ark., (2018) beton kaplı çelik kompozit kirişin eğilme yükleri altındaki davranışlarını araştırmıştır. Çelik malzemesi olarak baklavalı sac kullanılmıştır. Dışbükey baklavalı sac kullanılarak çelik ve beton arasındaki aderansın artırılması ve kooperatif performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda 6 adet kiriş numunesi eğilme yükleri altında test edilerek yük-yer değiştirme davranışları, göçme mekanizmaları ve kesme kuvvetleri altındaki davranışları incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda çelik kirişin damalı deseni çelik kiriş ve beton arasındaki aderansı arttırmıştır. Bağ kuvvetinin kesme önleme kapasitesi artırıldığı düşünüldüğünde kesme konektörlerinin çapı ve sayısı etkin bir biçimde azaltılabilir. Bu durum işçilik ve maliyet açısından ekonomi sağlayabilir. Kayma önleyici bağlantı sayısı arttıkça eğilme kapasitesinin arttığı, göçme mekanizmasının kesme kırılmasından eğilme kırılmasına evrildiği belirtilmiştir. Çelik levha ile beton arasındaki bağlanma etkisi dikkate alınarak, yeni tip kompozit kirişin kesme kuvveti ve yer değiştirmeyi hesaplayan teorik formüller önerilmiştir. Kesme etkisinin neden olduğu ek yer değiştirmeler göz önüne alındığında, kompozit kirişlerin elastik ve nihai eğilme kapasiteleri elde edilmiştir. Ayrıca, teorik değerler deneysel değerlerle tutarlı olduğu da bildirilmiştir.

Kabir ve ark., (2019) hafif beton ve içerisinde polivinil alkol olan özel bir çimentoyla yapılmış beton ile kaplanmış çelik kompozit kirişin yükler altında eğilme ve çelik-beton arasındaki bağlanma dayanımı hakkında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu kapsamda bir adet çıplak çelik profil ve 4 adet değişik kaplama konfigürasyonu sahip hafif ve özel üretimli beton kaplamalı çelik kompozit kirişlere 4 noktalı eğilme deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca çalışmada özel üretimli betonla çelik arasındaki bağ kuvvetini ve kirişlerin eğilme performansını tahmin etmek için 3 boyutlu doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Sonlu eleman modelinin doğruluğu deneysel test sonuçları ile doğrulanmıştır. Test sonuçları hafif ve özel üretimli betona sahip beton kaplamalarının çıplak çelik kirişin eğilme dayanımını ve sünekliği önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir.

Ayrıca tamamen kaplı çelik kompozit kiriş taşıma gücüne ulaştığında anda bile bağ kayması gözlemlenmemiştir. Hafif betonla kısmi olarak kaplanan çelik kompozit kirişin eğilme dayanımı çıplak kirişten %32 fazla olduğu belirtilmekle birlikte ağırlığı da diğer kompozit kirişlerden %50 daha düşüktür. Ancak bu numunede önemli miktarda bağ kayması gözlemlenmiştir. Parametrik çalışma sonucunda ise kompozit kirişlerin eğilme dayanımının çeliğin akma dayanımının artmasıyla birlikte çok fazla arttırılabileceğini ve tamamen kaplanmış kirişler için çok yüksek mukavemetli çelik kullanılması halinde bile bir bağ kayması oluşmayacağı belirtilmiştir. Ancak kısmi kaplanmış kirişler için çeliğin akma dayanımına ulaşmadan önce bağ kayması görülebileceği belirtilmiştir.

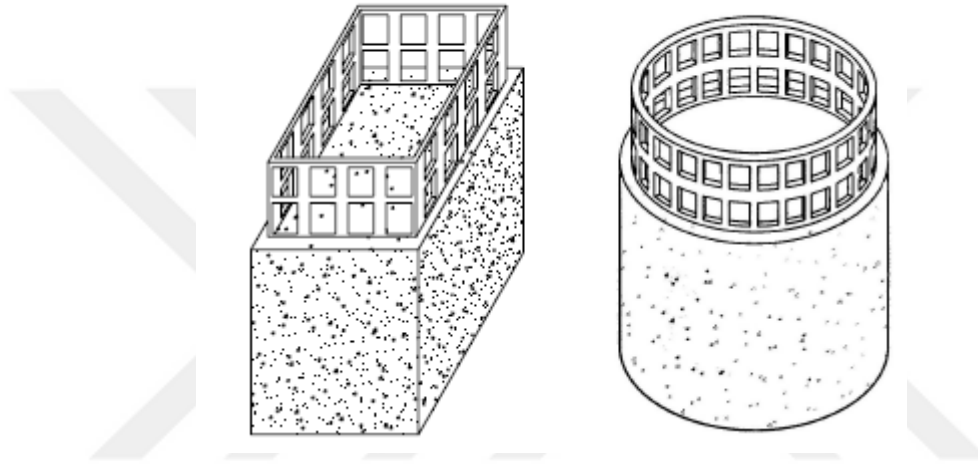
Li ve ark., (2012) fiber katkıli donatı ile güçlendirilmiş beton kaplı çelik kompozit kirişlerin eğilme dayanımlarını incelemiştir. Bu şekilde hem yüksek sünekliliğe hem de korozyona karşı yüksek dayanıklılığa sahip kompozit bir kiriş eleman oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaçla 4 noktalı eğilme deneyinde kullanılacak 7 adet kiriş numunesi imal edilmiştir. Bu kirişlerden bir tanesi fiber katkıli donatı ile güçlendirilmiş betonarme kiriş, diğer altı tanesi ise fiber katkıli donatı ile güçlendirilmiş beton kaplı çelik kompozit kiriştir. Bu çalışmada dikkate alınan parametreler beton basınç dayanımı, fiber katkı donatı miktarı ve kapalı yapısal çeliklerin oranı ve konfigürasyonudur. Ayrıca fiber katkıli donatıya sahip beton kaplı çelik kompozitlerin yük kapasitesinin bulunabilmesi için analitik bir yöntem önerilmiştir. Test sonuçlarına göre çelik profilin betonla kaplanması sonucu kirişlerin yük taşıma kapasitesi, sünekliliği ve enerji emme kapasitesinde önemli bir artış sağlanabileceği belirtilmiştir. Fiber katkıli boyuna donatı miktarı arttıkça çelik kompozit kirişin eğilme kapasitesi ve sünekliliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Eğilme yükleri altında fiber takviyeli donatıya sahip betonarme kirişlerin fiber donatıların ani kırılmasından dolayı gevrek bir şekilde kırıldığı belirtilmiştir. Analitik sonuçlar, geleneksel betonarme kirişler için geçerli olan kiriş teorisinin fiber donatı ile güçlendirilmiş beton kaplı çelik kompozit kirişler için uygulanabileceğini deneysel sonuçlar ile doğrulamıştır.

2.5. Prefabrik Kafes Donatılı (PCS) Betonarme Sistemler

Bu tezin de konusu olan Prefabrik kafes donatılı betonarme sistemler, önceden belirtilen alternatif betonarme sistemlerle kıyaslandığında en yeni ve hakkında en az literatür çalışması olan konulardan biridir. Bu yeni betonarme sistem ilk kez Shamsai ve Sezen

(2005) tarafından önerilmiş ve ‘Beton elemanların güçlendirilmesi için prefabrik kafes sistemi’ başlığı altında patenti alınmıştır.

Prefabrik kafes donatı (PCS) betona tamamen gömülü delikli çelik levha veya tüpten oluşur (Şekil 2.11). PCS çelik bir plaka üzerinde düzgün dikdörtgen açıklıklar kesilerek ve sonrasında kenarı boyunca sürekli kaynak yapılmak suretiyle imal edilebileceği gibi hazır kutu profillerin herhangi bir kesim tekniği kullanarak perfore edilmesi şeklinde de oluşturulabilir. PCS üretiminde plaka kesimi yerine kutu profilin perfore edilmesi kaynak ve büküm prosedürlerini de ortadan kaldırır.



Şekil 2.11 PCS takviyeli betonarme kolonlar (Shamsai, 2006)

PCS donatısında dikey şeritler boyuna donatı, enine şeritler enine donatı görevini görür. PCS, çelik bir plaka veya tüpün kesilerek oluşturulmasından dolayı boyuna ve enine donatıların kesitleri dikdörtgendir. Ayrıca PCS'nin üretim tekniğinden dolayı boyuna ve enine şeritler birbirlerine monolitik olarak bağlıdır. PCS' de boyuna ve enine donatı elemanları yapı elemanın merkezinden eşit uzaklıkta konumlandırılır. Bu da eşdeğer donatı alanına sahip geleneksel donatılı bir yapı elemanına göre daha büyük bir eğilme kapasitesine sahip olması anlamına gelir. Kafes sistemin açıklık boyutları ve sac kalınlıkları değiştirilerek enine ve boyuna donatı miktarı değiştirilebilir, bu sayede istenilen tasarıma uygun donatı sistemi imal edilebilir.

PCS üretimi geleneksel donatı sistemine göre çok daha hassas bir üretim sürecinden geçer. Bu nedenle olası işçilik hataları da ortadan kalkmış olur. Ayrıca monolitik yapısından dolayı geleneksel donatı sisteminde görülebilecek bazı olası detaylandırma problemleri ve zafiyetleri de azaltılmış olur. (Shamsai, 2006)

2.5.1. PCS donatılı betonarme sistemler ile diğer betonarme sistemlerin karşılaştırılması

CFST kolonları ve beton kaplamalı çelik kompozitler yüksek aksel yükleri taşımak için tasarlanmıştır. Aksel yük kapasitesi boyuna donatı oranı yüksek, kesit alanı da nispeten küçük tutularak artırılır. PCS donatılı betonarme sistemlerde de kafes açıklıkları daraltılarak ve sac kalınlıkları artırılarak benzer şekilde aksel yük kapasitesi artırılabilir. Geleneksel donatı sistemine sahip betonarme elemanlarda diğer sistemlere göre daha az sargı etkisi olduğundan aksel yük taşıma kapasitesi de göreceli olarak daha düşük kalmaktadır. WWR takviyeli sistemler genellikle aksel yüke maruz kalan elemanlarda zaten kullanılmamaktadır.

Geleneksel donatılı betonarme kirişleri eğilme yükleri altında yüksek kapasiteli olacak şekilde tasarlanabilirler. Ancak eğilme performansının artırılması için CFST veya çelik kaplı kompozit kullanmak çok verimli olmayabilir. Bunun sebebi bu sistemlerde donatının kesit boyunca devam etmesi buna karşılık çekme kuvvetini karşılanabilmesi donatının için sadece belirli bir bölümünün kullanılabilir olmasıdır. Halbuki PCS verimli bir şekilde yüksek eğilme kapasitesine sahip olacak biçimde tasarlanabilir. Çekme bölgelerinde kiriş yanlarında kafes aralıkları artırılıp, üst ve alt kısımlarda azaltılarak eğilme performansı verimli bir şekilde artırılabilir. WWR yüksek eğilme yüklerine maruz kalan elemanlarda çok sık kullanılmamaktadır.

Yükler altında deformasyon yapabilme kabiliyeti süneklik olarak tanımlanır. Özellik sismik aktivitesi yüksek olan bölgelerde sünek yapı tasarımı önemli bir konudur. Yapının sünek bir davranış içerisinde olabilmesi için yapı elemanlarının da sünek davranış göstermesi gerekir. Geleneksel donatılı, WWR takviyeli ve PCS donatılı sistemler denge altı bir donatı oranı dikkate alınarak tasarlanması halinde sünek davranış gösterebilirler. CFST ve beton kaplı çelik kompozit elemanlar ise genellikle çok rijit olduklarından yükler altında daha gevrek bir davranış göstermektedirler.

CFST ve beton kaplı çelik kompozit elemanlar genellikle yüksek kesme dayanımına sahiptirler. PCS donatılı sistemler kafes açıklıkları yükseklikleri azaltılıp, aralıklar artırılarak kesme dayanımları yüksek betonarme elemanlar olarak tasarlanabilirler. Geleneksel donatılı sistemlerde enine donatı miktarı artırılarak kesme kuvvetlerine karşı daha dayanıklı bir tasarım sağlanabilir. PCS donatılı elemanlarda sistemin monolitik yapısından dolayı boyuna ve enine donatı birbirine rijit olarak bağlıdır ve geleneksel sistemde kesme kuvvetleri altında enine donatının kancasının açılmasından dolayı

oluşabilecek zafiyetler yaşanmaz. Bu rijit birleşim sayesinde kesitin kesme kapasitesi ve deformasyon yapabilme kabiliyeti artar. WWR ise özellikle perde duvar gibi elemanlarda yüksek kesme dayanımının sağlanması noktasında etkili olarak kullanılabilir.

Burulma dayanımı söz konusu olduğunda CFST en büyük burulma dayanımına sahip sistemdir. PCS ise geleneksel donatılı ve beton kaplı çelik kompozit sistemlere göre daha iyi burulma dayanımına sahiptir. WWR'nin kolonlarda kullanılması halinde kolonun burulma mukavemetini yükselir.

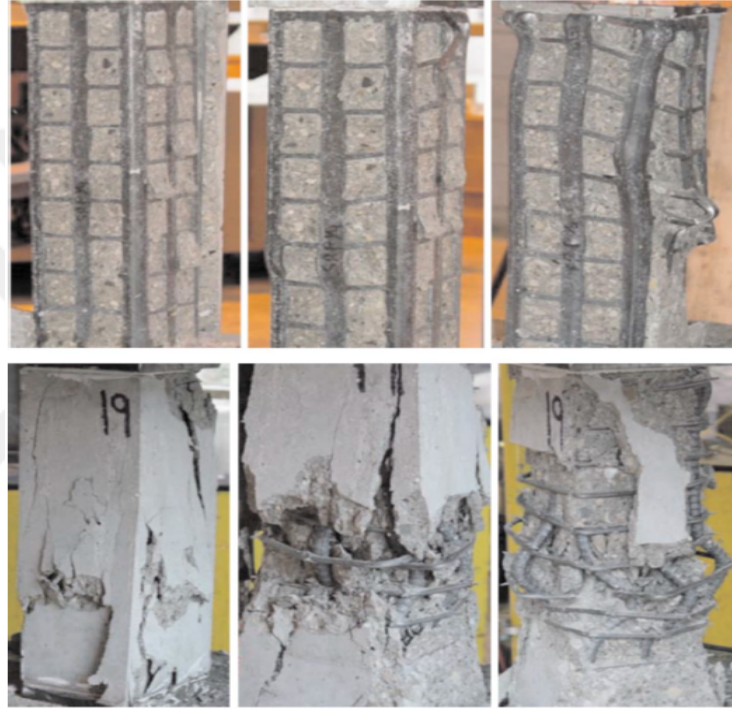
CFST ve beton kaplı çelik kompozitlerde bağlanma direnci (aderans) düşüktür. Bu sebeple çelik ve beton arasındaki aderansı arttırmak için kesme aparatları (konektörleri) kullanılır. Geleneksel ve WWR takviyeli betonarme sistemlerde beton içerisinde yeterli kenetlenme boyu sağlanması halinde istenen aderans sağlanmış olur. PCS yüzeyi her ne kadar nervürlü çubuklar kadar sürtünme direnci yaratamasa da kafes açıklıklarındaki sertleşmiş beton, kafes donatı sisteminin beton içerisinde hareketine direnecek kuvveti oluşturur.

Yükler altında mekanik özelliklerin yanı sıra önerilen donatı sisteminin uygulanabilirliği ve ekonomikliğe de çok önemli parametrelerdir. Toplam inşaat süresi, inşaat maliyetini belirleyen en büyük unsurlardan biridir. Hatta bazı kritik projelerde zaman paradan daha önemli hale gelebilir. PCS donatı sistemi fabrikasyon bir üretim tekniğinde imal edildiği için projeye uygun bir biçimde önceden üretilebilir. Fabrikasyon üretim tarzı hızlı bir üretimi beraberinde getirebildiği gibi, işçilik hatalarını ve fireleri de minimize eder. Bu da ciddi bir zaman ve malzeme tasarrufu sağlar. Geleneksel donatı sisteminde donatının hazırlanması için harcanan zaman, işçilik masrafı ve malzeme kayıpları yaşanmaz. Beton dökülmeden önce hazırlanan kafes sistem ek bir çalışma gerektirmeden kalıba yerleştirilebilir.

CFST elemanların en büyük handikaplarından biri de yangın dayanımı konusudur. PCS donatılı, geleneksel donatılı, WWR takviyeli ve beton kaplı çelik kompozit sistemlerin yangın dayanımları yüksektir. Bu sistemlerde kaplama betonu, donatıyı ve çekirdek betonu yangına karşı korur. CFST elemanlarında herhangi bir kaplama betonu olmadığından yangın etkilerine karşı daha savunmasızdırlar. Kaplama betonunun olmaması aynı zamanda CFST elemanları korozyon tehlikesine de açık hale getirir. Zorlu çevre koşullarında sülfat ve tuz etkileri çeliğin ömrünü kısaltır. PCS donatılı, geleneksel donatılı, WWR takviyeli ve beton kaplı çelik kompozit sistemler çevresel şartların agresif olduğu ortamlarda daha dayanıklı bir davranış gösterirler.

2.5.2. PCS donatılı betonarme sistemler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar

Sezen ve ark., (2008) PCS donatı betonarme kolonlarla, geleneksel donatılı betonarme kolonların aksenal yük kapasitelerini, yer değiştirme kabiliyetlerini ve kırılma mekanizmalarını karşılaştırmışlardır. Bu kapsamda 11 tanesi PCS donatılı, 4 tanesi geleneksel donatılı olan 15 numune aksenal yük altında teste tabii tutulmuştur (şekil 2.12). Çelik borunun sac kalınlığı, kafes açıklıklarının boyutları, boyuna ve enine donatı alanı gibi parametrelerin aksenal yük kapasitesine ve yer değiştirme yapabilme kabiliyetine etkileri araştırılmıştır.



şekil 2.12 Test edilmiş PCS ve geleneksel donatılı kolonlar (Sezen ve ark., 2008)

Yapılan alışmalar sonucunda PCS donatılı kolonlarla, geleneksel donatılı kolonların maksimum aksenal yük kapasitelerinin karşılaştırılabilir düzeyde olduğu, PCS donatılı kolonların yer değiştirme kabiliyetlerinin ise kontrol numunelerine göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Çelik levha kalınlığının aksenal yük kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Donatı oranı aynı kalmak üzere boyuna ve enine takviye sayısı veya kafes aralıklarının farklı olmasının davranış üzerine herhangi bir etkisi görülmemiştir. Ayrıca PCS donatılı beton için farklı bir beton modeli önerilmiş, teorik ve deneysel sonuçlara göre önerilen modelin davranışının oldukça iyi olduğu görülmüştür.

Shamsai ve Sezen (2011), PCS donatılı kare kesitli notmal beton dayanımına sahip kolonlarla, geleneksel donatılı, notmal beton dayanımına sahip kare kesitli kolonların

eksenel yük altındaki performansları karşılaştırılmıştır. Çelik levha kalınlığı, enine ve boyuna takviye sayısı, kafes açıklıkları gibi parametrelerin davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda 11 adet PCS donatılı, 5 adet geleneksel donatılı toplamda 16 adet küçük ölçekli numune eksenel yük altında test edilmiştir. Test sonuçları PCS donatılı kolonlarla geleneksel donatılı kolonların eksenel yük altında benzer elastik davranışlar gösterdiğini ve karşılaştırılabilir maksimum yüklere sahip olduklarını göstermiştir. Yük altında maksimum yüke ulaştıktan sonra PCS donatılı kolonlar daha sünek bir davranış göstererek daha büyük enerji yutmuşlardır. PCS donatısının monolitik yapısı çeliğin burkulmasını önlemiş, sargı etkisini arttırmış ve sonuçta kolonun dayanımını ve yer değiştirme yapabilme kabiliyetini arttırmıştır. Donatı oranı aynı kalmak üzere enine ve boyuna takviye sayısının veya aralıklarının davranışa herhangi bir etkisi gözlemlenmemiştir. Ayrıca çelik levha kalınlıklarının artmasının dayanıma ve süneklığe olumlu etkisi olduğu anlaşılmıştır. Kullanılan teorik Mander beton modeli deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve Mander beton modelinin PCS donatılı kolonlarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak PCS donatının betonarme kolonlar için güvenli bir şekilde kullanılabileceği ancak kirişler, perde duvarlar ve yanal yüklere maruz kalan elemanlarda kullanılabilirliğinin araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Shamsai ve ark., (2007) sadece PCS donatılı kolonlar baz alınarak mühendislik ekonomisi üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada çeşitli parametreler değerlendirilerek PCS donatılı kolonlarla geleneksel donatı kolonların inşaat maliyetleri karşılaştırılan bir vaka çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda Ohio Üniversitesi kampüsünde bulunan yeni otopark projesi ele alınmıştır. Buna göre betonarme çerçeve sahip otopark projesinin sadece kolonlarında geleneksel donatı yerine PCS donatısı kullanılması durumundaki maliyet analizi hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada PCS donatılı kolonlu yapıların maliyet ve zaman tasarrufunu tahmin etmek için bir yöntem önerilmiştir. Yapılan vaka analizi sonucunda her kolon için %33.3 zaman ve %7.1 maliyet tasarrufu sağlandığı belirtilmiştir. Kolonlarda PCS donatısı kullanılmasının 116 günlük bir zaman tasarrufu sağlandığı, bunun da toplam inşaat süresinde %20.4'lük bir zaman tasarrufuna tekabül ettiği belirtilmiştir. Yapılan vaka çalışmasında düşük miktardaki PCS imalatı göz önüne alındığı için, PCS donatısının seri üretimi söz konusu olması halinde maliyet tasarruflarının artabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca kaynak kullanımı noktasında birden fazla projede çalışan firmaların PCS donatısı kullanmasının firmalara maliyet açısından daha büyük faydalar sağlayabileceği belirtilmiştir.

Fisher ve Sezen (2011), sismik aktivitesi yüksek olan yerlerde betonarme çerçevesi sistemlerin en kritik bileşenlerinin kolon-kiriş birleşim noktası olmasından yola çıkarak, PCS donatılı kolonlar ile geleneksel donatılı kirişlerin birleşim noktalarının çevrimsel yüke maruz kalması durumundaki performanslarını incelemiştir. Bu kapsamda farklı birleşim tasarımlarına (Şekil 2.13) ve kiriş dayanımlarına sahip farklı 3 grup olmak üzere toplam 6 adet numunenin kiriş kolon birleşim noktasındaki davranışları incelenmiştir. Aynı grupta olan numunelerin eşdeğer donatı alanları aynı tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda PCS donatılı numunelerde yüksek sargı etkisi nedeniyle birleşim noktalarında daha az hasar gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda PCS donatılı kolon-kiriş birleşim bölgelerinin çevrimsel yükler altında geleneksel donatılı birleşim noktalarına göre daha iyi bir performans gösterdiği anlaşılmıştır.



Şekil 2.13 Geleneksel donatılı ve PCS donatılı kolon-kiriş birleşim örnekleri (Fisher ve Sezen, 2011)

Chithra ve Thenmozhi (2011), 150x300 mm ebatlarında dairesel kesitli 5 farklı grupta değerlendirilmek üzere, toplamda 75 adet PCS ve geleneksel donatılı kolonun aksel yük altındaki davranışı deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Test parametreleri olarak çelik levha kalınlığı, kafes açıklıkları ve betonun basınç dayanımı belirlenmiştir. Maksimum basınç dayanımını ve maksimum yükteki gerilmeyi tespit etmek için denklemler geliştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda prefabrik donatı kullanımının kolon dayanımını ve sünekliği arttırdığı görülmüştür. Kolonun aksel yük kapasitesi beton dayanımı ve saç kalınlığı ile doğru orantılı, kafes açıklıklarının birbiriyle olan mesafeleriyle ters orantılı olduğu ortaya konmuştur. PCS donatılı numuneler kontrol numunelerine göre sargı etkisinden dolayı daha iyi bir yük taşıma ve süneklik performansı gösterirler. Enine şeritlerin

genişliğinin artmasıyla birlikte yük kapasitesinin arttığı görülmüştür. Maksimum gerilmeleri tahmin etmek için geliştirilen denklemlerin literatürdeki modellerle kıyaslandığında karşılaştırılabilir düzeyde olduğu belirtilmiştir.

PCS donatılı kolonların eksenel yük altındaki davranışları ile ilgili bir diğer çalışma Kesevan ve ark., (2018) tarafından yapılmıştır. Eşdeğer donatı alanına sahip 9 adet PCS donatılı kolon numunesi ile geleneksel donatılı kolon numunesi eksenel yüke maruz bırakılmışlardır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda eksenel yük altında PCS donatılı numunelerin maksimum dayanıma kadar benzer yer değiştirme kapasitesine sahip oldukları, maksimum yük seviyesinden sonra daha iyi bir dayanım ve yer değiştirme davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Bununla beraber daha kalın çelik levhalara sahip PCS donatılı numunelerin daha yüksek dayanım ve yer değiştirme kapasitesine sahip oldukları belirtilmiştir. Ayrıca teorik yer değiştirmelerin deney sonucu ölçülen yer değiştirme miktarları ile tutarlı oldukları değerlendirilmiştir.

Rethnasamy ve ark., (2013) PCS donatılı kirişlerin eğilme performanslarını araştırmışlardır. Bu kapsamda 3 adet geleneksel donatılı 15 adet PCS donatılı betonarme kirişe 4 noktalı eğilme deneyi uygulanarak kirişlerin eğilme dayanımı, süneklik durumları ve göçme modları incelenmiştir. Test parametreleri olarak beton dayanımı, donatı oranı, çelik levha kalınlığı ve akma dayanımı belirlenmiştir. PCS donatılı kirişin göçme modunu belirlemek için bilgisayar modeli oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda eğilme yükleri altında PCS donatılı numunelerin göçme modlarının geleneksel donatılı numunelerle benzer yapıda gerçekleştiği, PCS donatılı kirişlerin eğilme kapasitelerinin daha yüksek olduğu ve prefabrik kafesin sargı etkisi sayesinde çatlak oluşumunu geciktirerek PCS donatılı kirişlerin geleneksel donatılı numunelere kıyasla daha sünek bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Kolonlarda yapılan daha önceki çalışmaların aksine çelik sac kalınlığının artması sünekliği azaltmıştır. Beton dayanımının değişimi, kirişin eğilme kapasitesini dikkate değer şekilde etkilememiştir. Önerilen bilgisayar modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Ding ve Zang (2016), PCS donatılı ve geleneksel donatılı kolonlu betonarme çerçeve sistemlerini ayrı ayrı modelleyerek yanal yükler altındaki sismik davranışını analitik olarak incelemişlerdir. Modellere tek yönlü olmak üzere artan yükler altında itme analizi (Pushover) uygulanmıştır. Yapılan betonarme modeller 6 katlı, 2 açıklıklı çerçeve sistemlerdir. Kolonlar 40x40 cm kesitlerinde 3.00 m uzunluğunda, kirişler 25x50 cm kesitlerinde 4.00 m uzunluğunda olacak şekilde tasarlanmışlardır. Beton malzemesi C30

olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda PCS donatılı tasarlanan kolonlar ile geleneksel donatılı tasarlanmış kolonların aksenal ve eğilme yük kapasiteleri ile katlar arası yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan bilgisayar analizi sonucu PCS donatılı kolonlara sahip betonarme çerçevenin geleneksel donatılı kolonlara sahip betonarme çerçeveye kıyasla mekanik davranışının daha iyi olduğu görülmüştür. PCS donatılı kolonların maksimum yük taşıma kapasiteleri geleneksel donatılı kolonlardan %12, deformasyon miktarları ise % 16 daha yüksektir. Yapılan analiz sonucunda PCS donatısının kolonlarda geleneksel donatı yerine uygulanabileceği değerlendirilmiştir.

Lıu ve Zhu (2019), PCS donatılı kolon kiriş birleşim noktalarının sismik davranışını, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir bilgisayar programıyla (ABAQUS) simüle etmişlerdir. Yapılan çalışma kapsamında gerçek modelin %33,33 oranında ölçekli modeli benimsenmiştir. Tasarımda güçlü kolon- zayıf kiriş gereksinimleri göz önünde bulundurulmuştur. Beton sınıfı 22.88 MPa olarak tespit edilmiştir. Oluşturulan bilgisayar modeli baz alınarak bulunan analitik sonuçlar, daha önceki çalışmalarda yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. PCS kolon- kiriş birleşim noktası katı eleman modeli ve fiber kiriş eleman modeli kullanılarak modellenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda fiber kiriş eleman modelinden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla daha yakın çıkmıştır. Ayrıca genel olarak PCS donatılı birleşim noktalarının sismik performansının geleneksel donatılı birleşim noktalarından daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Özet olarak PCS donatılı betonarme elemanlarla ilgili yapılan çalışmalar, PCS donatılı elemanların yükler altındaki performanslarının eş değer donatı alanına sahip geleneksel donatılı kontrol numunelerine kıyasla daha iyi olduklarını ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmalarda aksenal yük altında çeşitli kesitlerde PCS donatılı kolonların kapasite ve deformasyon kabiliyetlerinin geleneksel donatılı eşdeğerlerine göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak kafes sistemin monolitik yapısı işaret edilmiştir. Monolitik kafes çeliğin burkulmasını engellemiş, bu durum beton üzerinde sargı etkisini arttırmış, sonuç olarak kolonların kapasite ve deformasyon kabiliyetleri artmıştır. Kirişler üzerine yapılan çalışmada PCS donatılı kirişlerin eğilme performanslarının geleneksel donatılı eşdeğerlerine göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda PCS donatısının monolitik yapısından dolayı çatlak oluşumu daha geç başlamış bu da eğilme yüklerin altında kirişin deformasyon kapasitesini arttırmıştır. Sonlu eleman yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Ayrıca PCS donatılı yapı elemanların

ekonomik yeterliliği ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada PCS donatısı kullanılması dikkate değer bir zaman ve maliyet tasarrufu sağladığı belirtilmiştir.

Yapılan literatür çalışması neticesinde diğer sistemlere kıyasla, PCS donatılı betonarme sistemler ile ilgili yapılan çalışmaların oldukça sınırlı sayıda kaldığı görülmüştür. Özellikle PCS donatılı kirişler ile ilgili yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bu değerlendirmeler işığında bu çalışmada PCS donatılı dikdörtgen ve T kesitli kirişlerin eğilme performanslarının incelenmesine karar verilmiştir. Çalışmada değerlik kesitler, farklı donatı oranları, değerlik tipte beton tipleri, farklı beton sınıfları gibi parametrelerin eğilme performansına etkisi deneysel olarak araştırılmış, analitik modellemelerle deneysel sonuçlar doğrulanmıştır.



3.MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada PCS donatılı dikdörtgen ve T kesite sahip betonarme kirişlerle aynı eşdeğer donatı alanına ve ölçülere sahip geleneksel donatılı betonarme kirişlerin eğilme performansları karşılaştırılmıştır. Dikdörtgen kesitli numunelerde kendinden yerleşen beton ve hafif beton, T kesitli numunelerde ise sadece kendinden yerleşen beton kullanılmıştır. Bu kapsamda çalışma 2 etapta gerçekleşmiş olup PCS donatılı dikdörtgen kesitli numuneler, geleneksel donatılı dikdörtgen kesitli kontrol gruplarıyla, PCS donatılı T kesitli numuneler, geleneksel donatılı T kesitli kontrol gruplarıyla karşılaştırılmışlardır. Numuneler kendi aralarında gruplandırılırken eşdeğer donatı alanı parametresi baz alınmış, eşdeğer donatı alanı aynı olan numuneler aynı grupta olup birbirleriyle kıyaslanmışlardır.

3.1 Materyal

3.1.1. PCS ve geleneksel donatılı numuneleri oluşturan malzemeler ve özellikleri

3.1.1.1. Kendinden yerleşen beton

Yapılan pilot çalışmalarda normal betonun PCS donatılı kalıba yerleşiminde sıkıntılar görülmüş, yer yer kalıp içerisinde boşlukların oluşabileceği değerlendirilmiştir. Bu sebeple çalışmada PCS donatılı kiriş numunelerine betonun tam ve kolay yerleşiminin sağlanabilmesi için kendinden yerleşen beton kullanılması kararlaştırılmıştır. Beton karışımında bağlayıcı olarak CEM I 42.R Portland çimentosu kullanılmış, kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de belirtilmiştir. ASTM C 618-3 standardına göre F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Buna göre kullanılan küldeki SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşiklerinin toplamı %70’den fazladır. Kaba agregası olarak maksimum tane çapı 10 mm, ince agregası olarak maksimum tane çapı 5 mm olan dere agregası kullanılmıştır. Kullanılacak agregalar beton dökümünden önce tamamen kurutulmuştur. Karışımında ayrıca gerekli işlenebilirliğin sağlanabilmesi için Glenium 51 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Beton karışımı 250 dm³ hacme sahip beton karıştırıcısında hazırlanmıştır. Karışım hazırlanırken tüm gruplarda beton basınç dayanımının hassasiyetinin korunabilmesi amacıyla aynı yöntem izlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Beton karışımının hazırlanması

Yapılan pilot çalışmalarda beton bileşenlerinin tartımında yapılacak ufak hataların bile basınç dayanım değerlerini dikkate değer biçimde değiştirdiği görülmüştür. Ayrıca agreganın alındığı yerin (ocak, dere, vs.) ve nem oranının da betonun kıvamını ve basınç dayanımını ciddi oranda etkileyebildiği anlaşılmıştır. Dikdörtgen kesitli ve T kesitli numunelerde kullanılan beton karışım oranları Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3' te gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Kullanılan çimentonun kimyasal birleşimi

Bileşik	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
Oranlar (%)	20,70	5,41	3,24	62,56	1,60	2,99	0,16	0,71	0,009

Çizelge 3.2 Dikdörtgen kesitli numunelerde kullanılan kendiliğinden yerleşen beton karışım oranları

Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Kaba Agrega (kg/m ³)	İnce agrega (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Yoğunluk (kg/m ³)
321	285	756	814	199	3,10	2301

Çizelge 3.3 T kesitli numunelerde kullanılan kendiliğinden yerleşen beton karışım oranları

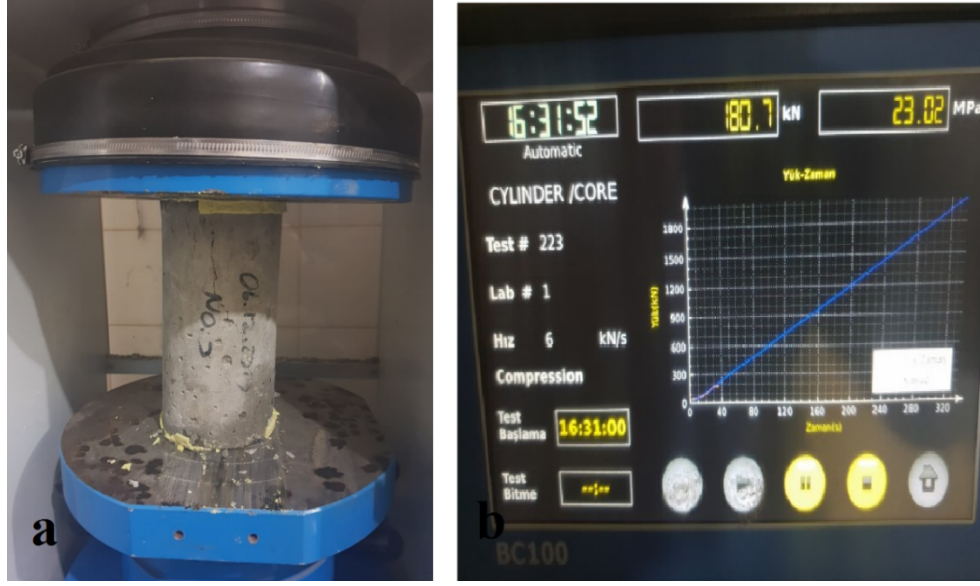
Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Kaba Agrega (kg/m ³)	İnce agrega (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Yoğunluk (kg/m ³)
383	222	756	814	199	3,10	2481

Dikdörtgen kesitli numunelerde hafif betonla karşılaştırma yapılabilmesi için betonun basınç dayanımının 25 MPa, T kesitli numunelerde ise 40 MPa olması hedeflenmiştir. Eğilme testine tabi tutulacak her kiriş grubu için 100x200mm ebatlarında 6 adet silindir beton numunesi alınmıştır. Numuneler 28 gün kür havuzunda bekletilmiş ardından alt ve üst yüzlerine kükürt başlık yapılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kükürt başlık yapılmış silindir numuneler a) Test öncesi b) Test sonrası

Hazırlanan numunelere ASTM 39/39M standartlarına uygun bir biçimde basınç dayanım testleri yapılmıştır. Basınç dayanım testleri 2000 KN kapasiteli standart preste, 530 kg/s yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 a) Beton basınç dayanım testi, b) Test sonuçları

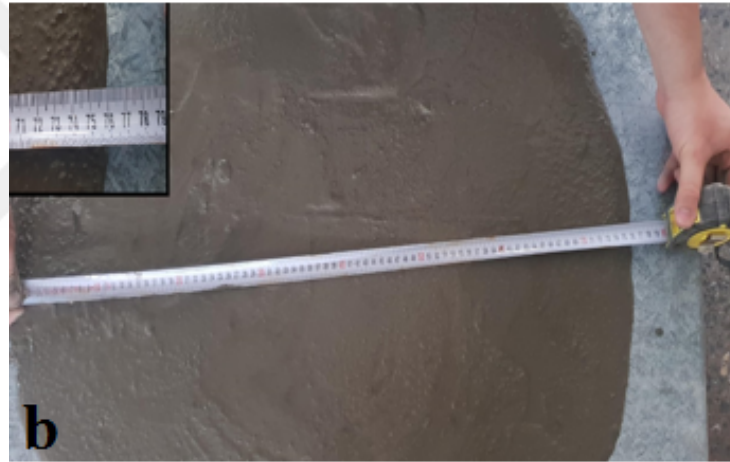
Kendinden yerleşen betonun işlenebilirlik özellikleri EFNARC komitesinin kararları doğrultusunda kontrol edilmiştir (EFNARC, 2005). Bu kapsamda çökme yayılma ve V hunisi testleri yapılmıştır. Çökme yayılma testi betonun akışkanlığı ve kıvamı (Şekil 3.4), V hunisi testi ise viskozitesi ve deforme edilebilirliğinin kontrolü için yapılan deneylerdir. Yapılan deneyler sonucunda hazırlanan beton karışımı EFNARC komitesinin tavsiyelerine uygun olup dikdörtgen kesitli numuneler için SF2, T kesitli numuneler için SF3 klasmanındadır. Çalışmada kullanılan betonların işlenebilirlik özellikleri Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Dikdörtgen kesitli numunelerde kullanılan betonun işlenebilirlik özellikleri

Test	Sonuçlar	İşlenebilirlik Sınıfları
Yayılma çapı (mm)	703	SF2 (650–750)
Yayılma zamanı (T50) (saniye)	1,80	VS1/VF1 (≤ 2)
V-hunisi akış zamanı (Vf) (saniye)	6	VS1/VF1 (≤ 8)

Çizelge 3.5 T kesitli numunelerde kullanılan betonun işlenebilirlik özellikleri

Test	Sonuçlar	İşlenebilirlik Sınıfları
Yayılma çapı (mm)	761	SF3 (760–850)
Yayılma zamanı (T50) (saniye)	1,82	VS1/VF1 (≤ 2)
V-hunisi akış zamanı (Vf) (saniye)	7	VS1/VF1 (≤ 8)



Şekil 3.4 Yayılma deneyleri a) Dikdörtgen kesitli numunelerde kullanılan beton
b) T kesitli numunelerde kullanılan beton

3.1.1.2. Hafif beton

Eğilme performansının ve kullanılabilirlik durumunun incelenmesi maksadı ile PCS donatılı dikdörtgen kesitli kiriş numunelerinde kendinden yerleşen betonun yanı sıra hafif beton da kullanılmıştır. Yapılan pilot çalışmalarda hafif betonun basınç dayanımının belli seviyelerin üzerine çıkartmakta birtakım zorluklarla karşılaşmıştır. Basınç dayanımını yükseltmek için yapılan operasyon genel olarak betonun yoğunluğunu arttırmaktadır. Bu sebeple hafif betonun hem yoğunluğun belirlenen sınırlar altında kalması, hem de basınç

dayanımının yapısal elemanlarda kullanılabilir değerlerde olması istenmiştir. Bu doğrultuda hafif betonun basınç dayanımının 25 MPa seviyelerinde olması hedeflenmiştir.

Hafif beton agregası olarak Kayseri bölgesinden temin edilen pomza taşı kullanılmıştır. Pomza taşının yoğunluğu $0,6 \text{ gr/cm}^3$ olup en büyük tane boyutu 10 mm olarak seçilmiştir. Kullanılan pomza taşının birim ağırlığı ve basınç dayanımının çok düşük olmasından dolayı hafif betonun basınç dayanımını arttırmak için silika füme kullanılmıştır. Silika füme, kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile tepkimeye girerek C-S-H jelinin oluşumuna katkı sağlar. Bu sayede betonun basınç dayanımı artar. Kullanılan silis dumanının kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

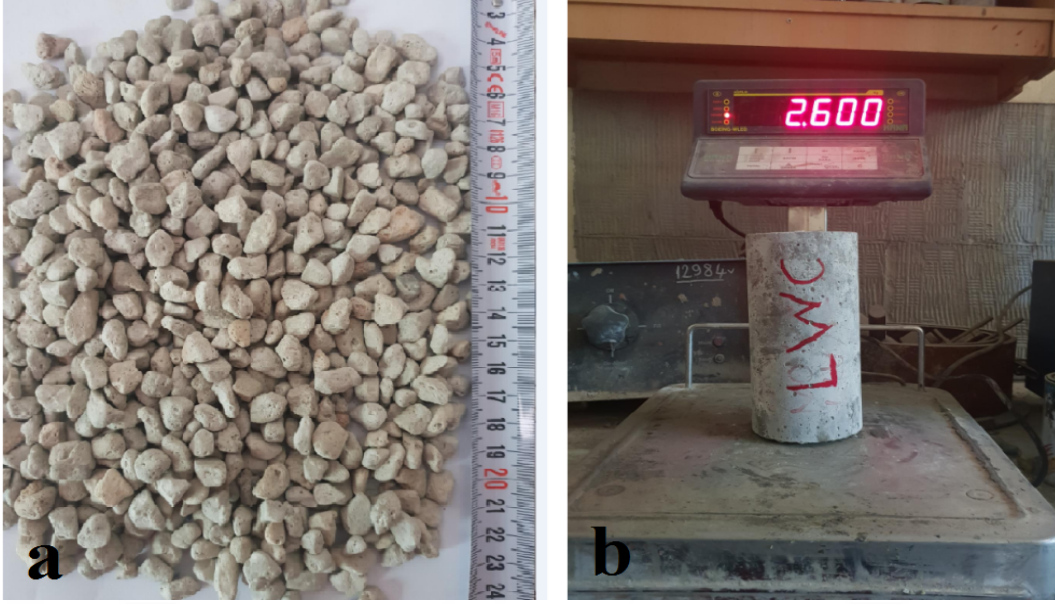
Çizelge 3.6 Hafif betonda kullanılan silika fümenin kimyasal birleşimi

Bileşik	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Oranlar (%)	96,40	0,86	0,74	0,45	0,65	0,11

Kendinden yerleşen betona sahip numunelerinde olduğu gibi hafif beton dökülen her kiriş grubu için 6 adet 100x200 mm ebatlarında silindir numune alınarak 28 gün kür edilmiştir. Kür edilen numunelerin yoğunlukları ASTM C567 standartlarına göre hesaplanmış ve 1657 kg/dm^3 olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.5). Sonrasında silindir numuneler ASTM 39/39M standartlarına uygun bir biçimde basınç testine tabi tutulmuş ve hedeflenen basınç dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Özellikle hafif betonda istenilen basınç dayanımının sağlanabilmesi için kiriş numunelerinin dökümünden önce defalarca farklı reçeteler denenmiştir. Hedeflenen basınç dayanımı Çizelge 3.7'de verilen karışım oranlarının kullanılması neticesinde sağlanmıştır.

Çizelge 3.7 Hafif beton karışım oranları

Çimento (kg/m ³)	Silika Füme (kg/m ³)	Pomza agregası (kg/m ³)	İnce kum (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Yoğunluk (kg/m ³)
822	159	319	720	296	11,42	1657



Şekil 3.5 a) Pomza taşı b) 100x200 mm ebatlarındaki hafif beton numunesi ağırlığı

3.1.1.3. Prefabrik ve geleneksel donatı

Prefabrik donatı olarak çelik sac yerine kutu profil kullanılması tercih edilmiştir. Bu sayede hem çelik sacın bükülüp kaynaklanması sırasında prefabrik donatıda oluşması muhtemel zafiyetlerin önüne geçilmesi hem de imalat süresinin kısaltılması hedeflenmiştir. Çalışmada S235JR tipi çelik profil kullanılmıştır. Geleneksel donatı olarak ise B420C nervürlü inşaat çeliği kullanılmıştır. Kullanılacak çelikler ASTM E8 ve ASTM A370 standartlarına uygun biçimde çekme testine tabi tutulmuştur. Kutu profilden çekme numuneleri lazer kesim metodu ile alınmıştır (Şekil 3.6). Şekil 3.7’de kupon numunelere uygulanan çekme testi gösterilmiştir. Çekme testleri sonucunda belirlenen akma ve kopma değerleri, malzemenin temin edildiği firmanın garanti ettiği çelik sınıflarını doğrulamaktadır (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9) Çizelge 3.8’de çekme deneyi sonucu elde edilen değerler gösterilmiştir. Ayrıca prefabrik donatının imalatında kullanılan çelik kutu profilin, ASTM E350-12 standartlarına uygun bir biçimde yapılan kimyasal analizinin sonuçları Çizelge 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.6 Lazer kesim metodu ile kupon numune alınan kutu profil



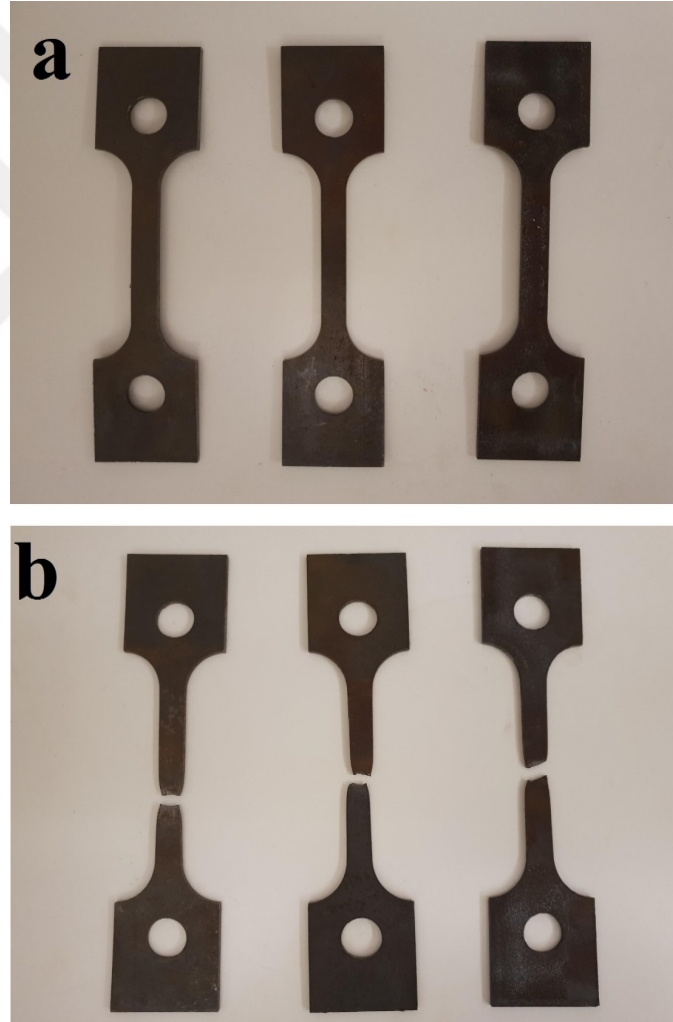
Şekil 3.7 Kupon numunelere uygulanan çekme deneyi

Çizelge 3.8 Kullanılan kutu profil ve geleneksel donatının fiziksel özellikleri

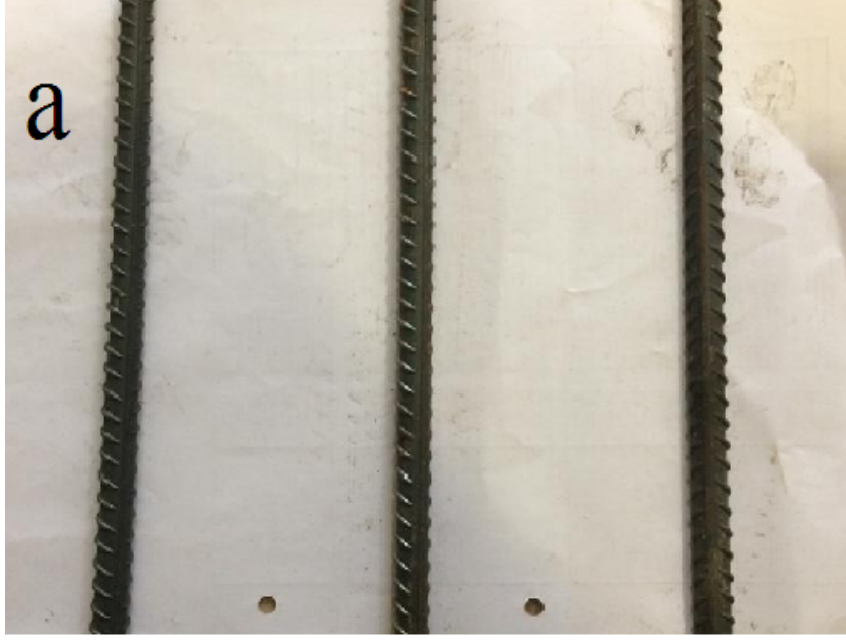
Çelik Tipi	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (MPa)
S235JR	328	459	2×10^5
B420C	439	508	2×10^5

Çizelge 3.9 Kullanılan çelik profilin kimyasal analizi

Element	C	SI	MN	P	S	CU	CR	NI	FE	AL	CEIIW	CEPCM
Oranlar	0,096	0,0078	0,502	0,0126	0,0086	0,036	0,0227	0,0177	99,22	0,044	0,188	0,125



Şekil 3.8 Çekme testinde kullanılan kutu profil numuneleri a) Numunelerin çekme testinden önceki durumları b) Numunelerin çekme testinden sonraki durumları



Şekil 3.9 Çekme testinde kullanılan inşaat çelik numuneleri a) Numunelerin çekme testinden önceki durumları b) Numunelerin çekme testinden sonraki durumları

3.1.1.4. Deneyde kullanılacak kiriş numunelerinin hazırlanması

Kalıp imalatı

Kiriş numunelerinin kalıpları için ahşap malzeme kullanılmıştır. Pilot çalışmalarda sabit kanatlı veya menteşe kanatlı kalıplardan betonun çok zor çıktığı, çıkartılabile bile numunede kırıklara neden olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple kalıpların her iki kanadı da sökülüp takılabilir bir şekilde imal edilmiştir. Şekil 3.10'da görüleceği gibi kalıbın yan

kanatları sökülebilir 5 mm kalınlığında L şeklinde kalın çelik profiller vasıtasıyla sabit alt ahşap platforma bağlanmıştır. Betonun rahat çıkartılabilmesi için beton dökümünden önce kalıbın kanatları ve alt kısmı kalıp yağı ile yağlanmıştır.



Köşebent imalatı



İmalatı tamamlanan köşebent

Şekil 3.10 Kalıplar için sökülebilir çelik köşebent imalatı

Yapılacak çalışmada T ve dikdörtgen kesitli iki farklı kiriş tipinin eğilme performansı inceleneceğinden dikdörtgen ve T olmak üzere 2 farklı kalıp tipi imal edilmiştir. Aynı grupta olan numunelerin beton dayanımlarında ve dökümlerinde bir farklılık olmaması için betonları aynı anda dökülmüştür. Bu sebeple her kalıptan 2 adet yapılmıştır. Yapılacak çalışmada tek tip dikdörtgen kesit olduğu için 2 adet dikdörtgen kalıp, 2 farklı T kesit olduğu için 4 adet T kalıp hazırlanmıştır. Kalıpların birden çok kullanılacağı düşünülerek su alma ihtimali olan yerlere (bilhassa yan kanatların üst yüzlerine) ahşap verniği sürülmüştür. Tamamlanmış kalıp örnekleri Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Dikdörtgen kalıp



T kalıp

Şekil 3.11 Dikdörtgen ve T kalıp örnekleri

PCS ve geleneksel donatı imalatı

Çalışmada kullanılacak PCS donatısı S235JR tipi kutu profillerin bilgisayar kontrollü lazer sistemi ile kesilerek kesilmesi suretiyle hazırlanmıştır. Önceki çalışmaların aksine çelik sac kullanılmamasının sebebi, çelik sacın kesildikten sonra bükülüp kaynaklanması sonucu büküm ve kaynak yerlerinde zafiyet oluşma ihtimalidir. Ayrıca kutu profil kullanımının PCS donatısının imalatını kolaylaştırdığı da açıktır. Çeliği kesmek için birçok yöntem mevcuttur. En bilinenleri olarak lazer kesim, plazma kesim, alevli kesim, frezeleme, aşındırıcı jetle kesim, elektrokimyasal kesim gibi yöntemler sayılabilir. Her birinin hassasiyet ve maliyet açısından belirli farklılıkları mevcuttur. Bu yöntemlerden maliyeti yüksek olmakla beraber en hassas olan yöntem lazer kesim yöntemidir. Bu sebeplerden dolayı kesim yöntemi olarak lazer kesim yöntemi tercih edilmiştir.

Yapılan çalışmada eşdeğer donatı alanları ve kesitleri aynı olan kiriş numunelerinin eğilme performansları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu sebeple kutu profildeki enine ve boyuna kafes aralıkları geleneksel donatılı kontrol numunesiyle aynı eşdeğer donatı alanına sahip olacak şekilde kesilmiştir. Bu noktada kutu profilin her yüzü için ayrı bir kesim yapılmıştır. Enine donatı görevi gören enine şeritlerin birbirini tam olarak takip etmesi için bir yüzün kesimi bittikten sonra herhangi bir kayma olmadan öbür yüzünün tam 90°'lik

açıyla döndürülmesine azami gayret gösterilmiştir. Kullanılan profillerde kenar köşelerde (sharp notch) gerilme yoğunlaşmaları oluşmaması için minimal bir yarıçap mevcuttur. Kullanılan lazer kesim makinası 3,00x1.50m T ve 4,4 KW maksimum kesme gücüne sahiptir. Lazer kesim makinası ve lazer kesim işlemi ile prefabrik donatı imalatı şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Kutu profillerin lazer kesimi



PCS

Şekil 3.12 PCS donatının imalatı

Çalışmada kontrol grubu olarak kullanılacak geleneksel donatılı numuneler B420C inşaat çeliğinin farklı çaplardaki ebatları kullanılmak suretiyle hazırlanmıştır. Bu noktada boyuna donatılar birbirlerine etriye ile bağlanmıştır. Etriyeler montaj ve esas donatılara 1,00 mm kalınlığındaki inşaat telleri ile bağlanmışlardır. Geleneksel donatı imalatı Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Geleneksel donatı imalatı

3.2. Yöntem

Yapılacak çalışmada PCS donatısının, kirişlerin eğilme performanslarına etkileri araştırılmıştır. Eşdeğer donatı alanlarına sahip PCS ve geleneksel donatılı dikdörtgen ve T kesitli kirişlerin eğilme performansları karşılaştırılacaktır. Bu kapsamda ilk aşamada dikdörtgen kesitli numunelerin, ikinci aşamada ise T kesitli numunelerin eğilme performansları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

İlk aşamada PCS donatılı dikdörtgen kesitli kirişlerin eğilme performansının incelenmesi amacıyla 6 farklı grupta 18 numune hazırlanmıştır. Grupların her birinde kendinden yerleşen betona sahip geleneksel donatılı (CONTROL), kendinden yerleşen betona sahip PCS donatılı (SCCPCS) ve hafif betona sahip PCS donatılı (LWPCS) kiriş bulunmaktadır. Eğilme performanslarının mukayese edilebilmesi için test gruplandırmaları, aynı grupta olan numunelerin nominal akma dayanımları ile donatı alanlarının çarpımlarının ($A_s f_y$) birbirlerine eşit olacak şekilde yapılmıştır. Böylece aynı eşdeğer donatı alanına sahip kirişlerin eğilme performansları karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. PCS ve geleneksel eşdeğer donatılı kirişlerin bir örneği Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Ayrıca her grupta yaklaşık olarak aynı basınç dayanımına (f_{ck}) sahip beton kullanılmış, hedeflenen 25 MPa basınç dayanımına çok yakın dayanımlar elde edilmiştir. Grupları birbirinden ayıran en önemli parametre çekme (A_{st}) ve basınç donatısı (A_{sc}) alanlarındaki farklılıklardır. Her grup farklı eşdeğer donatı alanına sahiptir. Tüm dikdörtgen kesitli prefabrik donatıya sahip kirişlerde 80x160x3mm ebatlarında S235JR kutu profil kullanılmıştır. Bu aşamada dökülen tüm kirişlerin boyutları birbirleri ile aynıdır. Dikdörtgen kesitli numuneler için deneyde kullanılan numunelerin grup isimleri, basınç dayanımları, donatı alanları ve donatı oranları özet olarak Çizelge 3.10’da verilmiştir.

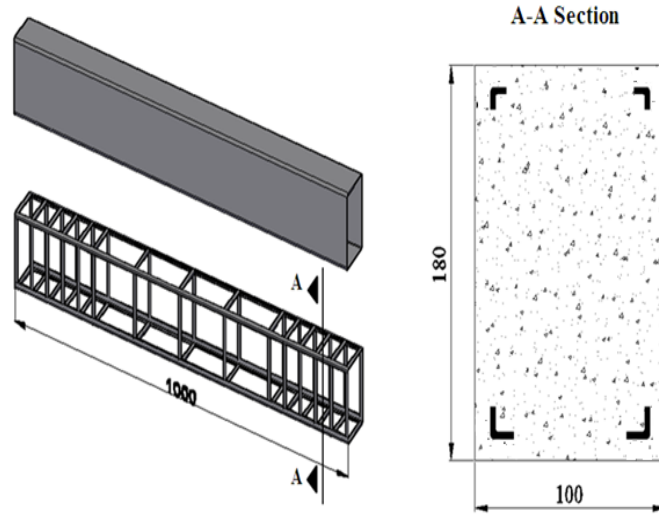


Şekil 3.14 Eşdeğer donatı alanına sahip geleneksel ve PCS donatı sistemleri

Kendinden yerleşen betona sahip dikdörtgen kesitli numunelerin (CONTROL ve SCCPCS) beton dökümleri basınç dayanımlarında bir farklılık görülmemesi için aynı gün yapılmıştır. LWPCS donatılı numunelerin beton dökümleri ise farklı reçeteye sahip olduklarından dolayı 1 gün sonra dökülmüşlerdir. Paspayı 1 cm olarak belirlemiş, kalıplar buna uygun olarak hazırlanmış ve Şekil 3.15’de de görüleceği gibi donatı buna uygun bir biçimde kalıp içine yerleştirilmiştir. Şekil 3.16’da dikdörtgen kesitli numunelerde kullanılan prefabrik donatının kesimden önceki ve sonraki 3 boyutlu hali ile betonarme kirişin kesit görüntüsü gösterilmiştir.



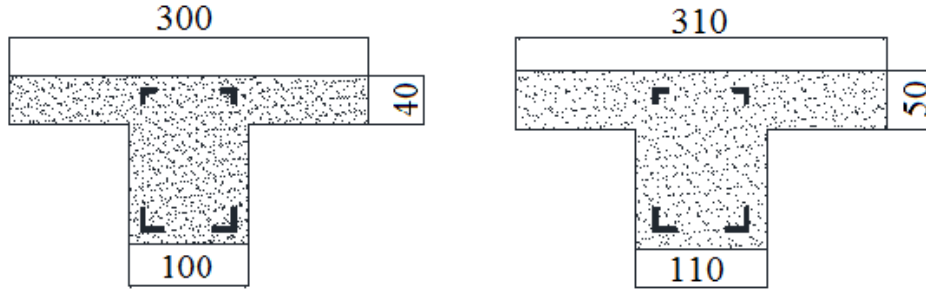
Şekil 3.15 Kalıp içerisinde prefabrik donatı



Şekil 3.16 Prefabrik donatının 3 boyutlu görüntüsü ve kesit görüntüsü

Çizelge 3.10 Deneysel çalışmada kullanılan dikdörtgen kesitli numunelerin özellikleri

Grup No	Kiriş Kodu	F_{ck} (MPa)	A_{st} (mm ²)	A_{sc} (mm ²)	Çekme donatısı oranı (ρ_t)	Basınç donatısı oranı (ρ_c)
NO1	CONTROL	25,55	56,54	56,54	0,003326	0,003326
	SCCPCS		101,05	101,05	0,005944	0,005944
	LWPCS	24,88	101,05	101,05	0,005944	0,005944
NO2	CONTROL	25,42	100,53	100,53	0,005914	0,005914
	SCCPCS		179,67	179,67	0,010569	0,010569
	LWPCS	25,13	179,67	179,67	0,010569	0,010569
NO3	CONTROL	25,01	100,53	39,27	0,005914	0,002310
	SCCPCS		179,67	70,18	0,010569	0,004128
	LWPCS	23,26	179,67	70,18	0,010569	0,004128
NO4	CONTROL	25,33	157,07	39,27	0,009239	0,002310
	SCCPCS		280,72	70,18	0,016513	0,004128
	LWPCS	24,95	280,72	70,18	0,016513	0,004128
NO5	CONTROL	25,05	100,53	56,54	0,005914	0,003326
	SCCPCS		179,67	101,05	0,010569	0,005944
	LWPCS	24,34	179,67	101,05	0,010569	0,005944
NO6	CONTROL	25,01	157,07	56,54	0,009239	0,003326
	SCCPCS		280,72	101,05	0,016513	0,005944
	LWPCS	24,34	280,72	101,05	0,016513	0,005944



Şekil 3.17 T kiriş numunelerine ait kesit ölçüleri

2.aşamada ise T kesite sahip PCS ve geleneksel donatı kirişlerin eğilme performansları incelenmiştir. Bu aşamada beton tipinin etkisi araştırılmamış beton tipi olarak sadece kendinden yerleşen beton kullanılmıştır. İlk aşamanın aksine T kesitlerle ilgili yapılan çalışmada 2 farklı kesit teste tabii tutulmuş, kesit boyutlarının eğilme performanslarına etkisi de araştırılmıştır. T numunelere ait kesit ölçüleri Şekil 3.17'de gösterilmiştir. PCS donatılı kirişlerde 80x120x4mm ebatlarında, S235 JR tipi kutu profil kullanılmıştır. Geleneksel donatı olarak B420C nervürlü inşaat çeliği kullanılmıştır. Bu kapsamda 3 farklı grupta değerlendirilmek üzere 12 adet T kiriş numunesi dökülmüştür.

Dikdörtgen kesitli çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da aynı eşdeğer donatı alanına sahip kirişler aynı grupta yer almıştır. Gruplar birbirlerinden eşdeğer donatı alanlarının farklılıklarına göre ayrılmışlardır. Tüm numunelerde 40 MPa beton basınç dayanımı hedeflenmiş ve bu dayanıma çok yakın dayanımlar elde edilmiştir. Aynı ölçülere sahip kendinden yerleşen betona sahip T kesitli geleneksel (TCON) ve PCS donatılı (TPCS) numunelerin aynı anda dökümleri yapılarak beton basınç dayanımlarının aynı olması sağlanmıştır. Gruplarda yer alan farklı kesitteki numuneler tabla kalınlıklarına göre isimlendirilmiştir. 4 cm tabla kalınlığına sahip kontrol numuneleri TCON-4, PCS donatılı numuneler TPCS-4, 5 cm tabla kalınlığına sahip kontrol numuneleri TCON-5, PCS donatılı numuneler ise TPCS-5 olarak isimlendirilmiştir. Paspayları kesit ölçülerine göre 1 ve 1,5 cm olarak belirlenmiş ve donatı sistemi buna uygun şekilde kalıp içine yerleştirilmiştir. Tüm numuneler için E ifadesi deneysel sonuçları, N ifadesi sonlu eleman analizi sonuçları ifade etmektedir. T kesitli numuneler için deneyde kullanılan numunelerin grup isimleri, basınç dayanımları, donatı alanları ve donatı oranları özet olarak Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11 Deneysel çalışmada kullanılan T kesitli numunelerin özellikleri

Grup No	Kiriş Kodu	F_{ck} (MPa)	A_{st} (mm ²)	A_{sc} (mm ²)	Çekme donatısı oranı (ρ_t)	Basınç donatısı oranı (ρ_c)
NO1	TCON-4	41,07	100,53	100,53	0,007733	0,007733
	TPCS-4		179,67	179,67	0,013820	0,013820
	TCON-5		100,53	100,53	0,006527	0,006527
	TPCS-5		179,67	179,67	0,011666	0,011666
NO2	TCON-4	41,34	157,07	100,53	0,012082	0,007733
	TPCS-4		280,72	179,67	0,021593	0,013820
	TCON-5		157,07	100,53	0,010199	0,006527
	TPCS-5		280,72	179,67	0,018228	0,011666
NO3	TCON-4	40,53	226,19	100,53	0,017399	0,007733
	TPCS-4		404,24	179,67	0,031095	0,013820
	TCON-5		226,19	100,53	0,014687	0,006527
	TPCS-5		404,24	179,67	0,026249	0,011666

Her iki aşamada da beton dökümüne azami özen gösterilmiştir. Beton kalıbın içine kademeler halinde dökülmüş, içerisinde hava boşluğu kalmaması için döküm sürecince şişleme uygulaması yapılmıştır. Aynı zamanda betonun kalıba tam oturabilmesi için kalıbın kenarlarına plastik tokmak vasıtasıyla hafif hafif vurulmuştur. Şekil 3.18’de görüleceği gibi beton dökümlerinden sonra kirişin üst yüzü düzgün bir şekilde perdahlanmış, kalıbın kenarları mengenelerle sıkıştırılarak ölçünün bozulması engellenmiştir. Yapılan pilot çalışmalarda kalıp sökülmesinin 1 günde yapılması durumunda numunenin kenarlarının kırıldığı, 3.günde yapılması durumunda ise kalıptan çıkartma noktasında büyük zorluk çekildiği görülmüştür. Bu sebepten ötürü kiriş numuneleri 2 gün sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Çıkarılan kiriş numuneleri üzerine çekme donatısının yeri, döküm tarihi ve grup numarası yazılmış, deney sırasında herhangi bir karışıklığın önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Etiketlenen kiriş numuneleri basınç dayanımının ölçülmesi amacıyla alınan silindir numunelere birlikte 28 gün kür edilmek üzere kür havuzuna bırakılmışlardır. Kür sonrasında tüm numuneler havuzlardan çıkartılarak deney öncesi kurumak için 1 gün bekletilmiştir. Havuzdan çıkarılan T kesitli kiriş örnekleri Şekil 3.19’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Kalıptaki taze dökülmüş beton

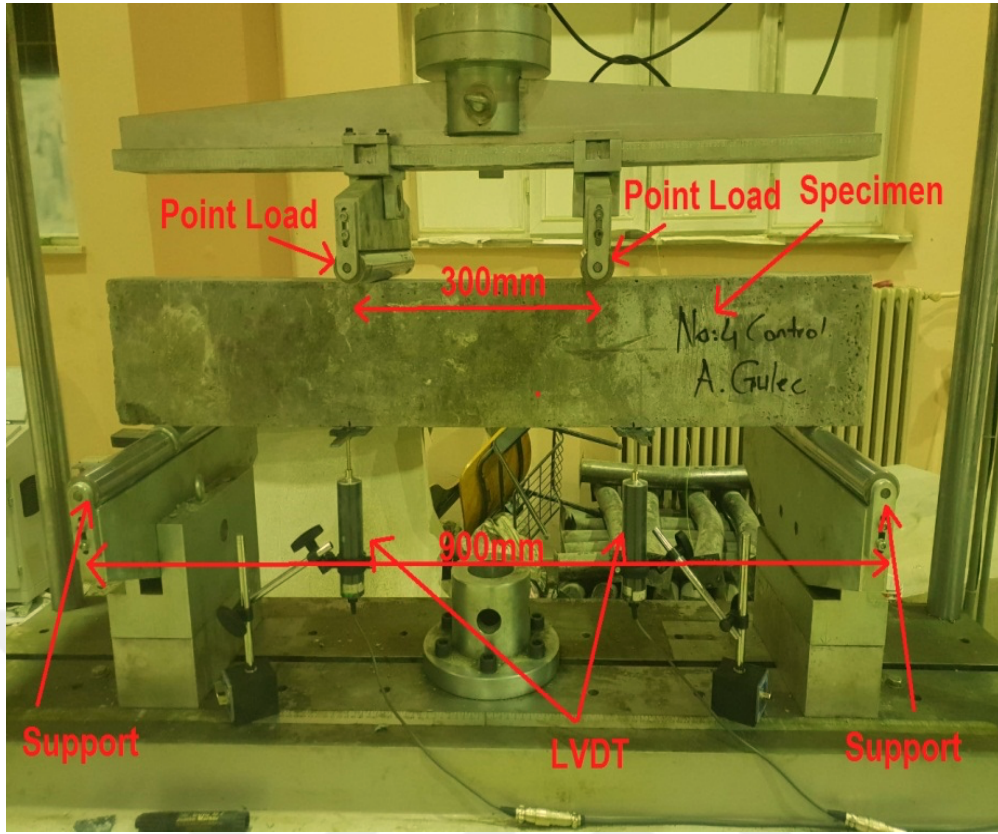


Şekil 3.19 Kalıptan çıkarılmış T kesitli numuneler

3.2.1. Deneysel çalışma

28 günlük kür süresinin sonunda numunelerin, eğilme performansları araştırılmıştır. Eğilme performansının değerlendirilmesi için uygun olan 2 tip eğilme testi vardır. Bunlar 3 noktalı eğilme testi ile 4 noktalı eğilme testleridir. Eğilme deneyi sonucunda numunelerin eğilme yükleri altında maksimum taşıyabileceği yükler ve yer değiştirme yapabilmeleri araştırılmıştır. Bu noktada yük-yer değiştirme grafikleri ve artan yükler altında yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu çalışmada numunelerin eğilme performanslarının incelenmesi için 4 noktalı eğilme deneyi uygulanmasına karar verilmiştir. 4 noktalı eğilme deneyinde test edilecek numuneye 4 noktadan temas sağlanır. Bu temas noktalarından ikisi mesnet noktaları, diğer ikisi de yükün numuneye uygulandığı noktalardır. Kuvvetler kesite dik olarak etkilenir ve bunun sonucunda numunede aksiyel gerilmeler oluşur. Aksiyel gerilmeler normal kuvvete ve eğilme momentine neden olur. 4 noktalı eğilme testi yapılmasının en önemli nedenlerinden biri bu deneyde uygulanan yük noktaları arasında momentin sabit olması ve kesme kuvvetinin oluşmamasıdır. Bu sayede 3 noktalı eğilme

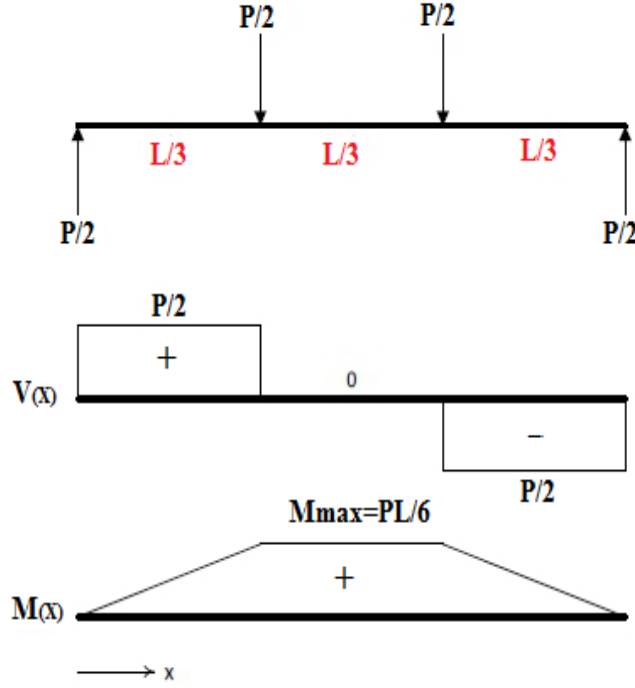
deneyinin aksine yük sadece tek bir noktaya (yükün uygulandığı nokta) değil nispeten geniş bir alana etki eder. Bu durum numunenin eğilme yükleri altındaki davranışının anlaşılması kolaylaştırır. Gerilmenin daha geniş bir alana yayılması eğilme yükleri altında numunede oluşan çatlakların da daha net bir biçimde incelenmesine olanak sağlar. 4 noktalı eğilme deneyi kuvvet kontrollü ve yer değiştirme kontrollü olarak yapılabilmektedir. Bu araştırmada yer değiştirme kontrollü deney yapılmıştır. Yer değiştirme kontrollü deney, maksimum yükleme sonrasında deneyi devamına izin vererek eğilme altında maksimum yük sonrası kırış davranışının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamıştır. (Chen ve ark., 2016). Eğilme testi 500 kN kapasiteli test makinasında gerçekleştirilmiştir. Çatlak oluşumunun rahat gözlemlenebilmesi yükleme hızının 0.5 mm/dk olmasına karar verilmiştir. Numune test sırasında herhangi bir kayma yaşanmaması için mesnetlerden 50'şer mm dışarda olacak şekilde dikkatlice yerleştirilip, hizalanmıştır. Eğilme davranışını tam olarak anlamak ve yer değiştirme eğrisini çizebilmek için Doğrusal değişen fark transformatörleri (Linear Variable Displacement Transducers (LVDT)) kullanılmıştır. Bu tip transformatörlerin çalışma prensibi, mekanik bir hareketi veya titreşimi elektrik sinyallerine veya elektrik akımına dönüştürmektir. Bu şekilde yük altına transformatörler sayesinde hassas bir biçimde yer değiştirme ölçümü yapılabilmektedir. Transformatörler kırış numunesinin orta noktasında 250 mm sağa ve sola yerleştirilmiştir. Yük, numunelere uç desteklerden etkili açıklığın üçte biri mesafesinde etkiyecek şekilde ayarlanmıştır. Bu şekilde kesme etkisi olmaksızın 300 mm uzunluğunda saf bir eğilme bölgesi oluşturulmuştur. İlk çatlak oluşumundan kırılma anına kadar çatlakların gelişimi ve yayılımı gözlemlenmiştir. Çatlak kontrolü performansa dayalı tasarım için oldukça önemlidir. Çatlak oluşumu ve genişliği yapıların, yükler altında güvenliği ve dayanıklılığı gibi parametreleri etkilemesinin yanı sıra yanı sıra kullanılabilirlik durumlarını da etkiler (Zakaria ve ark., 2009). Bu çalışmada çatlakların hangi yük seviyelerinde gerçekleştiği, kırışlerin göçme mekanizmaları, kırışin taşıyabildiği maksimum yükler ve daha sonrasındaki kırılma yükleri tespit edilip, kayıt edilmiştir. Eğilme testi sırasında çekme ve basınç donatılarında oluşan deformasyonlar gözlemlenmiştir. Eğilme deneyi için hazırlanan test düzeneği Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 4 noktalı eğilme deney düzeneği

PCS donatılı numunelerle geleneksel donatılı numunelerin eğilme yükleri altındaki performanslarının karşılaştırılması için deneysel sonuçlar farklı açılardan tartışılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları, eğilme yükleri altında maksimum momentin tespiti, moment-yer değiştirme grafiklerinin analizi, yer değiştirme eğrilerinin çizilmesi ve düktilite oranlarının karşılaştırılması başlıkları altında tartışılmıştır.

Moment-yer değiştirme diyagramları, artan yükler altında kirişin orta noktasında oluşan yer değiştirmelere karşılık gelen moment değerlerinin çizildiği eğrilerden oluşturulmuştur. Maksimum moment değeri ise eğilme yükleri altında kirişin taşıyabileceği maksimum kuvvetin kesitte oluşturduğu moment değerinin bulunması ile belirlenmiştir. Yükleme sonrası kesitte oluşan maksimum moment ve kesit diyagramları Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Yer değiştirme eğrileri ise artan yükler altında belirli moment değerleri için transformatörlerden alınan yer değiştirme değerlerin birleştirilmesi sonucu oluşan eğrilerdir. Bu eğriler yükler altında kirişin yaptığı sehim miktarının matematisel olarak daha net anlaşılmasını sağlamıştır.

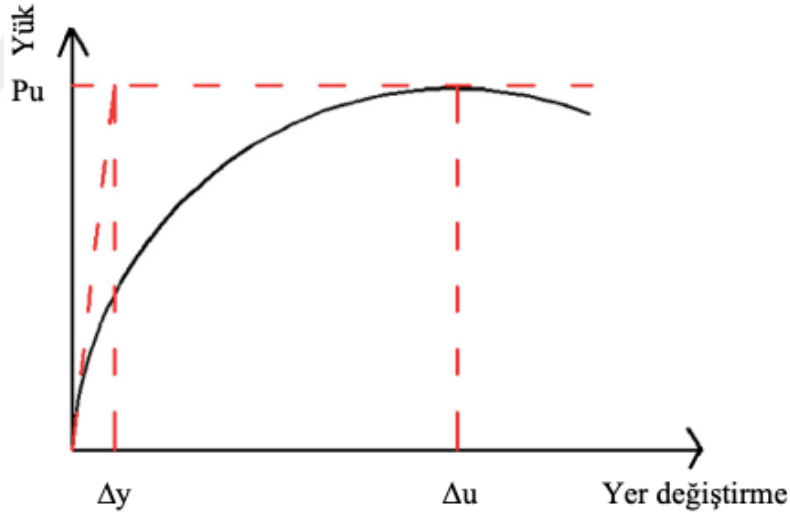


Şekil 3.21 Yüklemeden dolayı oluşan kesit diyagramları

Bu çalışmada PCS donatılı ve geleneksel donatılı kirişlerin eğilme yükleri altındaki performanslarının karşılaştırılmasında kullanılan diğer bir parametre ise duktilite oranıdır. Duktilite kavramı yapı elemanının yükler altında enerji yutma yeteneği olarak tanımlanabilir. Yapı elemanlarının duktilite durumları sistemin global süneklik durumuna doğrudan etki eder. Özellikle depreme dayanıklı yapı tasarımında duktilite oranları, yapı performansının değerlendirilmesinde önemli bir indeks olarak kabul edilir. Yapı elemanın duktilite oranı hesaplanırken çeşitli indekslerden faydalanılır. Bu hesaplamalar genel olarak yapı elemanının yükler altında eğilme dayanımında ciddi bir düşüş olmaksızın deformasyon yapabilme yeteneğini ölçer. Yüksek duktilite oranları yapı elemanın yükler altında geçmeden büyük deformasyon yapabildiğini gösterir. Sismik yapı tasarımda duktil yapı elemanlarının kullanılması büyük önem arz eder çünkü duktil yapı elemanları göçme anında yüksek deformasyonlar yaparak adeta göçmeyi önceden haber verir. Yapı elemanın duktilite oranının değerlendirilmesinde birçok farklı indeks mevcuttur. Bunlar yer değiştirme bazlı duktilite indeksi, eğrilik bazlı duktilite indeksi, rotasyon bazlı duktilite indeksi ve enerji bazlı duktilite indeksidir. Bu çalışmada yer değiştirme bazlı duktilite ve enerji bazlı duktilite indeksleri kullanılmıştır.

Yer değiştirme bazlı düktilite faktörün hesaplanmasında birçok yaklaşım mevcuttur. Bu çalışmada Park (1988) tarafından önerilen model kullanılacaktır. Buna göre; düktilite faktörü (μ), yapı elemanın eğilme yükleri altında maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirmenin (Δ_u), akma noktasına karşılık gelen yer değiştirmeye (Δ_y) oranı olarak tarif edilebilir (Denklem 3.1). Bu noktada, maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirme, Δ_u , kolaylıkla bulunabilmesine rağmen akma anındaki yer değiştirmenin bulunmasında zorluklar çıkabilmektedir. Akma dayanımının tespit edilmesinde de farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu çalışmada akma değeri olarak eşdeğer elasto-plastik akma noktası değeri kullanılacaktır. Eşdeğer elasto-plastik akma noktasına karşılık gelen yer değiştirme Δ_y , yük-yer değiştirme eğrisinin başlangıç ve maksimum noktalarına çizilen teğetlerin kesiştiği noktaya karşılık gelen yer değiştirmedir. Şekil 3.22’de yer değiştirme bazlı düktilite oranının tespitine ilişkin grafik gösterilmiştir.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3.1)$$



Şekil 3.22 Yer değiştirme bazlı düktilite oranı diyagramı (Park, 1988)

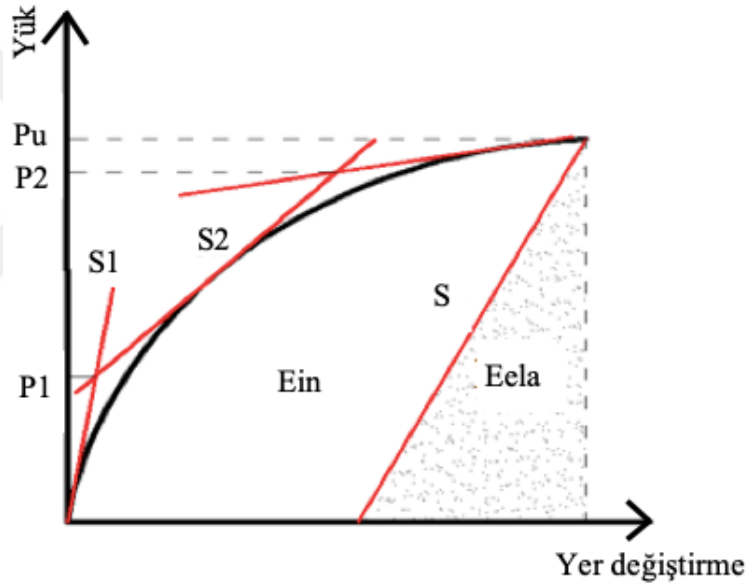
Düktilite oranının tespitinde kullanılan bir diğer metot Enerji bazlı düktilite faktörü metodudur. Bu çalışmada Dikdörtgen kesitli numuneler için Naaman ve Jeong (1995) tarafından önerilen yöntem kullanılacaktır (Şekil 3.23). Buna göre yük altında kırışte oluşan elastik olmayan enerjinin (E_{in}) elastik enerjiye (E_{ela}) oranı düktilite oranını verecektir (Denklem 3.2). Yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan toplam alan (E_{tot}) kolaylıkla bulunabilir. Bu noktada önemli olan nokta elastik ve elastik olmayan bölgenin

belirlenebilmesidir. (E_{ela}) kırılma anında yükün boşaltılması halinde diyagram altında oluşan üçgenin alanı olarak ifade edilir. Boşaltma eğrisi yük- yer değiştirme eğrisinin farklı kısımlarının ağırlıklandırılması sonucu tahmin edilir. Toplam alandan (E_{tot}), elastik alan (E_{ela}) çıkartılarak elastik olmayan (E_{in}) alan bulunur (Denklem 3.3). Elastik bölge ile elastik olmayan bölgeyi ayıran çizginin eğimi S , Denklem 3.4' te gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$\mu_{en} = \frac{E_{in}}{E_{tot}} \quad (3.2)$$

$$E_{in} = E_{tot} - E_{ela} \quad (3.3)$$

$$S = (P_1S_1 + (P_2 - P_1)S_2)/P_2 \quad (3.4)$$



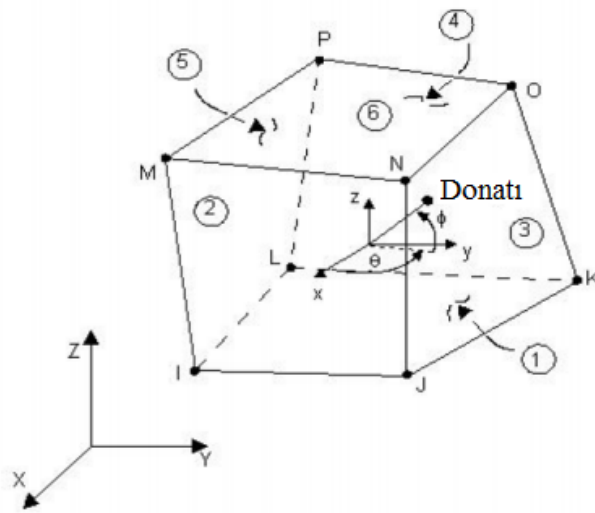
Şekil 3.23 Enerji bazlı süneklilik indeksini belirleyen grafik (Naaman ve Jeong, 1995).

T kesitli numunelerin eğilme yükleri altında enerji yutma kapasitelerini değerlendirilmesi ise yük-yer değiştirme eğrileri altında kalan toplam alanların oranlarının bulunması suretiyle yapılmıştır. Eğrinin altında kalan toplam alanlar, birbirini takip eden iki yer değiştirme noktası arasında kalan alanların toplamalarının bulunması suretiyle hesaplanmıştır (Mali ve Datta, 2020; Kumar ve ark.,2018).

Sonlu eleman modeli

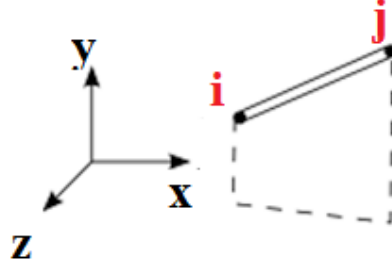
Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının doğruluğu teorik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Teorik analiz sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı

kullanılarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde fiziksel bir durum matematiksel denklemlere dönüştürülerek ifade edilir. Sonlu elemanlar yönteminde temel mantık sorunu basitleştirerek sonuca gitmektir. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda yükler altında sistem küçük parçalara bölünerek sayısal analiz yapılır. Sonlu elemanlar analizinde malzeme modelleri lineer olmayan davranış dikkate alınarak yapılmıştır. Simüle edilen sistemin davranışının doğruluğu, malzeme modellerinin özelliklerinin, deneyde kullanılan gerçek malzemelerin özelliklerine yakınlığıyla doğru orantılıdır. Beton modeli oluşturulurken 8 düğüm noktalı hexahedral (SOLID) katı elemanlar kullanılmıştır (Şekil 3.24). Bu elemanlar çekme bölgesinde çatlama, basınç bölgelerinde beton ezilmesi, plastik deformasyon ve sünme gibi özellikleri dikkate alan plastisite teorisi algoritmaları içermektedir. Katı eleman her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahiptir. Beton herhangi bir entegrasyon noktasında tek eksenli, çift eksenli veya üç eksenli basınç kuvveti altında geçerse beton bu noktadan ezilmiş kabul edilir. Ezilme betonun yapısal bütünlüğünün bozulması şeklinde tanımlanır.



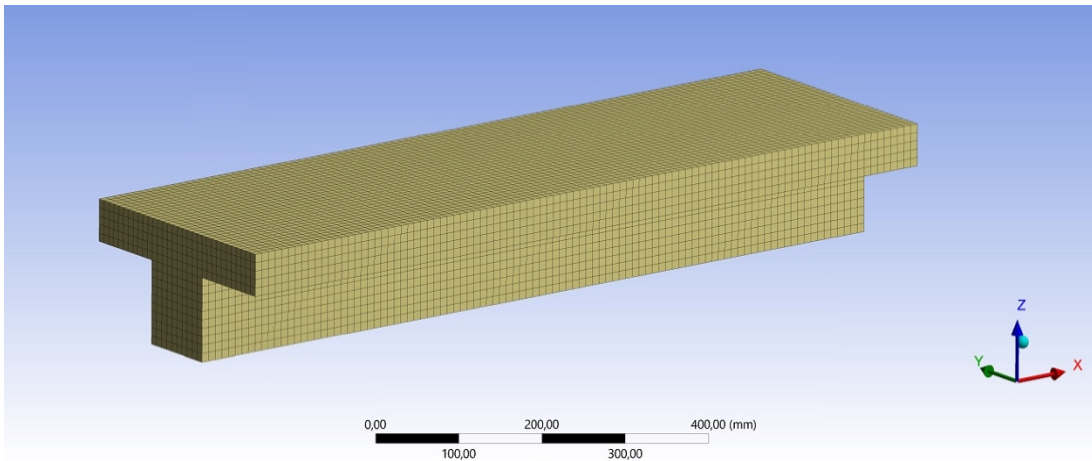
Şekil 3.24 SOLID eleman

Enine ve boyuna donatı modellemesinde elasto- plastik davranışa izin veren LINK ve Shell elemanlar kullanılmıştır. LINK elemanlar çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılan çubuk elemandır. LINK x, y ve z koordinat düğümünde 3 serbestlik derecesine sahip bir elemandır (Şekil 3.25). Bu eleman tek eksenli çekme ve basınç özelliğine sahiptir (Moulika ve ark.,2017).



Şekil 3.25 LINK elemanı

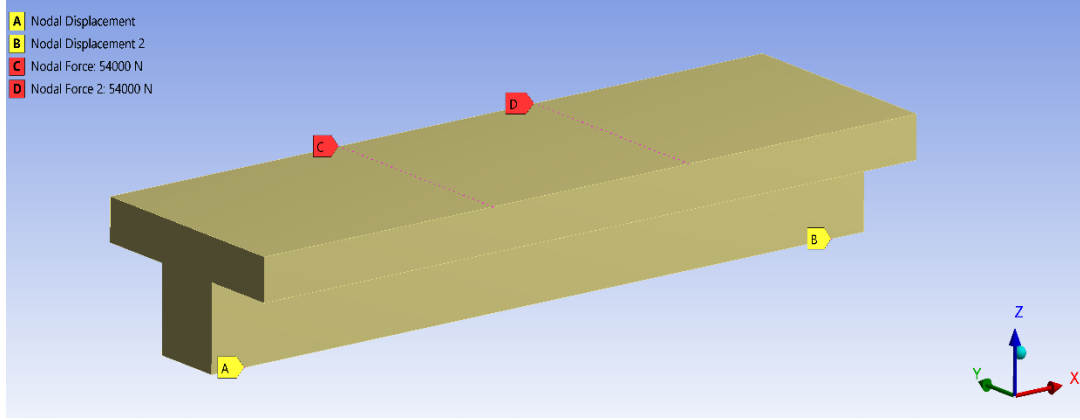
Beton modeli için SOLID, donatı modeli için LINK elemanların kullanıldığı benzer bir çalışmada teorik sonuçlarla deneysel sonuçların yakınlık gösterdiği, çatlak oluşumlarının da deneysel çalışma sonuçlarıyla benzer bir biçimde geliştiği değerlendirilmiştir (Suresh ve Kulkarni, 2016). Betonarme elemanların modellenmesinde sıklıkla ayırık eleman modellemesi yapılır (Rousseau ve ark.,2007). Yapılan sayısal modellemede çelik ve beton malzemeleri ayrı ayrı modellenmiş, sonrasında beton ve çelik arasında kontak bağlantı elemanları otomatik olarak oluşturularak sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Beton ve çelik arasında tam aderans olduğu kabulü yapılmıştır. Betonarme kirişin sayısal modellemesi deney düzeneğindeki mesnet ve yükleme şartları göz önüne alınarak yapılmıştır. Yapılan sayısal analizlerde sonlu eleman modelleri kurulurken modelin düzgün dikdörtgen parçalara ayrılıp modellenmesi gerekir. Şekil 3.26’da görüleceği üzere sayısal modeli hazırlanan kiriş 10x10x10 mm’ lik küplere (mesh) bölünmek suretiyle sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Mesh sayısının fazlalığı analiz süresini arttırmakla beraber sonuçlarının doğruluğunu arttırmaktadır. Seçilen mesh sayısı bu dengeyi gözeterek seçilmiştir.



Şekil 3.26 Sonlu elemanlara ayrılmış betonarme kiriş modeli

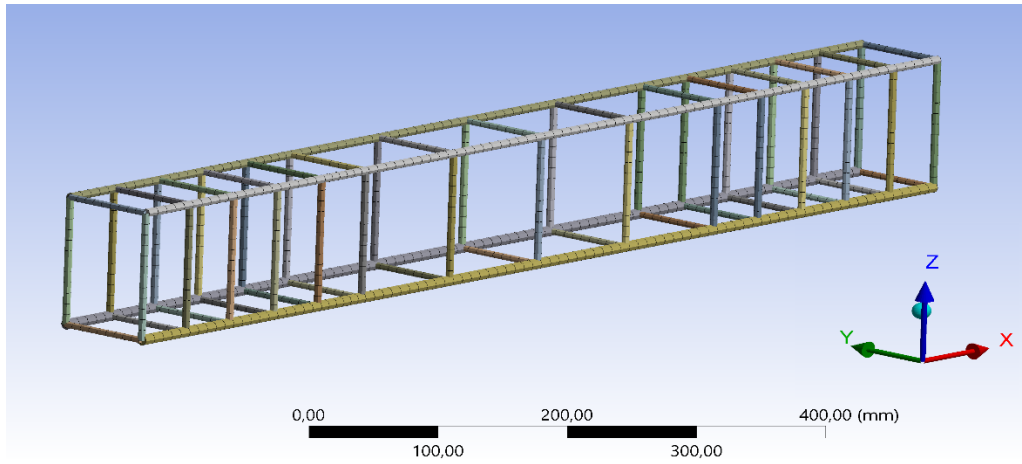
Sayısal modellemede, deney düzeneğinde olduğu gibi 4 noktalı eğilme deneyi simüle edilmiş, mesnet ve yükleme noktalarının mesafeleri deneysel çalışma ile birebir

modellenmiştir. Mesnet noktalarında hareket yatay ve düşey yönlerde sınırlandırılmıştır (Şekil 3.27).

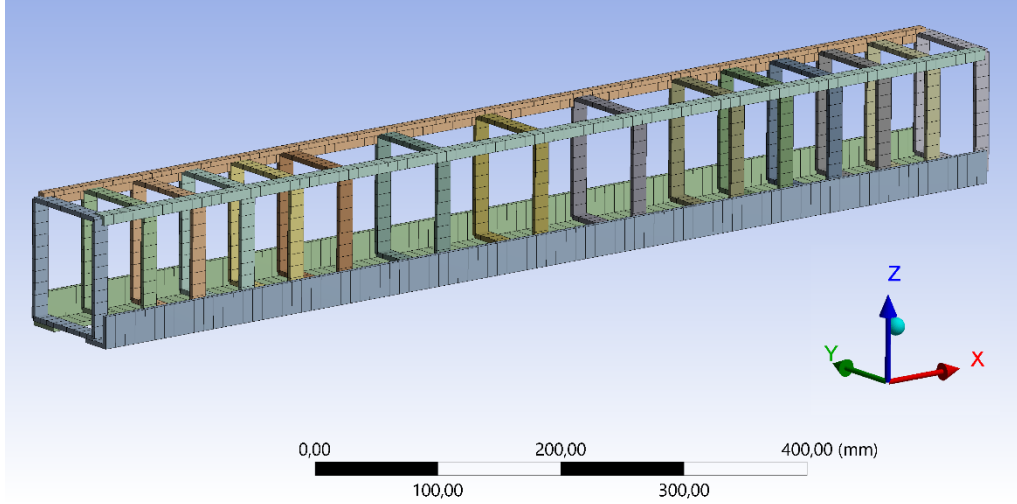


Şekil 3.27 Bilgisayar modelinde yükleme ve mesnet koşulları

Kullanılan iki farklı çelik malzemesi için seçilen nonlinear malzeme modellerinde akma dayanımları çekme deneyi sonuçlarında elde edilen sonuçlara uygun olarak tanımlanmıştır. Farklı çekme dayanımları ve ebatları olan geleneksel ve PCS donatılı kirişler için malzeme özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. Donatı modellemesi deney düzeneği için hazırlanan donatı sistemi baz alınarak hazırlanmıştır. Montaj, esas donatı ve etriye çapları ve aralıkları deney numunesindeki ölçülerle birebir aynı tutularak modelleme yapılmıştır (Şekil 3.28 ve Şekil 3.29).

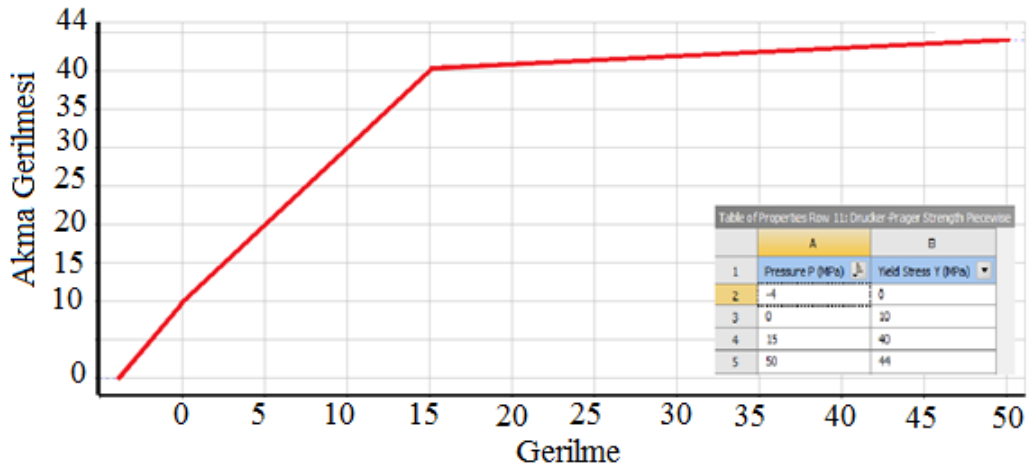


Şekil 3.28 Bilgisayar programı için hazırlanan geleneksel donatı

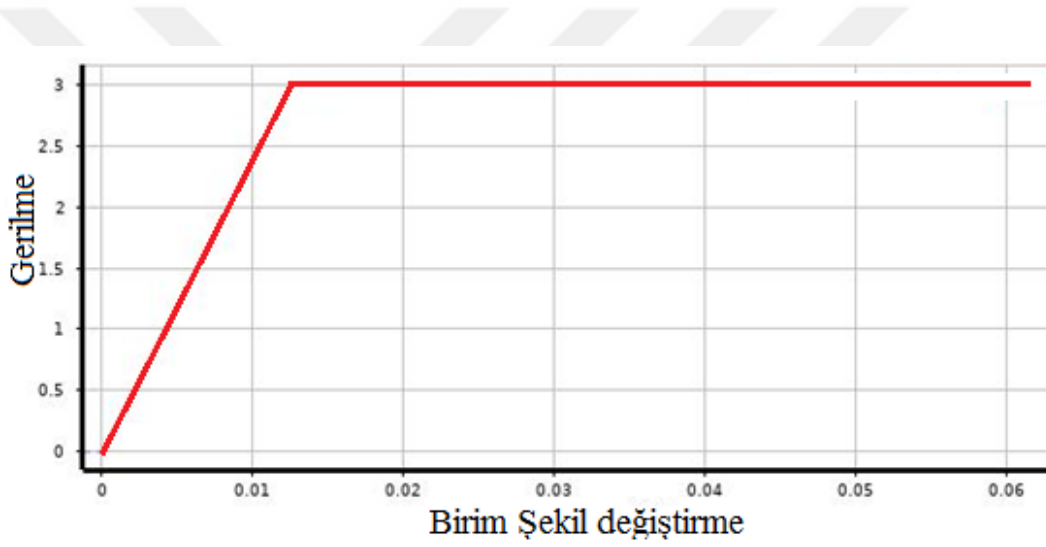


Şekil 3.29 Bilgisayar programı için hazırlanan PCS donatı

Beton malzemesinin gerçeğe daha yakın tanımlanması çelik malzemesinden daha zor olabilir. Literatürde plastik davranışın incelemek için birçok akma kriteri mevcuttur. Bu çalışmada beton için kırılma kriteri olarak Drucker- Prager kriteri seçilmiştir (Şekil 3.30). Bu kriter Von- Mises akma kriterinin genişletilmiş şekli olarak değerlendirilebilir. Drucker- Prager kırılma kriteri elastik-tam plastik davranışı göz önüne alır. Betonarme kiriş elemanların eğilme davranışının değerlendirildiği analitik çalışmalarda Drucker- Prager akma kriterinin kullanıldığı modellemelerde sonlu eleman analizi sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür (Köksal ve Doran, 1997). Eğilme deneyine ilişkin deney sonuçları ve deney gözlemleri sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çelik malzemesi için doğrusal olmayan davranışı dikkate alan Bilineer izotropik pekleşme modeli kullanılmıştır (Şekil 3.31).



Şekil 3.30 Beton malzemesi için tanımlanan Drucker-Prager akma kriteri



Şekil 3.31. Çelik malzemesi için tanımlanan bilineer izotropik pekleşme modeli

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Dikdörtgen Kesitli Numuneleri Sonuçları

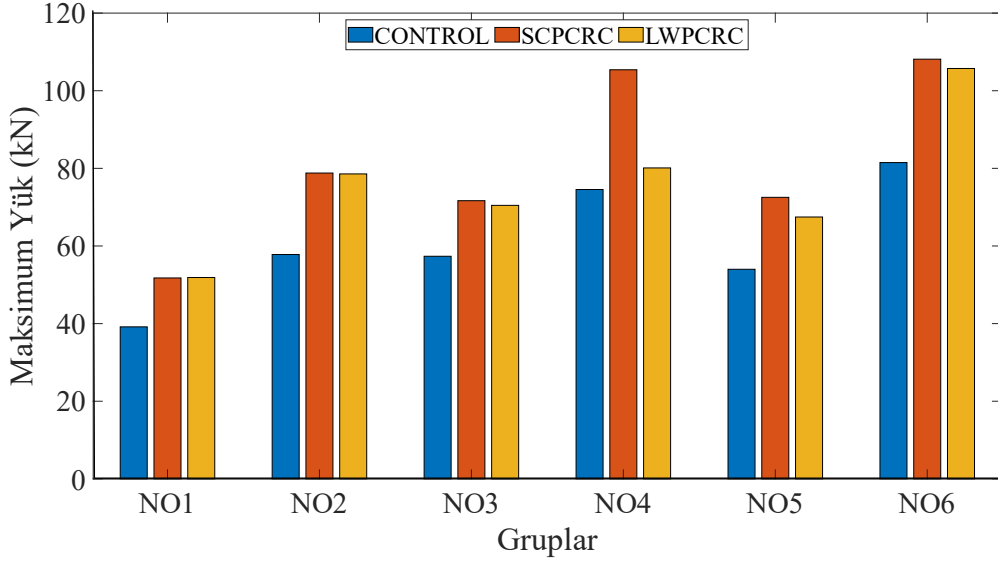
4.1.1. Dikdörtgen kesitli PCS ve geleneksel donatılı kesitlerin yük kapasiteleri, göçme modları ve test gözlemleri

Deney sonucunda numunelerin taşıdığı maksimum yükler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Eğilme yükleri altında SCCPCS ve LWPCS numunelerin taşıdığı maksimum yükler aynı eşdeğer donatı alanına sahip kontrol numunelerine göre belirgin oranda yüksek çıkmıştır. SCCPCS numunelerinin nihai taşıma güçleri, geleneksel donatılı numunelerine göre sırasıyla %32.22, %38.90, %29.51, %35.35, %34.32, %35.97 oranlarında yüksek çıkmıştır. LWPCS numunelerinin nihai taşıma güçlerinin CONTROL numunelerinin nihai taşıma güçlerine oranları ise sırasıyla %32.54, %38.43, %27.34, %2.91, %24.93, %32.30 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.1’de nihai taşıma kapasitelerinin karşılaştırması verilmiştir. Görüldüğü gibi sadece NO4 grubundaki LWPCS numunesinin kapasitesi düşük çıkmıştır. Bunun sebebi belirtilen numunede beton dökümündeki sıkıntıdan dolayı mesnet bölgesindeki zayıflık oluşmuş, yükün uygulandığı nokta ile mesnet bölgesi arasında gelişen çatlaklar kesme çatlağına benzer bir şekilde gelişmiş ve kirişin beklenenden düşük yükler altında göçmesine neden olmuştur. Diğer tüm gruplarda SCCPCS ve LWPCS numunelerinin nihai yük taşıma kapasiteleri %29.51 ila %38.90 oranları arasında CONTROL numunelerine göre daha fazladır. Bunun sebebi prefabrik donatının monolitik yapısı ve betonu sardığı yüzey alanının geleneksel donatı sistemine göre daha büyük olması ile açıklanabilir. Sargı etkisinin artması kapasiteyi arttırmıştır. Salt taşıma gücü açısından bakıldığında benzer beton basınç dayanımına, aynı eşdeğer donatı alanına ve donatı tipine sahip SCCPCS ve LWPCS numunelerinin eğilme etkisi altında nihai taşıma güçlerinin birbirlerine çok yakın olduğunu görülmüştür. Bu durum eğilme yükleri altında nihai yük taşıma kapasitesi açısından prefabrik donatılı kirişlerde hafif agrega kullanımının negatif bir etkisi olmadığı sonucunu ortaya çıkartmıştır. Bu durumda prefabrik kirişlerin ağırlıkları ortalama %40 oranlarında azalmasına rağmen nihai taşıma güçlerinde SCCPCS numunelerine göre belirgin bir azalma görülmemiştir. Maksimum yük kapasitelerine ilişkin sonuçlar Rethnasamy ve ark., (2013) normal beton ile yaptığı çalışmanın sonuçları ile örtüşmektedir.

Çizelge 4.1 Dikdörtgen kesitli numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Grup No	Kiriş Kodu	P_u (kN)	M_u (kNm)	$\frac{M_{us}}{M_{uc}}$	$\frac{M_{ul}}{M_{uc}}$	$\frac{M_{us}}{M_{ul}}$	Δ_y	Δ_u	μ
NO1	CONTROL	39,13	5,87				1,35	10,18	7,54
	SCCPCS	51,73	7,76	1,32	1,32	0,99	0,85	9,90	11,64
	LWPCS	51,86	7,78				1,21	7,81	6,45
NO2	CONTROL	56,20	8,43				0,85	7,49	8,81
	SCCPCS	78,73	11,71	1,38	1,38	1,00	0,90	10,84	12,04
	LWPCS	78,53	11,67				1,51	9,86	6,52
NO3	CONTROL	55,33	8,30				0,95	10,15	10,68
	SCCPCS	71,66	10,75	1,30	1,27	1,01	0,59	7,98	13,52
	LWPCS	70,46	10,57				1,18	10,00	8,474
NO4	CONTROL	77,86	11,68				1,01	12,10	11,98
	SCCPCS	105,40	15,81	1,35	1,02	1,31	0,63	12,35	19,60
	LWPCS	80,13	12,02				1,03	7,74	7,514
NO5	CONTROL	54,00	8,10				0,90	10,32	11,46
	SCCPCS	72,53	10,88	1,34	1,24	1,07	0,94	14,71	15,64
	LWPCS	67,46	10,12				1,10	9,80	8,90
NO6	CONTROL	80,06	12,01				1,26	14,48	11,49
	SCCPCS	108,86	16,33	1,36	1,32	1,03	1,00	15,70	15,71
	LWPCS	105,93	15,89				1,11	8,05	7,25

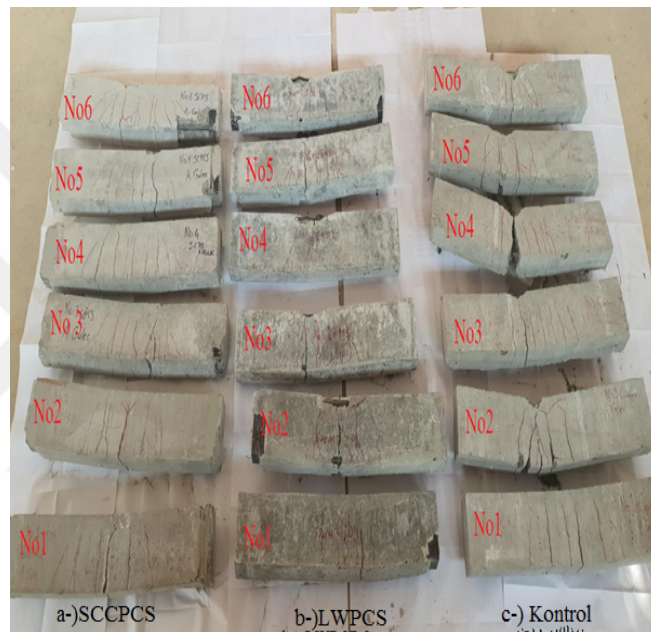
P_u maksimum yük, M_u deneysel maksimum moment, M_{us} SCCPCS numunesi maksimum deneysel maksimum moment, M_{uc} CONTROL numunesi maksimum moment, M_{ul} LWPCS numunesi maksimum moment, Δ_u maksimum yükleme durumundaki yer değiştirme değeri, Δ_y elasto-plasik akma durumundaki yer değiştirme değeri, μ duktilite oranı.



Şekil 4.1 Dikdörtgen kesitli numunelerin maksimum taşıma kapasiteleri

Test edilen numunelerin çatlak desenleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Tüm numunelerde gözle görülür ilk çatlaklar (yükün temas ettiği ve mesnet bölgesinde görülen mikro çatlaklar haricinde) eğilme bölgesinde görülmüştür. Artan eğilme yükleri altında en fazla çatlak oluşumu SCCPCS kirişlerinde görülmüştür. Ayrıca eğilme bölgesinde SCCPCS kirişlerinde çatlaklar daha düzenli bir biçimde oluşmuştur. LWPCS numunelerinde çatlaklar, CONTROL ve SCCPCS kirişlerine göre daha az sayıda ve daha düzensiz bir biçimde meydana gelmiştir. LWPCS kirişlerindeki düzensiz çatlak desenleri agreganın kırılma ve gevrek yapısıyla açıklanabilir. Hafif agregaların beton içindeki farklı dağılımları da kırılmaya neden olan çatlakların düzensizliğini arttırmış olabilir. Ayrıca hafif agregaların gevrek yapısının bir sonucu da özellikle maksimum yüke ulaşıldıktan sonra LWPCS kirişlerinde SCCPCS ve CONTROL numunelerine göre daha hızlı bir biçimde basınç bölgelerindeki betonun ezilmesidir. Bu da LWPCS numunelerinin SCCPCS ve CONTROL numunelerine göre nispeten daha gevrek bir biçimde kırıldığına ortaya koymaktadır. SCCPCS ve CONTROL numunelerinde kırılma anına kadar saf eğilme bölgesinde ortalama 8 ila 10 arası çatlaklar görülmüştür. İlk çatlaklar CONTROL numunelerinde maksimum yükün %30-35 arası, LWPCS ve SCCPCS numunelerinde ise %45-55 arası seviyelerde gözlemlenmiştir. Numunelerde eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar eksene dik bir biçimde oluşmuştur. Çatlak genişlikleri çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru azalma göstermiştir. Tüm numuneler çeliğin akması akabinde betonun ezilmesi neticesinde göçme gerçekleşmiştir. Tüm numunelerde yükün uygulandığı noktadan mesnet bölgesine doğru

göçme mekanizmasını değiştirebilecek bir kesme çatlakları gözlemlenmemiştir. Özellikle çekme donatısının basınç donatısına oranla yüksek olduğu numunelerde, Şekil 4.3'de görülebileceği gibi beton ezilmeden önce çekme donatısının aktığı basınç donatısının ise burkulduğu net bir biçimde görülmüştür. Ayrıca geleneksel donatılı numune gruplarında eğilme bölgesinde çekme donatısı ile etriyeyi bağlayan tellerin koptuğu ve etriyenin çekme donatısından ayrıldığı görülmüştür. Bazı numunelerde ise çekme donatısının koptuğu görülmüştür. Prefabrik donatılı kirişlerde ise eğilme yükleri altında donatı deforme olsa da donatı bütünlüğü bozulmamıştır. Prefabrik donatının bütünlüğünün bozulmaması monolitik yapısıyla açıklanabileceği gibi, prefabrik donatının imalat şekli ile de açıklanabilir.



Şekil 4.2 Test edilmiş dikdörtgen kesitli kirişlerin çatlak desenleri



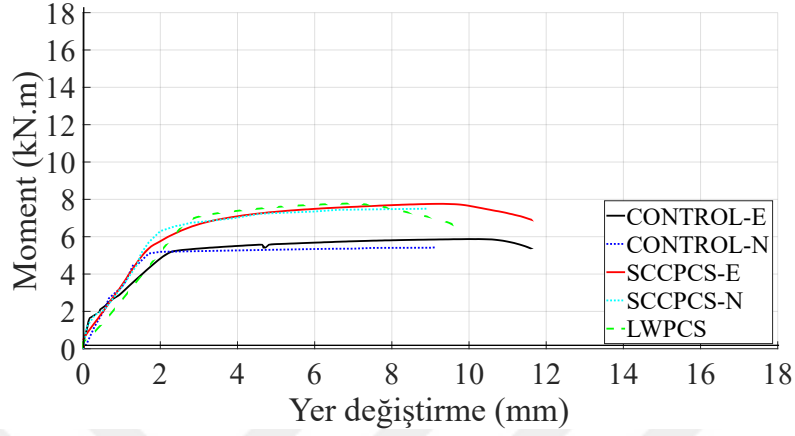
Şekil 4.3 Çekme donatısında akma, basınç donatısında burkulma davranışı

4.1.2. Dikdörtgen kesitli PCS ve geleneksel donatılı kesitlerin moment-yer değiştirme ilişkileri

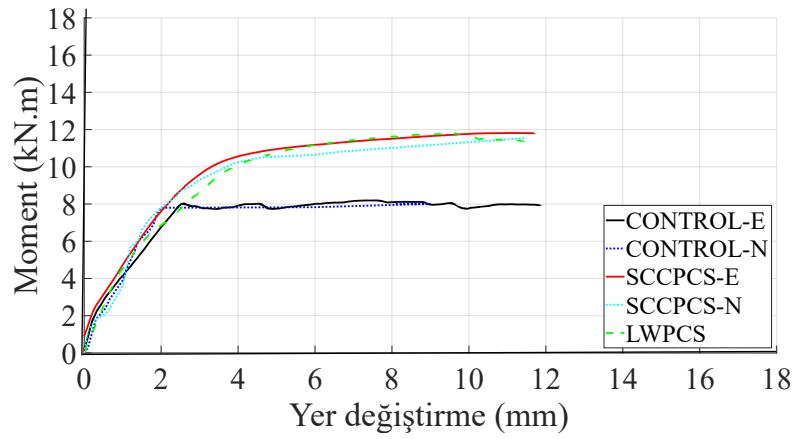
Tüm gruplar için moment-yer değiştirme eğrileri şekil 4.4-4.9'da gösterilmiştir. Moment-yer değiştirme grafikleri test edilen numunelerin eğilme davranışını daha iyi analiz etmek için önemlidir. Düşük yük seviyelerinde tüm gruplarda henüz donatıdaki ve betondaki gerilmeler çok küçük olduğundan moment-yer değiştirme eğrileri doğrusaldır. Yükün artmasıyla beraber beton çatlamış akabinde artan yükle beraber donatı akma dayanımına ulaşmış ve moment-yer değiştirme eğrilerinin doğrusallığı bozulmuştur. Çatlakların büyümesiyle birlikte doğruların eğimi azalmıştır. Akma noktasından sonra tüm numunelerde rijitlik kademeli olarak azalmıştır. Artan yükler altında geleneksel donatılı numunelerde rijitlik kaybı SCCPCS ve LWPCS numunelerine göre daha yüksektir. SCCPCS ve LWPCS numuneleri prefabrik donatının sargı etkisinden dolayı CONTROL numunelerine göre %40'a varan seviyelerde daha büyük momentler taşıdıkları görülmüştür. PCS donatısının yumuşak çelik (mild steel) olmasından dolayı mevcut ek kapasitesi de bu etkenlerden biridir. Ayrıca basınç donatı oranı aynı olan gruplar incelendiğinde çekme donatı oranı arttıkça prefabrik donatının moment taşıma kapasitesine etkisinin arttığı görülmüştür. Bunun sebebi donatı oranı arttıkça prefabrik donatılı kirişlerin betonu sardığı yüzey alanının geleneksel donatılı kirişe göre daha çok artmasıdır.

Moment-yerdeğiştirme grafikleri (şekil 4.4-şekil 4.9) incelendiğinde LWPCS numuneleri taşıdıkları maksimum moment açasından SCCPCS numunelerine göre benzerlik gösterse de yer değiştirme yapabilme açasından SCCPCS ve kontrol numunelerinin gerisinde kalmışlardır. Maksimum yüke ulaşıldıktan sonra SCCPCS ve CONTROL numunelerinin LWPCS numunelerine göre daha çok yer değiştirme yaptığı görülmüştür LWPCS numunelerinin eğilme davranışının büyük ölçüde bünyesinde bulunan hafif agreganın mekanik özelliklerinden etkilendiği anlaşılmaktadır. Hafif agregaların beton davranışı üzerine etkileri karmaşıktır. Hafif agregalar kırılğan ve gözenekli bir yapıya sahiptirler. Ezilmiş agrega partikülleri beton matrisi içinde yerel boşluklara neden olabilir. Maksimum yüke ulaşıldıktan sonra bu boşluklar kolayca beton ve çelik arasındaki bağın kaybedilmesine sebebiyet verebilir (Al-Shaar ve ark., 2018). Hafif agregaların bu durumu SCCPCS ve CONTROL numunelerine göre LWPCS numunelerinin yükler altında yer değiştirme yapabilme kabiliyetini sınırlamıştır. Gruplar arasındaki ufak yüzdelerlik değişimler betonların basınç dayanımları arasındaki farklılıklardan, hafif agreganın mekanik yapısından ve beton yerleşimindeki aksaklıklardan kaynaklanabilir. Sonlu elemanlar analizi sonucu ortaya çıkan

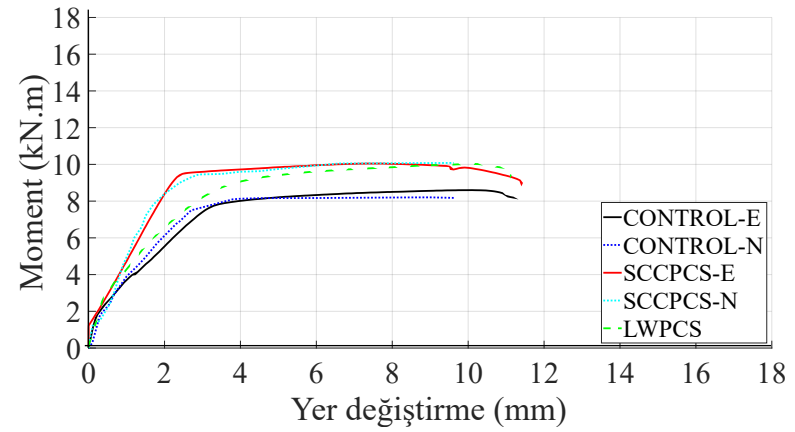
moment yer değiştirme eğrileri deneysel sonuçlarla büyük lde örtüşmektedir. Sonlu eleman analizi sonucu kiriş numunesinin deforme olmuş şekli deneysel analiz sonucu nihai yüke ulaşan kiriş numunelerine benzerdir. Çatlak gelişimleri ve deformasyonlar benzer şekilde oluşmuştur (şekil 4.10).



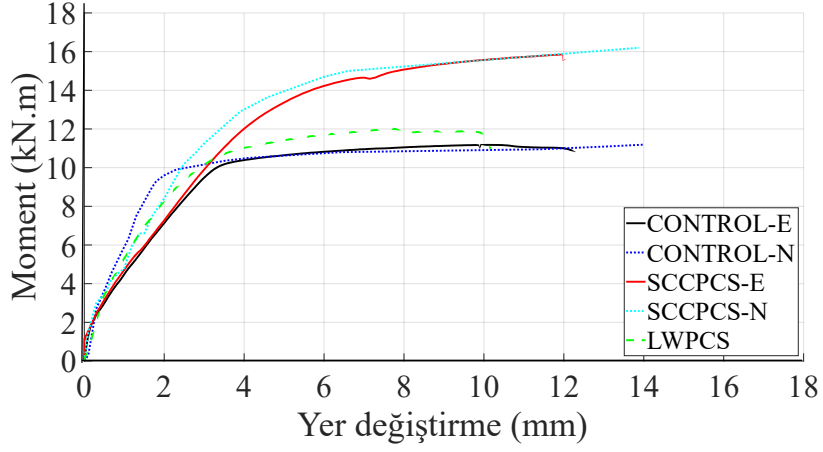
şekil 4.4 NO1 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri



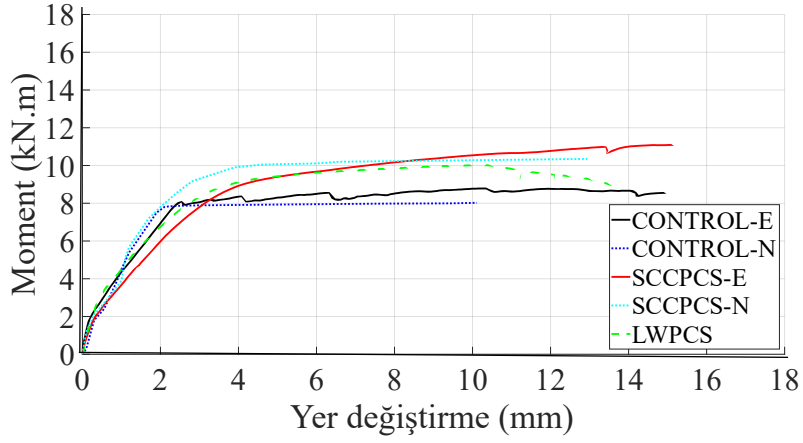
şekil 4.5 NO2 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri



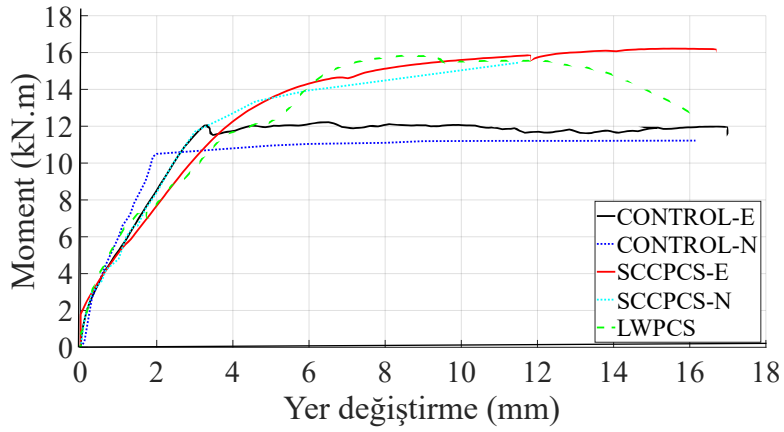
şekil 4.6 NO3 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri



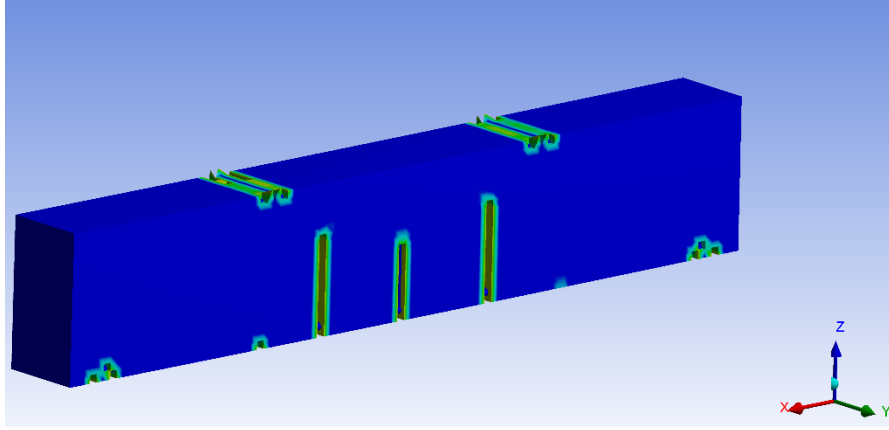
Şekil 4.7 NO4 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri



Şekil 4.8 NO5 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri



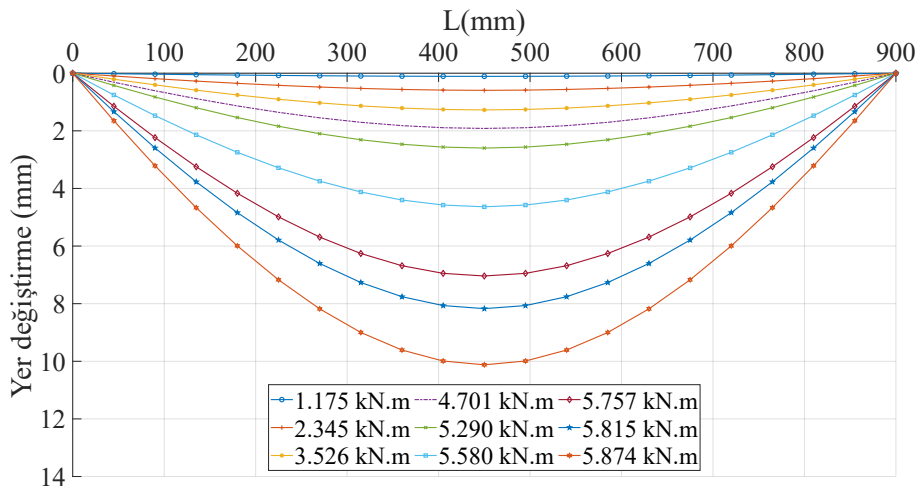
Şekil 4.9 NO6 grubu numunelerinin Moment-Yer değiştirme eğrileri



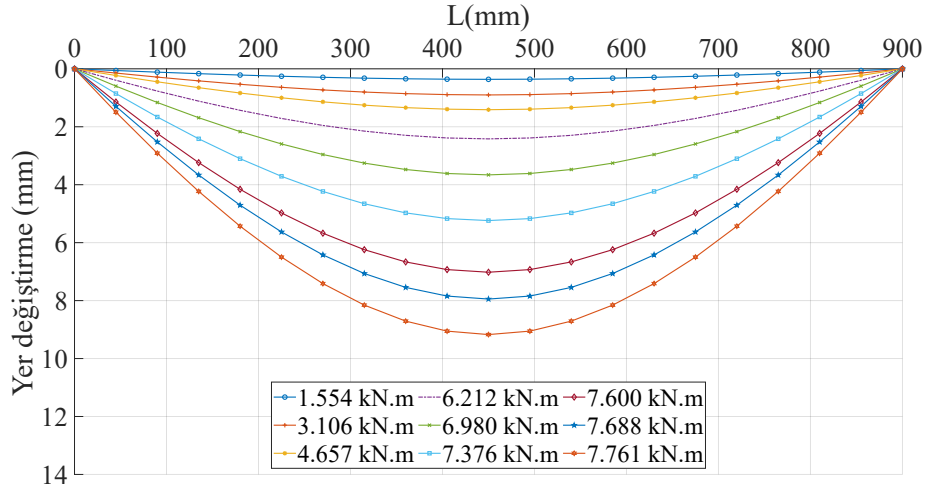
Şekil 4.10 PCS donatılı kirişin sonlu eleman analiz sonucu görüntüsü

4.1.3. Dikdörtgen kesitli PCS ve geleneksel donatılı kirişlerin artan moment altında yer değiştirme eğrileri

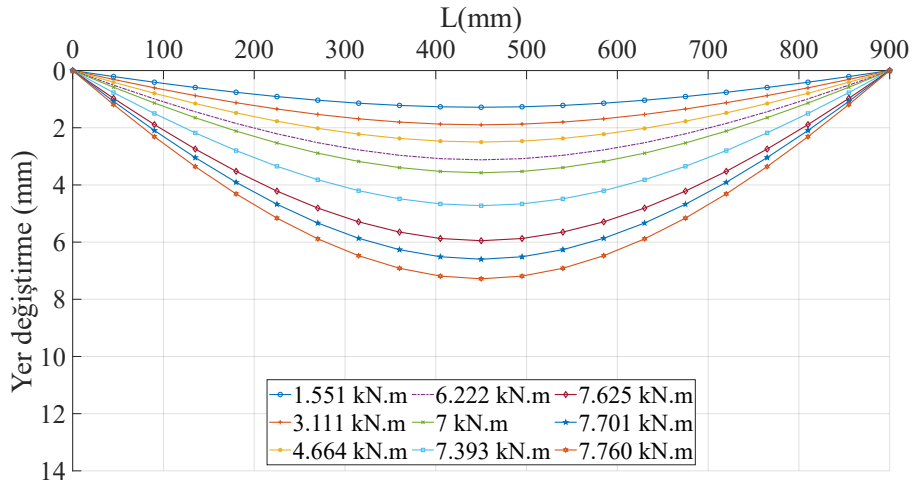
Deneysel analiz sonucu kirişlerde artan momentler altında adım adım maksimum moment değerlerine kadar meydana gelen yer değiştirme durumları çizilmiştir. Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de farklı moment seviyelerinde NO1 numunesine ait yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Bu yer değiştirme eğrileri eğilme altında kirişlerin davranışını daha net bir biçimde ortaya koymaktadır. Tüm numune gruplarında benzer yer değiştirme eğrileri gözlemlenmiştir. Farklı moment seviyelerinde CONTROL, SCCPCS ve LWPCS numuneleri farklı yerdeğiştirmeler gösterse de yer değiştirme eğrileri birbirine benzer ve yarım sinüs dalgasına benzer bir yapıda olduğu görülmüştür. Yer değiştirme eğrileri Liao ve ark. (2011) yaptığı çalışmadaki sonuçlarla benzerlik göstermiştir.



Şekil 4.11 NO1-CONTROL numunesinin artan yükler altında yer değiştirme eğrileri



şekil 4.12 NO1-SCCPCS numunesinin artan y¼k¼ler altında yer değiştirme eğrileri



şekil 4.13 NO1-LWPCS numunesinin artan y¼k¼ler altında yer değiştirme eğrileri

4.1.4. Dikd¼rtgen kesitli PCS ve geleneksel donatılı kirişlerin d¼ktilitte oranları

Yer değiştirme esaslı d¼ktilitte oranları

Çizelge 4.1’de d¼ktilitte fakt¼rleri verilmiştir. SCCPCS numunelerinin d¼kt¼litede fakt¼rleri LWPCS ve geleneksel donatılı numunelere g¼re daha y¼ksektir. SCCPCS numunelerinin d¼kt¼litede fakt¼rleri geleneksel donatılı numunelerinin d¼kt¼litede fakt¼rlerine

oranla %26,59 ila %63,84 arasında daha yüksektir. Prefabrik donatılı kirişin monolitik yapısı, betonda sargı etkisini arttırmış, çatlak oluşumu geciktirmiştir. Etriye görevi gören dikey şeritlerin, çekme ve basınç donatısı görevi gören yatay şeritlerle yaptığı rijit birleşim sargı etkisini arttırmıştır. Deney sırasında geleneksel donatılı bazı numunelerde etriye ile çekme donatısını bağlayan telin kopması sonucu çekme donatısının etriyeden ayrıldığı görülmüştür. Ayrıca eşdeğer donatı alanları, sac kalınlıkları ve beton sınıfları aynı olan SCCPCS ve geleneksel donatılı kirişlerin donatı alanları farklıdır. Akma dayanımı düşük olan prefabrik donatılı kirişlerin doğal olarak donatı yüzdeleri fazladır. Bu durum prefabrik donatılı kirişin betonu sardığı yüzey alanının daha büyük olması sonucunu beraberinde getirmiştir. LWPCS numuneleri ise nihai taşıma performansı açısından SCCPCS numunelerine yakın bir performans gösterse de düktilite faktörleri açısından geleneksel donatılı numunelere ve SCCPCS numunelerine göre düşük kalmışlardır. LWPCS numuneleri betonunun içindeki agregaların kırılğan ve gevrek yapılarından dolayı eğilme altında daha az düktil bir davranış göstermiştir. Ayrıca betonun, belli seviyelere kadar basınç dayanımının artmasının düktiliteye olumlu etkisi vardır (Ashour ve ark., 2000)

LWPCS numunelerinin beton basınç dayanımları SCCPCS ve CONTROL numunelerine göre %1 ila %7 arasında düşük kalmıştır. Bu durum da LWPCS numunelerinin düktilite oranlarının düşük kalmasının sebeplerinden biridir. LWPCS numunelerinin akma başladıktan sonra dayanımı düşmeden yaptığı yer değiştirmeler SCCPCS ve kontrol numunelerine göre daha düşük kalmaktadır. Tasarımda düktilite oranının minimum 3 olması gerekmektedir (Sin ve ark., 2011). Buna göre LWPCS numunelerinin düktilite oranları her ne kadar SCCPCS ve CONTROL numunelerinin gerisinde kalsa da kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Tüm numunelerdeki donatı oranları dengeli donatı oranının altındadır. Çekme donatısı yüzdesiyle basınç donatısı yüzdesi arasındaki fark arttıkça düktilite oranlarında da artış görülmüştür.

Enerji bazlı düktilite oranları

Enerji oranları incelendiğinde tüm gruplarda SCCPCS numuneleri geleneksel donatılı CONTROL numunelerinden, CONTROL numuneleri de LWPCS numunelerinden daha düktil bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir. SCCPCS numunelerinin enerji oranları CONTROL numunelerinden ortalama %4, LWPCS numunelerinden ortalama %7 oranlarında fazladır. Enerji oranının (E_{in}/E_{tot}) %75 ten büyük olması düktil bir davranışa işaret eder. %70-74 arası yarı-sünek, %70'den düşük olan oranlarda ise gevrek bir davranış işaret eder (Grace ve ark.,1988). Buna göre tüm numuneler sünek veya yarı sünek davranış

göstermiştir. SCCPCS numunelerinin yük- yer değiştirme eğrisi altında kalan toplam alanlarının diğer numunelere göre nispeten daha büyük, elastik kısmın alanın daha küçük olması elastik olmayan bölgenin alanının artmasına sebep olmuş dolayısıyla enerji oranlarını arttırmıştır. Prefabrik donatının sargı etkisinin daha büyük olması yük-yer değiştirme altında kalan alanı arttırmıştır. Ancak LWPCS numuneleri betonun içindeki agregaların mekanik özelliklerinden dolayı nispeten daha gevrek bir davranış göstermiştir. Bu durum LWPCS numunelerinin yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan toplam alanın küçük olmasıyla sonuçlanmıştır. SCCPCS numuneleri tüm gruplarda sünek davranış göstermişlerdir. LWPCS numuneleri ise NO4 ve NO2 grubunda yarı- sünek diğer gruplarda ise sünek bir davranış göstermiştir. Sonuç olarak SCCPCS ve LWPCS numunelerinden eğilme yükleri altında gevrek bir kırılma davranışı gösteren olmamıştır. Enerji bazlı duktilite oranları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

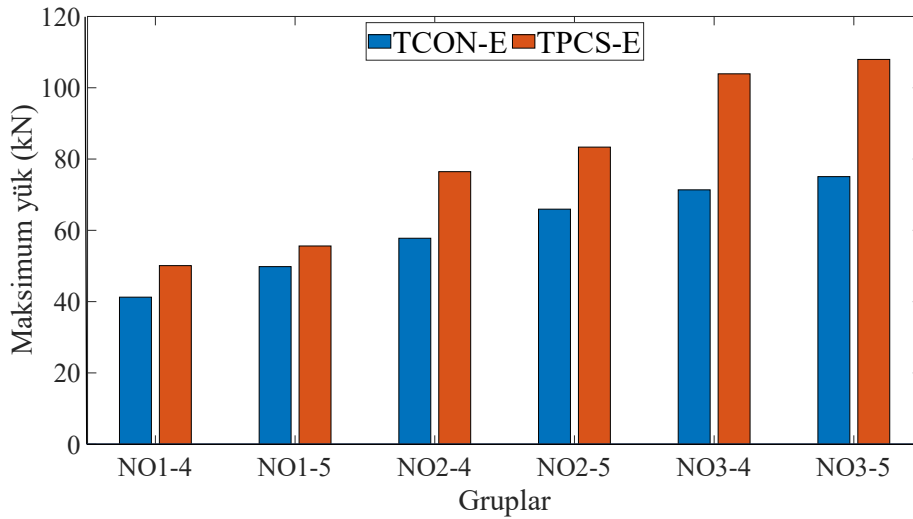
Çizelge 4.2 Enerji bazlı duktilite oranları

Grup No	Kiriş kodu	Enerji Oranı (E_{in}/E_{tot})
NO1	CONTROL	85%
	SCCPCS	89%
	LWPCS	78%
NO2	CONTROL	80%
	SCCPCS	84%
	LWPCS	76%
NO3	CONTROL	78%
	SCCPCS	82%
	LWPCS	74%
NO4	CONTROL	75%
	SCCPCS	78%
	LWPCS	70%
NO5	CONTROL	77%
	SCCPCS	78%
	LWPCS	74%
NO6	CONTROL	74%
	SCCPCS	77%
	LWPCS	72%

4.2. T Kesitli Numunelerin Sonuçları

4.2.1 T kesitli PCS ve geleneksel donatılı kesitlerin yük kapasiteleri, göçme modları ve test gözlemleri

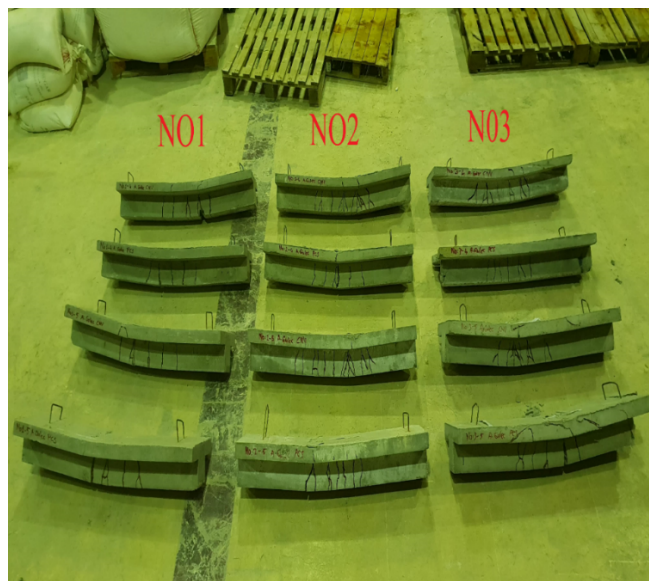
Eğilme deneyi sonucu T kesite sahip numunelerin deney sonuçları Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Dikdörtgen kesitli numunelerde olduğu gibi PCS donatılı numunelerin eğilme kapasiteleri geleneksel donatılı numunelere göre belirgin ölçüde yüksektir. Tüm numuneler incelendiğinde PCS donatılı kirişlerin eğilme kapasiteleri geleneksel donatılı numunelere göre %11,7 ila %45,67 arasında yüksek çıkmıştır. Dikdörtgen kesitli numunelerin deney sonuçlarına benzer olarak T kesitli numunelerde de PCS donatısının geleneksel donatıya göre betonu sardığı alanın daha fazla olması ve PCS donatısının monolitik yapısı betonda sargı etkisini arttırmıştır. Bu durum eğilme kapasitelerini arttırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde donatı oranı arttıkça PCS donatısının kirişlerin eğilme momenti kapasitesini daha çok arttırdığı gözlemlenmiştir. Ancak kesit etkisi göz önüne alındığında kesit büyüdükçe PCS donatısının eğilme kapasitesine katkısında düşüş gözlemlenmiştir. PCS ve geleneksel donatılı numuneler incelendiğinde hem PCS donatılı hem de geleneksel donatılı numunelerde donatı oranı arttıkça farklı kesitli numunelerde eğilme kapasiteleri arasındaki fark giderek azalmaktadır. Şekil 4.14’de numunelerin taşıyabildikleri maksimum yükler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.14 T kesitli numunelerin maksimum taşıma kapasiteleri

Tüm numuneler eğilme kırılması neticesinde nihai kapasitelerine ulaşmışlardır. Tüm numunelerin test sonrası durumu Şekil 4.15’te gösterilmiştir. Çatlaklar sabit moment

bölgesinde kesite dik bir biçimde oluşmuştur. Dikdörtgen kesitli numunelerin aksine ilk etapta 4 ila 6 arası çatlak oluşmuş ancak artan yükler altında ana çatlakların yanı sıra bunlara bağlı tali çatlaklar görülmüştür. İlk çatlaklar geleneksel donatılı numunelerde nihai yükün %25'i seviyelerinde, PCS donatılı numunelerde ise nihai yükün %35'i seviyelerinde gerçekleşmiştir. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'de sonlu eleman analiz sonucu oluşan çatlak tipleri ve PCS donatısının deforme olmuş hali görülmektedir. Sonlu eleman analiz sonucunda oluşan çatlak tipleri ve sayıları deneysel çalışma sonuçlarıyla örtüşmektedir. PCS donatılı numunelerde kırılmaya neden olan ana çatlak genişlikleri geleneksel donatılı numunelerdeki ana çatlak genişliklerine göre nispeten daha büyüktür. T kesitli numunelerde çatlak desenleri ilk etapta dikdörtgen kirişe göre daha düzenli görünse de artan yükler altında tali çatlakların da oluşmasıyla birlikte yama tarzı bir görünüm almıştır. PCS donatılı numunelerin çatlak oluşumunun geleneksel donatılı numunelere göre daha düzenli olduğu görülmüştür. (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17). Nihai yüke yakın seviyelerde çatlaklar kesitin tabla kısmına kadar ulaşmışlardır. Basınç bölgesinin alanının fazla olmasından dolayı tarafsız eksen kesitin üst kısmına dikdörtgen kesite göre daha yakındır. Bu nedenle artan yükler altında ana kırılma çatlak kalınlıklarının dikdörtgen kesitli numunelere kıyasla daha geniş olarak gözlemlenmiştir. Eğilme yükleri altında uygulanan yükten mesnet noktasına doğru herhangi diyagonal çatlak görülmemiştir. Kırılma mekanizmasını değiştirmese de dikdörtgen kesitte ilerleyen yük seviyelerinde görülen ince diyagonal çatlaklar, T kesitlerde görülmemiştir. T kesitlerin dikdörtgen kesitlere kıyasla daha yüksek bir kesme dayanımına sahip olması bu sonucu beraberinde getirmiştir (Cladera ve ark., 2015).



Şekil 4.15 Test edilmiş T kesitli kirişlerin çatlak desenleri



Şekil 4.16 Nihai kapasitesine ulaşmış T kesitli geleneksel donatılı kiriş

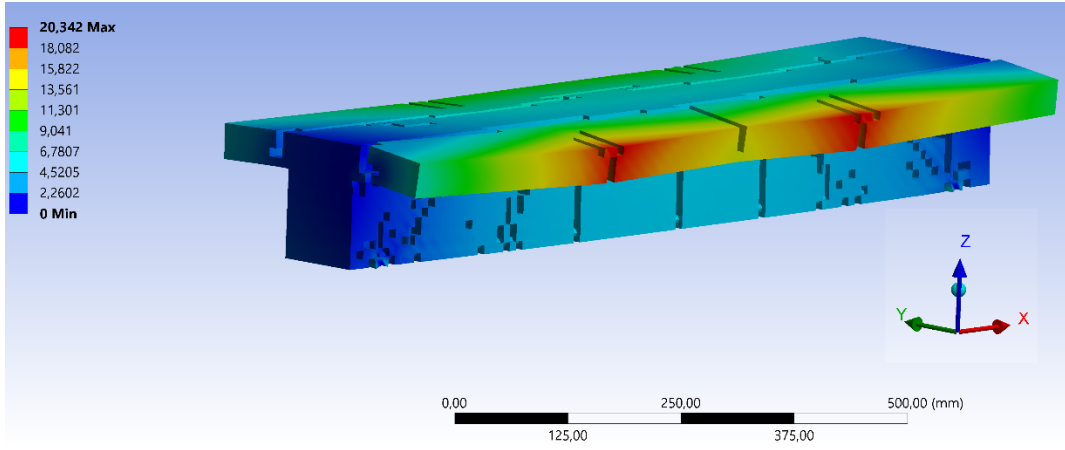


Şekil 4.17 Nihai kapasitesine ulaşmış T kesitli PCS donatılı kiriş

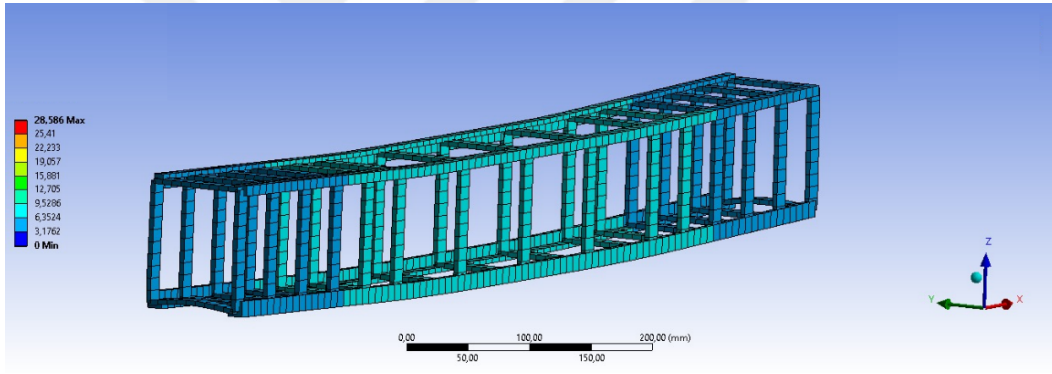
Çizelge 4.3 T kesitli kirişlerin eğilme deneyi sonuçları

Grup No	Kiriş Kodu	P_u (kN)	M_u (kNm)	$\frac{M_{uTPCS}}{M_{uCON}}$	$\frac{M_{uTPCS-5}}{M_{uTPCS-4}}$	$\frac{M_{uCON-5}}{M_{uCON-4}}$	M_{uN} (kNm)	Δ_y	Δ_u	μ
NO1	TCON-4	41,24	7,21	1,21	1,11	1,20	7,25	5,90	28,57	4,84
	TPCS-4	50,09	8,76				8,88	4,02	19,68	4,89
	TCON-5	49,82	8,71	1,11			8,67	4,80	27,76	5,78
	TPCS-5	55,60	9,73	9,67			3,89	22,96	5,90	
NO2	TCON-4	57,78	10,11	1,32	1,08	1,14	9,94	6,15	24,59	3,99
	TPCS4	76,46	13,38				12,69	5,09	20,65	4,05
	TCON-5	65,94	11,54	1,26			11,49	6,01	24,29	4,04
	TPCS5	83,35	14,58				14,50	5,01	20,55	4,10
NO3	TCON-4	71,35	12,48	1,45	1,03	1,05	11,89	6,08	16,42	2,70
	TPCS-4	103,90	18,18				17,23	5,71	15,68	2,74
	TCON-5	75,06	13,13	1,43			13,18	7,12	15,75	2,21
	TPCS-5	107,95	18,89				19,97	5,97	13,55	2,26

P_u Maksimum yük, M_u deneysel maksimum moment, M_{uTPCS} TPCS numunesi deneysel maksimum moment, M_{uCON} CONTROL numunesi deneysel maksimum moment, M_{uN} sonlu eleman analiz maksimum moment, Δ_u maksimum yükleme durumundaki yer değiştirme değeri, Δ_y elasto-plasik akma durumundaki yer değiştirme değeri, μ düktilite oranı.



Şekil 4.18 PCS donatılı kirişin sonlu eleman analiz sonucu görüntüsü

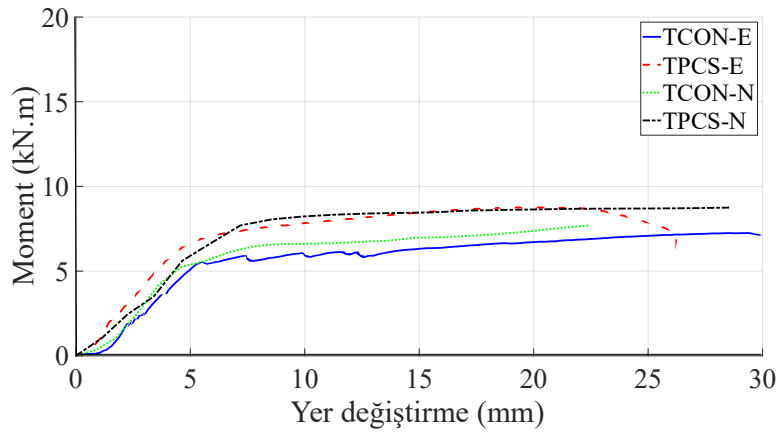


Şekil 4.19 PCS donatısının sonlu eleman analiz sonucu eğilme yükleri altındaki durumu

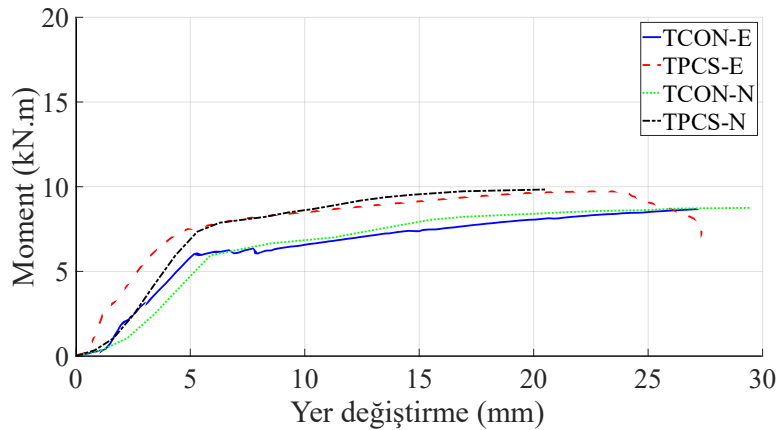
4.2.2 T kesitli PCS ve geleneksel donatılı kesitlerin moment-yer değiştirme ilişkileri

Tüm kirişlere ait moment-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.20-Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Artan yükler altında tüm kiriş numunelerinin ilk çatlak oluşumuna kadar moment-yer değiştirme eğrileri doğrusaldır. Çatlak oluşumundan sonra eğriler doğrusallıklarını kaybetmişlerdir. Geleneksel donatılı numunelerde artan yükler altında akma noktaları daha belirgin iken, PCS donatılı numunelerde akma noktası net olarak belli değildir. PCS donatılı numunelerin moment-yer değiştirme eğrileri eşdeğer donatı alanlı geleneksel donatılı numunelere göre daha eğrisel bir davranış göstermiştir. PCS donatılı numunelerin moment taşıma kapasiteleri geleneksel donatılı numunelere kıyasla %45'e

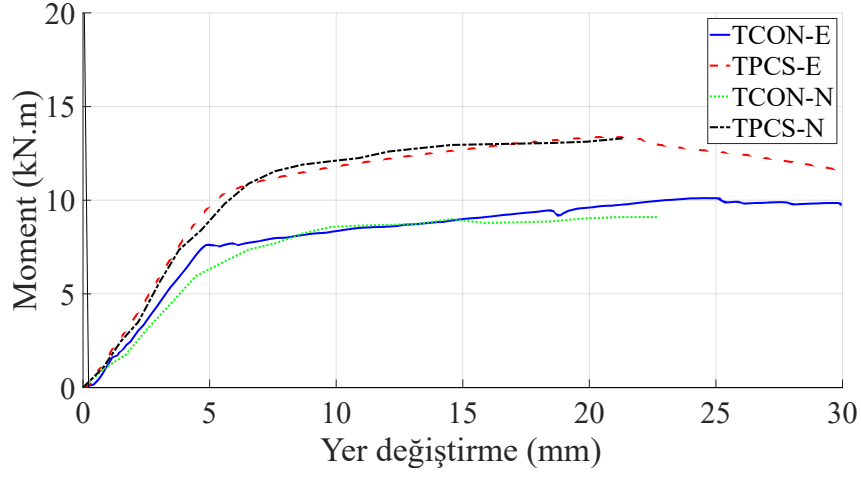
varan düzeyde artış göstermiştir. Moment- yer değiştirme eğrilerinin altında kalan alanlar incelendiğinde PCS donatılı numunelerin tokluklarının geleneksel donatılı numunelere göre daha yüksek olduğu görülebilir. Bu durumda yükler altında PCS donatılı numunelerin enerji yutma kapasitelerinin geleneksel donatılı numunelere göre daha yüksek olduğu değerlendirilebilir. Donatı oranı arttıkça PCS donatısının moment taşıma kapasitesine katkısı artmış ancak donatı oranının artması sonucu düktilitenin azalmasıyla birlikte nihai moment yüküne karşılık gelen yer değiştirmeler azalmıştır. Gruplar kendi içerisinde değerlendirildiğinde PCS donatılı numunelerin akma noktalarına daha düşük yer değiştirme değerlerinde ulaştıkları görülmüştür. Sonlu eleman analiz sonucu oluşan moment-yer değiştirme değerleri, deneysel çalışma sonucu ortaya çıkan moment-yer değiştirme değerleriyle oldukça uyumludur. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de prefabrik donatılı ve geleneksel donatılı kirişlerin kendi içerisinde karşılaştırmalı moment- yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



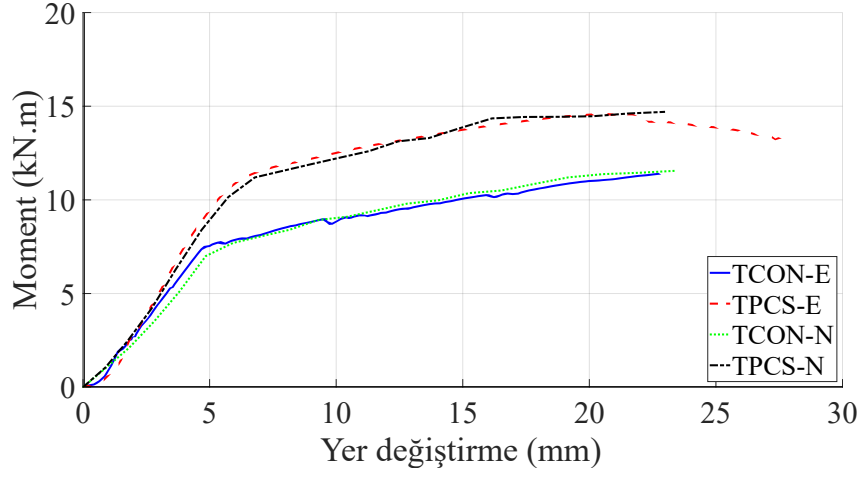
Şekil 4.20 NO1-4 numunelerinin Moment-Yer değiştirme grafikleri



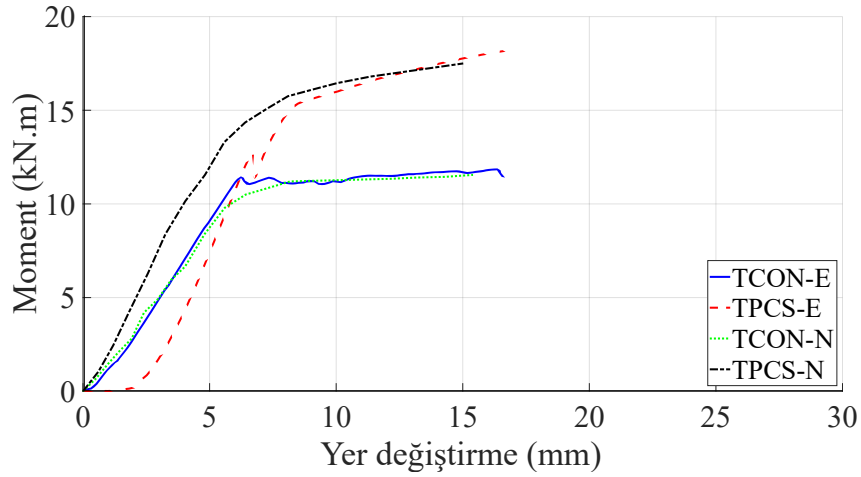
Şekil 4.21 NO1-5 numunelerinin Moment-Yer değiştirme grafikleri



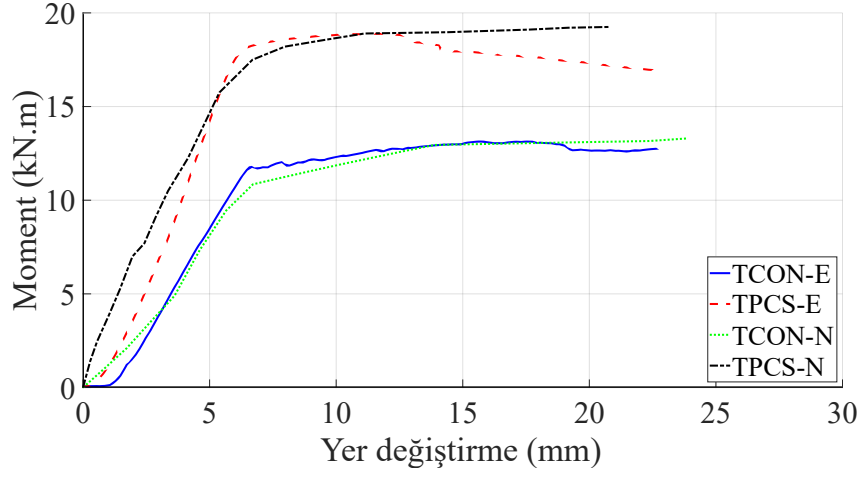
şekil 4.22 NO2-4 numunelerinin Moment-Yer değiştirme grafikleri



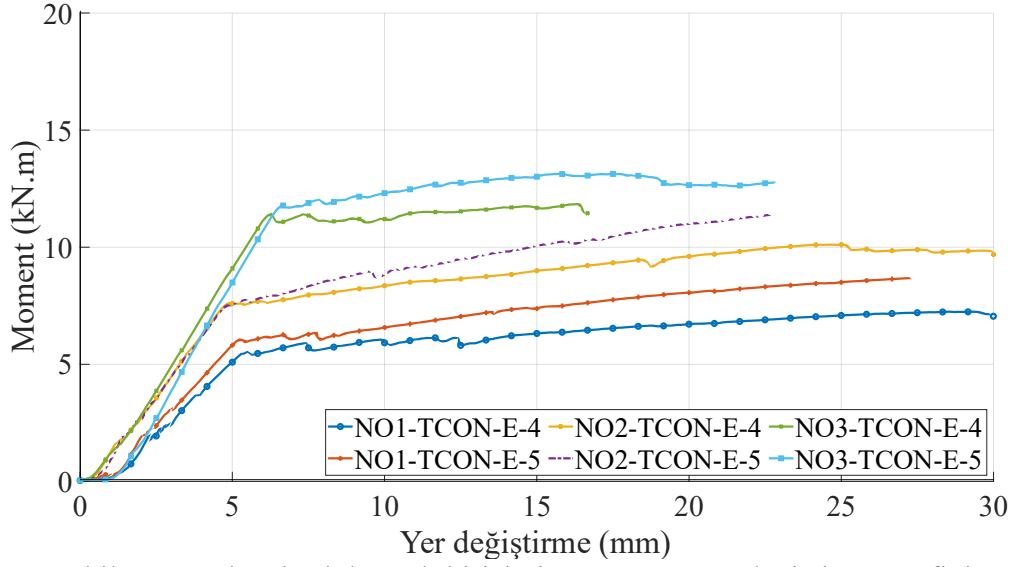
şekil 4.23 NO2-5 numunesinin Moment-Yer değiştirme grafikleri



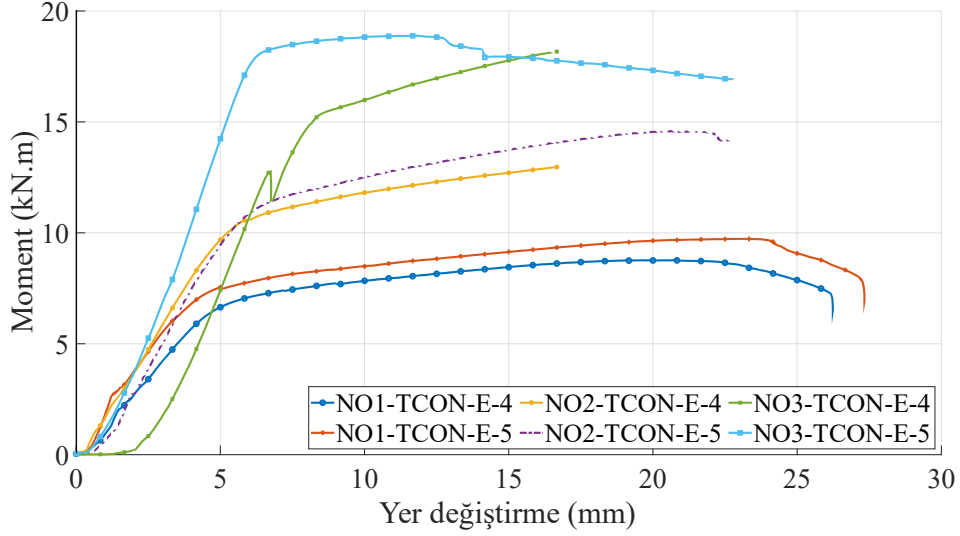
şekil 4.24 NO3-4 numunesinin Moment-Yer değiştirme grafikleri



Şekil 4.25 NO3-5 numunesinin Moment-Yer değiştirme grafikleri



Şekil 4.26 Geleneksel donatılı kirişlerin Moment-Yer değiştirme grafiği



Şekil 4.27 Prefabrik donatılı kirişlerin Moment-Yer değiştirme grafiği

4.2.3. T kesitli PCS ve geleneksel donatılı kirişlerin duktilite oranları

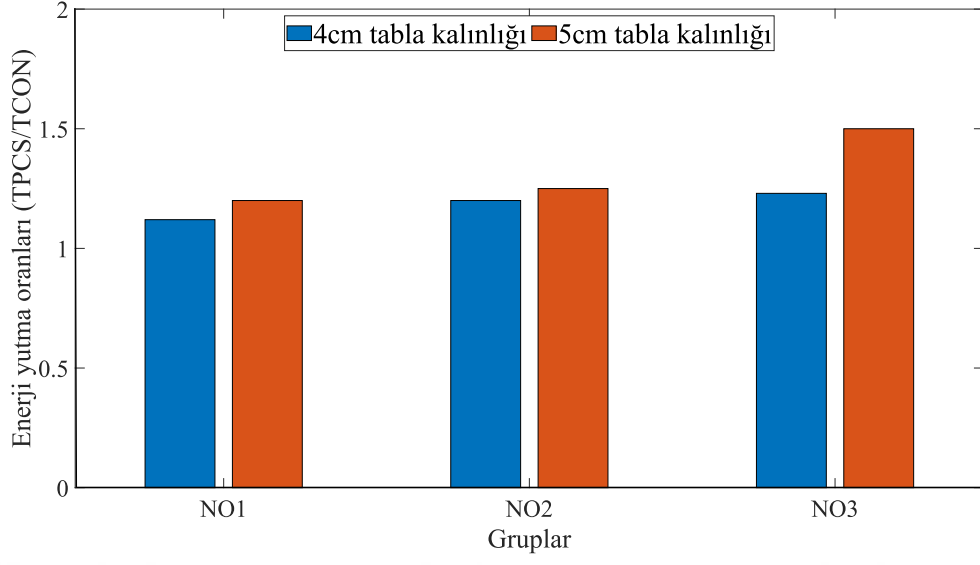
Çizelge 4.3'te T kirişlere ait duktilite oranları verilmiştir. Duktilite oranları dikdörtgen kesitli numunelerde olduğu gibi nihai kapasiteye denk gelen yer değiştirmelerin akma anındaki yer değiştirmelere oranının bulunması şeklinde hesaplanmıştır. Duktilite oranları incelendiğinde donatı oranının duktilite oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Dikdörtgen kesitli numunelere oranla daha yüksek bir çekme donatı oranı olması T kesitlerin duktilite oranlarının daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Tabla kalınlığı ve kesit ölçüleri daha büyük olan numunelerde çekme donatı oranının düşmesiyle duktilitenin arttığı ve bu numunelerde PCS donatısının duktilite oranına olumlu etkisi olduğu görülmektedir. Kesit ölçülerinin daha büyük olduğu NO1 ve NO2 grubunda yer alan TPCS-5 numunelerinin duktilite oranlarının KONTOL gruplarına göre %3 ila % 9 arasında yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Duktilite oranlarının minimum 3 olması sünek yapı tasarımı için gereklidir (Sin ve ark., 2011). NO1 ve NO2 grubunda ait numunelerde duktilite oranları belirlenen sınırın üstündedir. NO3 grubunda ise çekme donatısı oranının yüksek olması duktilite değerini, belirlenen minimum değere yakın olmakla birlikte, bu seviyenin altına düşürmüştür. Ayrıca dikdörtgen kesitli numunelerle kıyaslandığında T kesitli numunelerde daha kalın sac kullanılması duktilite oranlarını düşürmüştür. Tespit edilen bu durum Rethnasamy ve ark. (2013) tarafından PCS donatılı kirişlerin eğilme performanslarının araştırıldığı çalışma ile örtüşmektedir. Sac kalınlığının artması donatının rijitliğini arttırmış ve kiriş elemanının sünekliğini azaltmış olabilir.

4.2.4. T kesitli PCS ve geleneksel donatılı kirişlerin enerji yutma kapasiteleri oranları

Çizelge 4.4’ de numunelerin yükler altında enerji yutma oranları verilmiştir. Tüm TPCS numunelerinin geleneksel donatılı CONTROL numunelerine göre enerji yutma kapasiteleri fazladır. TPCS numunelerinin enerji yutma oranları geleneksel donatılı numunelere göre %48’e varan oranlarda yüksek çıkmıştır. Aynı gruptaki numunelerin enerji yutma kapasiteleri karşılaştırıldığında, aynı eşdeğer donatı alanına sahip büyük kesitli numunelerin enerji yutma kapasiteleri oranları küçük kesitli numunelere göre fazladır. Bunun nedeni donatı oranının düşmesi ve kesitin büyük olmasıdır. Gruplar arası inceleme yapıldığında donatı alanının artmasıyla TPCS numunelerinin betonu sardığı yüzey alanı artmıştır. Bu nedenle sargı etkisi artmış ve enerji yutma kapasiteleri artmıştır. PCS donatısının monolitik yapısı sayesinde yükler altında TPCS numunelerinin geleneksel donatılı numunelere göre daha istikrarlı bir davranış gösterdiği değerlendirilebilir. Şekil 4.28’de enerji yutma oranları (TPCS/TCON) karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 T kesitli numunelerin enerji yutma oranları

Grup No	Enerji yutma oranları
NO1-4	1,12
NO1-5	1,20
NO2-4	1,20
NO2-5	1,25
NO3-4	1,23
NO3-5	1,48



Şekil 4.28 T kesitli numunelerin karşılaştırmalı enerji yutma oranları

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Betonarme yapı elemanlarında geleneksel donatı sistemi yerine kullanılabilen alternatif donatı sistemleri üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Donatının yapı elemanın yükler altındaki performansındaki önemli rolü bu sonucu beraberinde getirmiştir. Özellikle mühendislik ekonomisi gözetilerek yapı performansını arttıracak sistemlerin geliştirilmesi noktasına önemli çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada geleneksel donatı yerine önerilen Prefabrik Kafes Sistemin eğilme yükleri altında betonarme kiriş elemanların performansına etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda çalışma 2 etapta gerçekleştirilmiştir. İlk etapta kendiliğinden yerleşen betona sahip PCS donatılı (SCCPCS) ve hafif betona sahip PCS donatılı (LWPCS) dikdörtgen kesitli kirişler ile eşdeğer donatı alanına ve kesit özelliklerine sahip geleneksel donatılı kirişlerin eğilme yükleri altındaki performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. İkinci etapta ise kendinden yerleşen betonlu PCS donatılı T kesitli (TPCS) kirişlerle eşdeğer donatı alanına ve kesit özelliklerine sahip geleneksel donatılı T kirişlerin eğilme yükleri altındaki performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. İlk etapta 6 tanesi kontrol grubu olmak üzere toplamda 18 adet, ikinci etapta ise 6 tanesi kontrol grubu olmak üzere 12 adet numune test edilmiştir. Her iki etapta da kirişlerin taşıyabileceği nihai yük kapasiteleri, moment– yer değiştirme ilişkileri, göçme modları ve düktilite oranları incelenmiş, deney bulguları tartışılmış ve özet olarak aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

1-Eğilme yükleri altında SCCPCS ve LWPCS numunelerinin nihai yük taşıma kapasiteleri birbirine çok yakın olup, eşdeğer donatı alanına ve beton dayanımına sahip geleneksel donatılı CONTROL numunelerinden %38'e varan oranlarda, TPCS numuneleri de %45'e varan oranlarda daha fazla yük taşımışlardır. Salt nihai yük taşıma kapasitesi açısından bakıldığında prefabrik donatılı kirişte hafif agrega kullanımının negatif bir etkisi gözlemlenmemiştir. Prefabrik donatının monolitik yapısı dolayısıyla oluşan yüksek sargı etkisi prefabrik donatılı numunelerin nihai yük taşıma kapasitelerini arttırmıştır. Maksimum yükler açısından değerlendirildiğinde T ve dikdörtgen kesitli numunelerin sonlu eleman analiz sonuçları deneysel sonuçlarla örtüşmektedir.

2-Çekme ve basınç donatı oranlarının artmasına bağlı olarak prefabrik donatılı numunelerin kapasiteleri geleneksel donatılı numunelere göre daha fazla artmıştır. Prefabrik donatının betonu sardığı yüzey alanı büyüdükçe oluşturduğu sargı etkisi de daha fazla artmıştır.

3- Moment-yer değiştirme ilişkisi incelendiğinde PCS donatılı numunelerinde etriye görevi gören dikey şeritlerin, çekme ve basınç donatısı görevi gören yatay şeritlerle yaptığı rijit birleşimler betonun bütünlüğünü daha uzun süre korumuş ve daha çok yer değiştirme yapmasına olanak vermiştir. LWPCS numuneleri prefabrik donatının bu avantajından betonun içindeki agregaların mekanik özelliklerinden dolayı çok fazla yararlanamamışlar, CONTROL numunelerinde ise bazı numunelerde etriye ile çekme donatısının bağlayan telin kopması sonucu donatı bütünlüğünün kaybolduğu görülmüştür.

4-Prefabrik donatılı numunelerde ilk çatlaklar CONTROL numunelerine göre daha geç gözlemlenmiştir. SCCPCS ve LWPCS numunelerinde eğilme yükleri altında nihai taşıma gücüne kadar orta bölgede 8-10 arası çatlak görülürken, TPCS numunelerinde 4-6 çatlak görülmüştür. Tüm numuneler çeliğin akması arkasından beton ezilmesi ile kapasitelerine ulaşmışlardır. Ancak LWPCS numunelerinde basınç bölgesindeki beton, SCCPCS ve CONTROL numunelerine göre, maksimum yüke ulaşıldıktan sonra artan yükler altında daha hızlı bir biçimde ezilmiştir. T ve dikdörtgen kesitli numunelerin gerçek kırılma davranışı bilgisayar modelindeki kırılma davranışına benzer bir biçimde gerçekleşmiştir.

5-Yer değiştirme esaslı düktilite oranları incelendiğinde SCCPCS numunelerinin, CONTROL ve LWPCS numunelerine göre daha sünek oldukları görülmüştür. SCCPCS numunelerinin düktilite oranları CONTROL gruplarına göre %26,59 ila %63,84 daha yüksektir. LWPCS numunelerinin ise düktilite oranları SCCPCS ve CONTROL numunelerine göre daha düşüktür. LWPCS numuneleri bünyesinde bulunan hafif agregaların mekanik özelliklerinden etkilenmişlerdir. Hafif agregaların zayıf ve gevrek yapıları LWPCS numunelerinin yer değiştirme yapma kabiliyetlerini sınırlamışlardır. Ancak LWPCS numunelerinin düktilite oranları her ne kadar SCCPCS ve CONTROL grubuna göre düşük çıksa da yer değiştirme esaslı düktilite indeksine göre sünek kabul edilebilir sınırların üstündedir. TPCS numunelerinin düktilite oranları yüksek donatı yüzdesinden dolayı dikdörtgen kesitli PCS donatılı numunelere göre düşük çıkmıştır. TPCS numunelerinin sac kalınlıklarının da dikdörtgen kesitli numunelere göre fazla olması da bu sonucu beraberinde getirmiştir. Ancak tüm gruplarda TPCS-5 numunelerinin düktilite oranları geleneksel donatılı numunelere kıyasla %3 ila %9 arası daha yüksektir. Düktilite oranları, düktilite indekslerine göre sünek kabul edilebilir düzeydedir.

6-Enerji bazlı düktülite oranları incelendiğinde benzer sonuçlar görülmüştür. SCCPCS numunelerinin yük-yer değiştirme eğrileri altında kalan alanların büyük olmasından dolayı enerji yutma yeteneği daha yüksektir. Hiçbir grupta LWPCS

numunelerinin elastik olmayan şekil değiştirmelerinin toplam şekil değiştirmeye oranı %70 seviyesinin altında değildir. Bu oran LWPCS numuneleri için sünek kırılma şartını sağlamaktadır. TPCS numunelerinin enerji yutma yetenekleri incelendiğinde enerji yutma kapasitelerinin geleneksel donatılı numunelere kıyasla %48'e varan oranlarda yüksek olduğu görülmüştür.

7- Yapılan testler ışığında kendinden yerleşen betona sahip PCS donatılı numunelerin nihai yük taşıma kapasitesi, yer değiştirme yapma ve enerji yutma yeteneği açısından aynı eşdeğer donatı alanına, beton dayanımına ve kesit alanına sahip geleneksel donatılı CONTROL numunelerine göre daha iyi bir performans gösterdiği açıktır. Kendiliğinden yerleşen beton kalıba rahatça yerleşmiş, normal beton dökümünde yaşanan sıkıntılar yaşanmamıştır. Donatının yekpare bir yapıda olmasından dolayı prefabrik donatılı yapı elemanlarında kendiliğinden yerleşen beton kullanımının yapı elemanın herhangi bir noktasında boşluk kalmaması açısından önemi büyüktür. Hazırlanan prefabrik donatı hazır kutu profillerden (tüplerden) lazer ile kesilmek suretiyle hazırlanmıştır. Bu sayede donatı imalatı kolaylaşmış, bükme veya kaynaklama sırasında oluşabilecek zafiyetlerin önüne geçilmiştir. LWPCS ise prefabrik donatılı numunelerde önemli bir sorun olan ağırlık problemini belli ölçülerde aşmayı başarmıştır. Ağırlığı %40 oranında azalmasına rağmen kapasitesinde SCCPCS numunelerine göre bir düşüş görülmemiş aynı zamanda düktilite oranları sünek davranış sınırlar içerisinde kalmıştır. Hafif betonlu prefabrik yapıların imalatında özgül ağırlığı düşük tutmak kaydıyla dayanımı yüksek bir agrega kullanımı LWPCS numunelerinin düktilite problemini çözebilir.

8- PCS ile geleneksel donatı, maliyet etkinliği noktasında karşılaştırıldığında salt malzeme parametresi açısından PCS donatısı, geleneksel donatıya göre daha maliyetli görülebilir. Ancak işçilik ve zaman parametreleri göz önüne alındığında PCS donatısının daha ekonomik olabileceği görülür. İşçilik maliyetlerinin sürekli arttığı günümüzde fabrikasyon üretim teknikleri maliyetleri düşürmektedir. Lazer kesim tekniği ile üretilen PCS donatısında imalat süresi geleneksel donatıya göre daha kısadır. Ayrıca işçilik hataları kaynaklı malzeme fireleri de minimum düzeyde görülür. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde PCS donatısının kapasiteyi arttırması nedeniyle daha ekonomik tasarımlara imkân vermesi de inşaat maliyetlerini düşürebilecek bir diğer faktördür.

9- Yapılan çalışma sonucunda PCS donatısının, kirişlerin eğilme kapasitelerini arttırdığı net olarak anlaşılmıştır. Ancak numune sayılarının ve tiplerinin arttırılması suretiyle istatistiksel olarak daha anlamlı çalışmalar yapılabilir. Bu sayede henüz yeni

sayılabilecek ve hakkında diğer donatı sistemlerine kıyasla çok daha az çalışma bulunan bir donatı sistemi olan PCS donatısının davranışı daha net olarak anlaşılabilir. Özellikle PCS donatısının betonarme çerçeve sistemlerde göstereceği davranışın araştırılması bu yönde önemli bir adım olarak görülebilir. Önümüzdeki dönemde yapılacak bu çalışmaların, PCS donatısının inşaat sektöründe kullanılabilirliğinin anlaşılması, daha ekonomik tasarım ve çözümlerin önünü açması olasıdır.



KAYNAKLAR

- Al-Shaar, A.A.M., (2018). *Concrete filled steel tube composite beams and improvement of flexural performance*. Doktora Tezi. Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Gaziantep. 173s
- Han, L.-H., Li, W., Bjorhovde, R. (2014). Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members. *Journal of Constructional Steel Research*. 100, 211–228.
- Han, L.-H., Yao, G.-H., Zhao, X.-L. (2005). Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Journal of Constructional Steel Research*. 61(9), 1241–1269.
- DBJ/T13-51-2010, (2010). Technical Specification for Concrete-Filled Steel Tubular Structures. DBJ, Fuzhou (in Chinese).
- Elchalakani, M., Zhao, X.-L., Grzebieta, R. (2004). Concrete-filled steel circular 165 tubes subjected to constant amplitude cyclic pure bending. *Engineering Structures*. 26(14), 2125–2135.
- Varma, A. H., Ricles, J. M., Sause, R., Lu, L.-W. (2004). Seismic behavior and design of high-strength square concrete-filled steel tube beam columns. *Journal of Structural Engineering*. 130(2), 169–179.
- Shanmugam, N. E., Lakshmi, B. (2001). State of the art report on steel–concrete composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 57(10), 1041-1080.
- Han, L.-H. (2004). Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*. 60(2), 313–337.
- Uy, B. Liew J. Y. R. (2002) Composite steel–concrete structures. In: Chen WF, Richard Liew JY, editors. *Civil Engineering Handbook*. Boca Raton, CRC Press, (Bölüm 51).
- Furlong, R. W. (1967). Strength of steel-encased concrete beam columns. *Journal of the Structural Division*. 93(5), 113–124.
- Lu, Y. Q., Kennedy, D. J. L. (1994). The flexural behaviour of concrete-filled hollow structural sections. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 21(1), 111–130.
- Uy, B. (2000). Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling. *Journal of Structural Engineering*. 126(3), 341–352.
- Han, L.-H. (2004). Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*. 60(2), 313–337

- Chitawadagi, M.V, Narasimhan, M.C. (2009). Strength deformation behaviour of circular concrete filled steel tubes subjected to pure bending. *Journal of Constructional Steel Research*. 65(8), 1836–1845.
- Nghiem, A., Kang, T. H.-K., Lee, M., Ramseyer, C., Lee, C.-H. (2018). Flexural Testing of Circular Concrete-Filled Tubes without Axial Forces. *ACI Structural Journal*. 115(2), 511–524D.
- Al Zand, A.W., Badaruzzaman, W.H.W., Tawfeeq, W.M. (2020). New empirical methods for predicting flexural capacity and stiffness of CFST beam. *Journal of Constructional Steel Research*, 164, 105778.
- Al-Shaar, A. A., Göğüş, M. T. (2018). Flexural behavior of lightweight concrete and self-compacting concrete-filled steel tube beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 149, 153-164.
- Moon, J., Roeder, C. W., Lehman, D. E., Lee, H.-E. (2012). Analytical modeling of bending of circular concrete-filled steel tubes. *Engineering Structures*. 42, 349–361.
- Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L. (2002). FRP strengthened RC structures. *Frontiers in Physics*, 1, 266
- Mosallam, A. (2004). Composites: Construction materials for the new era. In *Advanced polymer composites for structural applications in construction* pp 45-58. Woodhead Publishing.
- Galati, N., Vollintine, B., Nanni, A., Dharani, L. R., Aiello, M. A. (2004). Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete. In *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction* pp. 501-508. Woodhead Publishing.
- Davalos, J. F., Chen, Y., Ray, I. (2008). Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(8), 722-730.
- Fico, R. (2007). *Limit states design of concrete structures reinforced with FRP bars*. Doktora Tezi. University of Naples Federico II. Napoli. 173s.
- GangaRao, H. V., Taly, N., Vijay, P. V. (2006). *Reinforced concrete design with FRP composites*. CRC press.
- Sim, J., Park, C. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512.
- Yavuz, G. (2011). Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. *Engineering Sciences*, 6(4), 1001-1015.

- Mahroug, M. E. (2014). *Behaviour of continuous concrete slabs reinforced with FRP bars. Experimental and computational investigations on the use of basalt and carbon fibre reinforced polymer bars in continuous concrete slabs*. Doktora Tezi. University of Bradford. West Yorkshire. 154 s
- Wu, W.P. (1990). *Thermo mechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bars* Doktora Tezi. West Virginia University. Morgantown. 292 s
- Halliwell, S. M. (2000). *Polymer composites in construction*. CRC press.
- Durmaz, N. (2018). *FRP donatılı beton döşemelerin eğilme davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya. 95 s
- Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Nanni, A., Bakis, C. E., Boothby, T. E. (1999). Evaluation of bond using FRP rods with axisymmetric deformations. *Construction and Building Materials*, 13(6), 299-309.
- Stites, J.D. (1943). Reinforcement bar and method of making same U.S. Patent No. 2,324,651.
- Jackson, J.G. (1947). Concrete structural element reinforced with glass filaments U.S. Patent No. 2,425,883.
- Chaallal, O., Benmokrane, B. (1996). Fiber-reinforced plastic rebars for concrete applications. *Composites Part B: Engineering*, 27(3-4), 245-252.
- Almusallam, T. H., Al-Salloum, Y. A., Alsayed, S. H., Amjad, M. A. (1997). Behavior of concrete beams doubly reinforced by FRP bars. In *Proceedings of the Third International Symposium on Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, 14–16 October, 1997, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, Vol. 2, pp. 471-478.
- Tezuka, M., Ochiai, M., Tottori, S., and Sato, R. (1995). Experimental study on moment redistribution of continuous beams reinforced or pretensioned with FRP. *2nd Int. Symp., Nonmetallic Reinforcement (FRP) for Concrete Struct.*, 23-25 August 1995, Ghent University, Belgium, ISBN: 0419205403 pp.387-394.
- Tighiouart, B., Benmokrane, B., Gao, D. (1998). Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Construction and Building Materials*, 12(8), 453-462.
- Grace, N.F., Soliman, A.K., Abdel-Sayed, G., Saleh, K.R. 1998. Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 2(4), 186-194.

- Razaqpur, A. G. and Mostofinejad, D. (1999). Experimental Study for Shear Behavior of Continuous Beams Reinforced with Carbon Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures. *Proceedings of the Fourth International Symposium*, 188, 169-178.
- Toutanji, H.A., Saafi, M. (2000). Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars. *Structural Journal*, 97(5), 712-719.
- Barris, C., Torres, L., Turon, A., Baena, M., Catalan, A. (2009). An experimental study of the flexural behaviour of GFRP RC beams and comparison with prediction models. *Composite Structures*, 91(3), 286-295.
- Rafi, M. M., Nadjai, A. (2009). Evaluation of ACI 440 Deflection Model for Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Beams and Suggested Modification. *ACI Structural Journal*, 106(6).
- Kassem, C., Farghaly, A.S., Benmokrane, B. (2011). Evaluation of flexural behavior and serviceability performance of concrete beams reinforced with FRP bars. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 682-695.
- Kara, I.F., Ashour, A.F. (2012). Flexural performance of FRP reinforced concrete beams. *Composite structures*, 94(5), 1616-1625.
- Brózda, K., Selejda, J., Koteš, P. (2017). The analysis of beam reinforced with FRP bars in bending. *Procedia engineering*, 192, 64-68.
- Hasan, H. A., Sheikh, M. N., Hadi, M. N. (2019). Maximum axial load carrying capacity of Fibre Reinforced-Polymer (FRP) bar reinforced concrete columns under axial compression. In *Structures* 19, 227-233
- Ruan, X., Lu, C., Xu, K., Xuan, G., Ni, M. (2019). Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars. *Composite Structures*, 235, 111772.
- Manual of Standard Practice Structural Welded Wire Reinforcement, (2016). Wire Reinforcement Institute, USA
- Morcous, G., Maguire, M., Tadros, M. K. (2011). Welded-wire reinforcement versus random steel fibers in precast, prestressed concrete bridge girders. *PCI journal*, 56(2), 113-120.
- Mo, Y. L., Kuo, J. Y. (1995). Effect of welding on ductility of rebars. *Journal of materials in civil engineering*, 7(4), 283-285.

- Razvi, S.R., Saatcioglu, M. (1989). Confinement of reinforced concrete columns with welded wire fabric. *Structural Journal*, 86(5), 615-623.
- Reiterman, R. 1992. Welded Wire Reinforcement for Columns. *ACI Structural Journal*: 473–474.
- Kusuma, B., Tavio, S., Suprobo, P. (2015). Behavior of Concentric Loaded Welded Wire Fabric Reinforced Concrete Columns with Varying Reinforced Grids and Ratios. *International Journal of ICT–aided Architecture and Civil Engineering*, 2(1), 1-14.
- Xuan, X.Y. (1987). Effectiveness of welded wire fabric as shear reinforcement in pretensioned prestressed concrete T-beams. Yüksek Lisans Tezi. University of Manitoba, Canada, 252 s.
- Akhnouk, A.K., Xie, H. (2010). Welded wire reinforcement versus random steel fibers in precast/prestressed ultra-high performance concrete I-girders. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2200-2207.
- Gilbert, R.I., Smith, S.T. (2006). Strain localization and its impact on the ductility of reinforced concrete slabs containing welded wire reinforcement. *Advances in Structural Engineering*, 9(1), 117-127.
- Tuladhar, R., Lancini, B.J. (2014). Ductility of concrete slabs reinforced with low-ductility welded wire fabric and steel fibers. *Struct. Eng. Mech*, 49(4), 449-461.
- Shwani, M., Tawadrous, R., Maguire, M. (2019). Ductility of Concrete Members Reinforced with Welded Wire Reinforcement (WWR). *Engineering Structures*, 191, 711-723.
- Zhu, M., Liu, J., Wang, Q., Feng, X. (2010). Experimental research on square steel tubular columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete under axial load. *Engineering Structures*, 32(8), 2278-2286.
- Wang, Q., Zhao, D., Guan, P. (2004). Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete. *Engineering Structures*, 26(7), 907-915.
- ANSI/AISC 360-16 (2016). Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, USA.
- Eurocode 2 (2004). Design of concrete structures–Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- Australian/New Zealand Standard (2017). Composite structures–composite steel-concrete construction in buildings.

- Bogdan, T., Chrzanowski, M., Odenbreit, C. (2019, October). Mega columns with several reinforced steel profiles—experimental and numerical investigations. *Structures* 21, 3-21.
- Lai, B., Liew, J. R., Venkateshwaran, A., Li, S., Xiong, M. (2020). Assessment of high-strength concrete encased steel composite columns subject to axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 164, 105765.
- Lai, B., Liew, J. R., Wang, T. (2019). Buckling behaviour of high strength concrete encased steel composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 27-42.
- Filion, I. (1998). Étude Expérimentale des Poteaux Mixtes Avec Section d'acier de classe 4. *Report no. EPM/GCS 1998-06, Dept. of Civil, Geological and Mining Engineering.*
- Tremblay, R., Massicotte, B., Filion, I., Maranda, R. (1998). Experimental study on the behaviour of partially encased composite columns made with light welded H steel shapes under compressive axial loads. *SSRC Annual Technical Meeting*, September 1998, Atlanta, USA (pp. 195-204).
- Chicoine, T., Tremblay, R., Massicotte, B., Yalcin, M., Ricles, J., Lu, L.-W. (2000). "Test Programme on Partially-Encased Built Up Three-Plate Composite Columns." *JointReport EPMZGCS No. 00-06*, February, Dept, o f Civil, Geological and MiningEngineering, Ecole Polytechnique, Montreal, Canada- ATLSS Engineering Research Centre, No. 00-04, Lehigh University, Bethlehem, USA
- Chicoine, T., Massicotte, B., Tremblay, R. (2003). Long-term behavior and strength of partially encased composite columns made with built-up steel shapes. *Journal of Structural Engineering*, 129(2), 141-150.
- Gutiu, S. I., Moga, C., Petran, I., Urian, G. (2006). Shear Connection Design of Concrete-Encased Steel Section Columns. " *Ovidius" University Annals Constantza. Series Civil Engineering*, 1(8), 7.
- Begum, M., Driver, R. G., Elwi, A. E. (2013). Behaviour of partially encased composite columns with high strength concrete. *Engineering Structures*, 56, 1718-1727.
- Lai, B., Liew, J.R., Xiong, M. (2019). Experimental study on high strength concrete encased steel composite short columns. *Construction and Building Materials*, 228, 116640.
- Mao, X., Kodur, V. K. R. (2011). Fire resistance of concrete encased steel columns under 3- and 4-side standard heating. *Journal of constructional steel Research*, 67(3), 270-280.

- Jiang, Y., Hu, X., Hong, W., Wang, B. (2016). Experimental study and theoretical analysis of partially encased continuous composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, 152-160.
- Chen, L.H., Li, S.T., Zhang, H.Y., Wu, X.F. (2018). Experimental study on mechanical performance of checkered steel-encased concrete composite beam. *Journal of Constructional Steel Research*, 143, 223-232.
- Kabir, M.I., Lee, C.K., Rana, M.M., Zhang, Y. X. (2019). Flexural and bond-slip behaviours of engineered cementitious composites encased steel composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 157, 229-244.
- Li, X., Lv, H., Zhou, S. (2012). Flexural behavior of GFRP-reinforced concrete encased steel composite beams. *Construction and Building Materials*, 28(1), 255-262.
- Shamsai, M., Sezen, H. (2005). *U.S. Patent Application No. 10/932,560*.
- Shamsai, M. (2006). *Prefabricated cage system for reinforcing concrete members*. Doctoral dissertation, The Ohio State University, Ohio. 340s.
- Sezen, H., Shamsai, M. (2008). High-strength concrete columns reinforced with prefabricated cage system. *Journal of structural Engineering*, 134(5), 750-757.
- Shamsai, M., Sezen, H. (2011). Behavior of square concrete columns reinforced with Prefabricated Cage System. *Materials and Structures*, 44(1), 89-100.
- Shamsai, M., Whitlatch, E., Sezen, H. (2007). Economic evaluation of reinforced concrete structures with columns reinforced with prefabricated cage system. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(11), 864-870.
- Fisher, M. J., Sezen, H. (2011). Behavior of exterior reinforced concrete beam-column joints including a new reinforcement. *Structural Engineering and Mechanics*, 40(6), 867-883.
- Chithra, R., Thenmozhi, R. (2011). Strength and ductility of concrete cylinders reinforced with prefabricated steel cage. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(9), 6931-6939.
- Kesavan, G., Jayabharath, P., Bhuvaneshwari, V. (2018). High Strength Reinforced Concrete Column With Prefabricated Cage System. *International Journal Of Creative Research Thoughts*, 6(2), 1977-1983.
- Rethnasamy, C., Rajagopal, T., Muthuraj, H. (2013). Bending behavior, deformability and strength analysis of Prefabricated Cage Reinforced Composite beams. *Construction and Building Materials*, 38, 482-490.

- Kewei, D.I.N.G., ZHANG, W. (2016). Comparison on Mechanics Performance of Concrete Column Frame Structure with Prefabricated Cage System. In *2016 International Conference on Architectural Engineering and Civil Engineering*. Atlantis Press.
- Liu, Y., Zhu, S. (2019). Finite element analysis on the seismic behavior of side joint of Prefabricated Cage System in prefabricated concrete frame. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(5), 1095-1104.
- ASTM C618-03, (2004). Standard specification for fly ash and raw calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C39/C39M, (2014). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- EFNARC, (2005). guidelines for self-compacting concrete, EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK.
- ASTM C-567, (2004). Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete. Annual Book of ASTM Standards, 1-4.
- ASTM E8, (2016). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- ASTM A370, (2014). Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM E350-12, (2012). Standard test methods for chemical analysis of carbon steel, low-alloy steel, silicon electrical steel, ingot iron and wrought iron American society for testing and materials, Philadelphia.
- Chen, J., Wang, J., Xie, F., Jin, W. L. (2016). Behavior of thin-walled dodecagonal section double skin concrete-filled steel tubes under bending. *Thin-Walled Structures*, 98, 293-300.
- Zakaria, M., Ueda, T., Wu, Z., Meng, L. (2009). Experimental investigation on shear cracking behavior in reinforced concrete beams with shear reinforcement. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(1), 79-96.
- Park, R. (1988). Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. In *Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering, Tokyo-Kyoto, Japan* (Vol. 8, pp. 605-616).
- Naaman, A. E., Jeong, S. M. (1995). 45 Structural ductility of concrete beams prestressed with frp tendons. In *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures:*

- Proceedings of the Second International RILEM Symposium* (Vol. 29, p. 379). CRC Press.
- Mali, P. R., Datta, D. (2020). Experimental evaluation of bamboo reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 28, 101071.
- Kumar, V., Iqbal, M.A., Mittal, A.K. (2018). Study of induced prestress on deformation and energy absorption characteristics of concrete slabs under drop impact loading. *Construction and Building Materials*, 188, 656-675.
- Moulika, D.N., Vasireddy, R., Raju, P.P. (2017). Modelling and Analysis of Reinforced Concrete Beam Under Flexure Using Ansys. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(3).
- Suresh, G.S., Kulkarni, S. (2016). Experimental study on behaviour of RC deep beams. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- Rousseau, J., Marin, P., Daudeville, L. (2007). Discrete element modeling of reinforced concrete with a particular steel-concrete interface. Discrete Element Group for Hazard Mitigation.
- Köksal, O., Doran, B., 1997, Beton ve Betonarme Elemanlarda Doğrusal Olmayan Oktahedral Elastik ve Plastik Bağlıntılar Kullanılarak Yapılan Sonlu Eleman Uygulamaları, İMO Teknik Dergi, 1445-1455.
- Al-Shaar, A.A., Göğüş, M. T. (2018). Flexural behavior of lightweight concrete and self-compacting concrete-filled steel tube beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 149, 153-164.
- Liao, F.Y., Han, L.H., He, S.H. (2011). Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(12), 1922-1935.
- Ashour, S.A. (2000). Effect of compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behavior of high-strength concrete beams. *Engineering structures*, 22(5), 413-423.
- Sin, L.H., Huan, W.T., Islam, M.R., Mansur, M.A. (2011). Reinforced Lightweight Concrete Beams in Flexure. *ACI Structural Journal*, 108(1).
- Grace, N.F., Soliman, A.K., Abdel-Sayed, G., Saleh, K.R. (1998). Behavior and ductility of simple and continuous FRP reinforced beams. *Journal of composites for construction*, 2(4), 186-194.

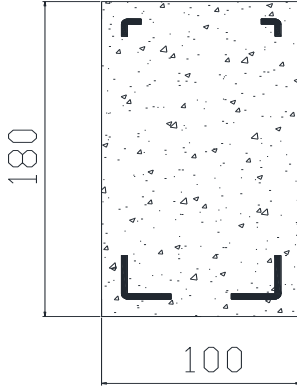
Cladera, A., Marí, A., Ribas, C., Bairán, J., Oller, E. (2015). Predicting the shear–flexural strength of slender reinforced concrete T and I shaped beams. *Engineering Structures*, 101, 386-398





EKLER

EK-1 Çift Donatılı Kiriş Kesitin Teorik Taşıma Gücü Hesabı



Beton sınıfı: C25

Donatı sınıfı: S235JR

$$A_S = 280,72 \text{ mm}^2$$

$$A'_S = 101,05 \text{ mm}^2$$

Cekme donatısı oranı:

$$\rho = \frac{A_S}{b \cdot d} = \frac{280,72}{100 \cdot 170} = 0,0165$$

Basınc donatısı oranı:

$$\rho' = \frac{A'_S}{b \cdot d} = \frac{101,05}{100 \cdot 170} = 0,00594$$

Minimum donatı oranı:

$$\rho_{min} = 0,8 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,8 \cdot \frac{1,16}{204,34} = 0,00454$$

Dengeli donatı oranı kontrolü:

$$\rho_b = 0,85 \cdot k \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left[\frac{600}{600 + f_{yd}} \right] = 0,85 \cdot 0,85 \cdot \frac{16,67}{204,34} \cdot \left[\frac{600}{600 + 204,34} \right] = 0,044$$

$$\rho - \rho' \leq 0,85 \rho_b = 0,0105 \leq 0,0374$$

EK-1 (Devam) Çift Donatılı Kiriş Kesitin Teorik Taşıma Gücü Hesabı

Basınc donatısı oranı kontrolü:

$$\rho - \rho' \geq 0,85k \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left[\frac{600}{600 - f_{yd}} \right] \frac{d'}{d} = 0,72 \frac{16,67}{204,34} \left[\frac{600}{600 - 204,34} \right] \frac{10}{170} = 0,00526$$

$$0,0105 \geq 0,00526$$

Denge denklemi:

$$F_c + F'_s = F_s$$

$$0,85f_{cd}ba + A'_sf_{yd} = A_sf_{yd}$$

$$0,85 \cdot 16,67 \cdot 100 \cdot a + 101,05 \cdot 204,05 = 280,72 \cdot 204,05$$

$$a = 25,79\text{mm}$$

Taşıma gücü hesabı:

$$M_r = (A_sf_{yd} - A'_sf_{yd}) \left[d - \frac{a}{2} \right] + A'_sf_{yd}(d - d')$$

$$M_r = (280,72 \cdot 204,34 - 101,05 \cdot 204,34) \left[170 - \frac{25,79}{2} \right] + 101,05 \cdot 204,34 \cdot 160 = 9,05 \text{ kNm}$$

Minimum kesme donatısı kontrolü

$$\frac{A_{sw}}{S} \geq 0,3 \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} b = \frac{56,54}{100} \geq 0,3 \frac{1,16}{204} 100 = 0,56 \geq 0,17$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Abdülkadir GÜLEÇ
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 29.05.1984 Gaziantep
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (344) 2802518
e-posta : abdulcadir.gulec@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	KSÜ/İnşaat Mühendisliği	2020
Yüksek lisans	İTÜ /İnşaat Mühendisliği	2010
Lisans	YTÜ/İnşaat Mühendisliği	2007
Lise	Gaziantep Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-	KSÜ	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

Gulec, A., Kose, M. M., & Gogus, M. T. (2020). An analysis of the usability of prefabricated cage-reinforced composite beams with self-compacting and lightweight concrete under flexural loads. *Construction and Building Materials*, 255, 119274.

Aycı, H., Özer, D. G., & Güleç, A. (2020). A Spatial Analysis of Gaziantep Railway and Its Station Throughout History. *Periodica Polytechnica Architecture*.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings)

basılan bildiriler:

Gulec, A., Kose, M. M., & Gogus, M. T., (2019). Farklı Kesme Donatısı Oranlarına Sahip Prefabrik Donatılı Kirişlerin Eğilme Performansının İncelenmesi, *International The 1st Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering Conference, İskenderun, Türkiye*

Gulec A., Başa N., Dağ R., (2018). Pirit Madeninin Betonda Çimento Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Zeugma I. Uluslararası Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, Gaziantep, Türkiye*

Gulec A., (2018) Fluorit Madeninin Betonda Agrega Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması *UMTEB III. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi, Gaziantep, Türkiye*

Gulec A., (2018) Fluorit Madeninin Betonda Çimento Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması *UMTEB III. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi, Gaziantep, Türkiye*

Hobiler

Basketbol, boks, satranç