



Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans

Çetin Akan

ORCID 0000-0003-2807-4266

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Alper Çankaya

Temmuz 2022

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Çetin Akan** tarafından hazırlanan **Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

ONAYLAYANLAR:

Tez Danışmanı: **Dr. Öğr. Üyesi M. Alper ÇANKAYA**
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Mutlu SEÇER
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Selçuk SAATCI
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Savunma Tarihi: 04.07.2022

Yazarlık Beyanı

Ben, **Çetin Akan**, başlığı **Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Yüksek Lisans derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta buldum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

İmza:

Tarih:

04.07.2022

Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi

ÖZ

Bu çalışmada, kanca uçlu çelik ve polipropilen liflerin çift donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal tekniklerle incelenmiştir. Bu amaçla laboratuvar koşullarında iki gruptan oluşan toplam sekiz adet büyük ölçekli kiriş numunesi imal edilmiştir. Daha sonra doğrusal artan yük altında üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Gruplardaki kirişler %0.86 ve %1.30 olmak üzere iki farklı çekme donatı oranına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Seçilen oranlar, eğilme veya kesme kritik kiriş davranışına yol açmıştır. Sekiz numuneden üçü kontrol numunesi olarak üretilmiş ve herhangi bir lif katkısı içermemiştir. Kirişlerin geri kalanı hacimce %0, 0.5 ve 1.0 çelik veya polipropilen (PP) life sahiptir. Deneysel sonuçlar, görece yüksek oranda boyuna donatı oranına sahip numunelerde (B1 serisinde olduğu gibi), %0.5 oranında çelik veya PP lif kullanımının eğilme kapasitesine herhangi bir katkıda bulunmadığını; ancak bunun yerine, kesme kapasitesini artırarak mevcut eğilme kapasitesinin tümüyle kullanılmasına imkan verdiği göstermiştir. Bununla birlikte, çelik lif oranı %1.0' a yükseltildiğinde, her iki kiriş grubunda da eğilme kapasitesi %10 artmıştır. Deneysel çalışmadan sonra kirişler Değiştirilmiş Basınç Alanları Teorisi (İng. Modified Compression Field Theory, MCFT) temelli doğrusal olmayan sonlu elemanlar yazılımı VecTor2 kullanılarak nümerik olarak modellenmiştir. Akma öncesi eğilme rijitliği ve akma ile yük taşıma kapasitelerinin etriye ve çelik liflere sahip kiriş deneyleriyle uyumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Lif katkılı betonarme, lifli betonarme kirişlerin eğilme davranışı, polipropilen ve kanca uçlu çelik lifler, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi

Experimental and Numerical Investigation of Fiber Reinforced Concrete Beams

Abstract

In this study, the effects of hooked end steel and polypropylene fibers on the behavior of doubly reinforced concrete beams subjected to flexure was studied using experimental and numeric techniques. For this purpose, a total of eight large scale beam specimens consisting of two groups were manufactured in the laboratory conditions. Afterwards, three-point bending tests were carried out under monotonically increasing load. The beams in the groups were designed to have two different tensile reinforcement ratios as 0.86 and 1.30%. Selected ratios led to either flexural or shear critical beam sections. Three out of eight were produced to be control specimens and did not have any fiber additive. Rest of the beams had 0, 0.5 and 1.0% steel or polypropylene (PP) fibers by volume. Experimental results revealed that existence of 0.5% either type of fiber in densely reinforced specimens (B1 series) contributed on shear strength and allowed flexural capacities to be fully used instead of an enhancement in the capacity. However, when the steel fiber ratio increased to 1.0%, flexural capacity was improved by 10% for both type of beams. After the experimental study, the beams numerically modelled using Modified Compression Field Theory (MCFT) based nonlinear finite element method using VecTor2 software. Flexural stiffness before yielding and yield strength with load carrying capacities were found out to be consistent with that of experiments specifically for the beams having stirrup and steel fibers.

Keywords: Fiber-reinforced concrete (FRC), bending behavior of FRC beams, polypropylene and hooked end steel fibers, nonlinear finite element analysis

Teşekkür

Bu çalışma, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 2021-TYL-FEBE-002 proje numarasıyla finanse edilmiştir. Ayrıca, bölümümüz laboratuvar altyapısı deneysel çalışmaların yürütülmesine imkân sağlamıştır. Üniversitemize ve bünyesindeki İnşaat Mühendisliği Bölümüne sağladığı olanaklardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez danışmanım Dr. Mehmet Alper ÇANKAYA, yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşmış, yardımlarını esirgememiştir. Kendisine ve değerli jüri üyelerim Dr. Mutlu SEÇER ile Dr. Selçuk SAATCİ' ye katkılarından dolayı teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Son olarak aileme bana sağladıkları eğitim imkanları ve hayatım boyunca gösterdikleri destekten dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

İçindekiler

Yazarlık Beyanı.....	ii
Öz.....	iii
Abstract	iv
Teşekkür.....	v
Şekiller Listesi.....	ix
Tablolar Listesi.....	xi
Kısaltmalar Listesi	xii
Semboller Listesi.....	xiii
1 Giriş.....	1
1.1 Genel.....	1
1.2 Literatür Taraması	1
1.3 Amaç ve Kapsam.....	7
1.4 Tez Organizasyonu.....	8
1.4.1 Bölüm 1 Giriş.....	8
1.4.2 Bölüm 2 Deneysel Çalışma.....	8
1.4.3 Bölüm 3 Statik Testler	8
1.4.4 Bölüm 4 Bilgisayar Destekli Analiz	9
1.4.5 Bölüm 5 Sonuç.....	9
2 Deneysel Çalışma.....	10
2.1 Giriş.....	10
2.2 Deney Düzenegi	10
2.3 Numune Kapasite Hesapları	12

2.3.1 Etriyesiz B1 Kontrol Numunesi Akma Kapasitesi (M_y).....	12
2.3.2 Etriyesiz B1 Kontrol Numunesi Nihai Kapasite (M_r).....	14
2.3.3 Etriyesiz B2 Kontrol Numunesi Akma Kapasitesi (M_y).....	15
2.3.4 Etriyesiz B2 Kontrol Numunesi Nihai Kapasite (M_r).....	16
2.4 Deney Numuneleri	17
2.5 Beton Karışımı ve Lifler.....	19
2.5.1 Çelik Lif (ÇL)	21
2.5.2 Polipropilen Lif (PPL)	23
3 Statik Testler	25
3.1 Giriş.....	25
3.2 Yükleme Programı	25
3.3 Yük-Deplasman İlişkileri	26
3.4 Numune Hasarları.....	30
3.5 Süneklik.....	33
3.6 Karşılaştırmalı Sonuçlar	34
4 Bilgisayar Destekli Analiz	36
4.1 Giriş.....	36
4.2 Nümerik Modelleme.....	36
4.3 Analiz Sonuçları ve Tartışma	40
5 Sonuçlar	46
Kaynakça	48
Ekler	51
Ek A	52
A.1 Veri Edinim Sistemi.....	53
A.2 Tek Eksenli Gerinim Ölçer	54
A.3 Lineer Potansiyometrik Cetvel	55
A.4 Yük Hücresi	56

Özgeçmiş	58
----------------	----

Şekiller Listesi

Şekil 1	Betonarmede lif kullanım örnekleri: Klasik donatılı (a) ve lifli (b) betonarme tünel segmenti [6]. Beton yol (c) [7].	2
Şekil 2	Deney düzeneği	11
Şekil 3	Kullanılan deney ekipmanları	11
Şekil 4	Kalıpların genişliği ve boyu	17
Şekil 5	B1-kontrol (etriyeli) kirişine ait en ve boy kesiti	18
Şekil 6	B1-kontrol (etriyesiz), B1-ÇL05, B1-ÇL10, B1-PPL05 kirişlerine ait en ve boy kesiti	18
Şekil 7	B2-kontrol (etriyesiz), B2-ÇL10, B2-PPL05	19
Şekil 8	Laboratuvar tipi betonyer	19
Şekil 9	Beton döküm aşamaları	20
Şekil 10	Yaygın olarak kullanılan ÇL tipleri [19].....	21
Şekil 11	Çalışmada kullanılan ÇL	22
Şekil 12	Çalışmada kullanılan PPL	23
Şekil 13	Deneye hazır numune ve düzeneğin genel görünümü	26
Şekil 14	B1 serisinin ait yük-deplasman ve gerinim ölçer-deplasman eğrileri	28
Şekil 15	B2 serisinin ait yük-deplasman ve gerinim ölçer-deplasman eğrileri	29
Şekil 16	B1 serisinde gözlemlenen hasar durumları, (a) B1-kontrol (etriyesiz), (b) B1-kontrol (etriyeli), (c) B1-ÇL05, (d) B1-ÇL10, (e) B1-PPL-05, (f) B2-kontrol (etriyesiz), (g) B2-ÇL10, (h) B2 PPL05.	32
Şekil 17	Numunelerin süneklik katsayısı	33
Şekil 18	B1 ve B2 serisine ait yük-deplasman grafiği	35
Şekil 19	Görev tanımlama paneli	37
Şekil 20	Malzeme özellikleri veri giriş penceresi	38
Şekil 21	Çelik donatı malzeme özellikleri veri giriş penceresi	39
Şekil 22	Katı model atama pencereleri.....	40
Şekil 23	Kiriş sonlu elemanlar modeli	40

Şekil 24	B1 serisi kiriş numunelerinin deneysel ve nümerik olarak elde edilen yük-orta nokta deplasman karşılaştırması	41
Şekil 25	B1 serisi kirişlerinin nihai yükleme esnasında hasar durumları: (a) B1-kontrol (etriyesiz), (b) B1-kontrol (etriyeli), (c) B1-ÇL05, (d) B1-ÇL10, (e) B1-PPL-05.	43
Şekil 26	B2 serisi kiriş numunelerinin deneysel ve nümerik olarak elde edilen yük-orta nokta deplasman karşılaştırması	44
Şekil 27	B2 serisi kirişlerinin nihai yükleme esnasında hasar durumları: (a) B2-kontrol (etriyesiz), (b) B2-ÇL10, (d) B2-PPL-05	45

Tablolar Listesi

Tablo 1	Numunelere ait donatı ve lif (ÇL ve PPL) miktarları.....	18
Tablo 2	Bir kiriş için karışım oranları	20
Tablo 3	Çalışmada kullanılan ÇL özellikleri.....	22
Tablo 4	Kullanılan PPL'nin malzeme özellikleri	24
Tablo 5	Numunelere ait yük-deplasman verileri	29
Tablo 6	Malzemeler ve seçilen bünyesel modelleri	38

Kısaltmalar Listesi

ÇL	Çelik Lif
PPL	Polipropilen Lif
DBAT (İng. MCFT)	Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisi (İng. Modified Compression Field Theory)

Semboller Listesi

ε_s	Çekme donatısı şekil değiştirmesi
ε_s'	Basınç donatısının şekil değiştirmesi
ε_c	Beton basınç şekil değiştirmesi
ε_t	Beton çekme şekil değiştirmesi
ε_{cr}	Beton çatlama şekil değiştirmesi
F_s	Çekme donatısı kuvveti
F_s'	Basınç donatısı kuvveti
F_c	Beton basınç kuvveti
$M_{c(N:A)}$	Tarafsız eksene göre beton basınç kuvvet momenti
M_s	Tarafsız eksene göre çekme donatısı kuvvet momenti
M_s'	Tarafsız eksene göre basma donatısı kuvvet momenti
M_{Ts}	Tarafsız eksene göre çekme rijitleşmesi kuvvet momenti
ΣM	Toplam moment
σ_t	Beton çekme gerilmesi
σ_c	Beton basınç dayanımı
σ_{cr}	Beton çatlama dayanımı
E_c	Beton elastisite modülü
T_s	Çekme rijitleşmesi kuvveti
d_z	Çekme rijitleşme bölgesi yüksekliği
M_p	Plastik moment kapasitesi
M_r	Nihai moment kapasitesi
M_{ry}	Akma moment kapasitesi
μ	Süneklik katsayısı

Bölüm 1

Giriş

1.1 Genel

Beton, dünyada ve ülkemizde inşaat mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir yapı malzemesidir. Su, çimento ve agreganın belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen beton, doğası gereği yük altında gevrek bir davranışa sahip olup, çatlamaya karşı dirençli bir malzeme değildir. Çekme ve eğilme mukavemetine kıyasla yüksek basma dayanımına sahip olması en önemli mekanik özelliği olmasına rağmen, betonarme bir kesitte basma kapasitesinin tamamen kullanılabilmesi çekme donatısı bulundurulmasıyla mümkün olmaktadır. Bununla birlikte son yıllarda yapılan araştırmalar, beton malzemeye lif (örn. çelik lif) katkısının çekme dayanımı ve sünekliğini artırdığı, çatlak genişliği sınırlayarak malzeme dayanıklılığına (durabilite) katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur.

1.2 Literatür Taraması

Betonarmede lif kullanımı son yıllarda farklı tip inşaat mühendisliği yapılarında sıklıkla görülse de çoğunlukla kritik olmayan ya da yük taşıma özelliği bulunmayan elemanlarda çatlak kontrolü ve dayanıklılığın (durabilitenin) sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına örnek olarak endüstriyel bina temel ve döşemeleri, prefabrik tünel segmentleri [1] (Şekil 1a-b) ve beton yol kaplamaları, (Şekil 1c), [2] ve [3] gösterilebilir.

Son 20 yıllık dönemde pek çok araştırmacı özellikle kiriş gibi yük taşıyıcı elemanlarda lif kullanımının mekanik davranışa etkisini incelemiştir. Bunun için lifli betonarmenin

kesme ve eğilme karakteristikleri araştırılmıştır. Betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerine yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde, genellikle basınç donatısı barındırmayan kirişlerin dört nokta yükleme deneyi ile test edildikleri görülmüştür [4]. Araştırılan konular çoğunlukla çelik liflerin (ÇL) türü, boyu, oranı gibi parametrelerin davranışa etkileri üzerine odaklanmıştır [5]. Bu konuda yürütülen başlıca çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 1: Betonarmede lif kullanım örnekleri: Klasik donatılı (a) ve lifli (b) betonarme tünel segmenti [6]. Beton yol (c) [7].

Karimipoura ve Ghalehnovib [6] tarafından 2021 yılında yürütülen deneysel çalışmada betonarme kirişlerde ÇL, PPL ve inşaat molozundan geri kazanılmış iri agrega

kullanımının eğilme ve kesme davranışı üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaç için 150x200x1500 mm ayırlara sahip 54 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişler, üçerli gruplara ayrılarak değerlendirilmiştir. Gruplardaki değişkenler şu şekilde sıralanmıştır: (1) Etriyeler arası mesafe, (2) hacimce %0, 1.0 ve 2.0 oranında bulundurulmuş ÇL ve PPL'ler (3) beton karışımındaki normal iri agrega miktarının kütlece %0, 50 ve 100'ü kadar geri dönüştürülmüş inşaat molozu (iri agrega). Ayrıca tüm numunelerde boyuna donatı oranı sabit tutulmuştur (%2.0). Kiriş imalatının tamamlanmasıyla dört nokta basma deneylerine geçilmiş ve geri dönüştürülmüş iri agregalı kirişlerde PPL ve ÇL katkısının eğilme kapasitesinde artışa neden olduğu ortaya konmuştur. Diğer taraftan, bu liflerin kiriş sünekliğini de artırdığı rapor edilmiştir. Fakat PPL'lerin eğilme kapasitesinde daha belirgin bir artışa yol açtığı; ÇL'lerin ise süneklikte daha belirgin bir rol oynadığı rapor edilmiştir.

Folino vd. [7] tarafından 2019 yılında yürütülen deneysel çalışmada 120x300x2400 mm ayırlara sahip 24 adet prizmatik betonarme kiriş dört nokta basma düzeneği ile test edilmiştir. Kiriş betonlarında üç farklı ÇL oranı kullanılmıştır. Bunlar, 40 ve 60 kg/m³'lük ÇL oranına sahip beton karışımları ile lifin hiç bulunmadığı karışımdır. Ayrıca, numune boyuna donatı oranları eğilme ve kesme kırılmasına yol açacak şekilde %0.70 ve 1.50 seçilmiştir. Bununla birlikte, düşük boyuna donatı oranına sahip numunelerde etriyeler de kullanılmıştır. Deneylerin tamamlanmasıyla eğilme kritik numunelerde lif oranının mekanik davranışa etkisinin oldukça sınırlı kaldığı anlaşılmıştır. Sadece yüksek dozajda lif konulması durumunda maksimum yükte göz ardı edilebilecek kadar az bir artış ve donatıların akmasına karşı gelen kiriş deplasmanında da bir miktar düşüş tespit edilmiştir. Fakat boyuna donatı oranının artması numune davranışını tamamen değiştirmiştir. Öyle ki; kesme dayanımı bu tip kirişlerde liflerin varlığına bağlı olarak artmış ve kırılma tipi ise eğilmeye dönüşmüştür.

Saatçi ve Batarlar [8] tarafından 2017 yılında yapılan deneysel çalışmada ise ÇL katkısının farklı boyuna donatı oranlarına sahip etriyesiz betonarme kirişlerde eğilme davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Bunun için %0.3 ve %1.2 boyuna donatı oranına sahip, 150x250x2300 mm prizmatik geometrili sekiz adet kirişten oluşan iki grup betonarme kiriş İzmir Yüksek Teknoloji Laboratuvarlarında üretilmiş ve üç nokta basma deneyi ile test edilmiştir. Her bir grupta lif katkısı olmayan birer kontrol

numunesi bulundurulmuş ve geriye kalan numunelerde üç farklı hacimsel oranda ÇL kullanılmıştır. Bunlar, %0.5, 1 ve 1.5' tir. Deneyleerin tamamlanmasıyla, düşük boyuna donatı oranına sahip numunelerde ÇL katkısının eğilme kapasitesini %50' ye yakın oranda artırdığı ancak hasarın tek bir çatlakta yoğunlaşmasıyla boyuna donatıda kopmaya sebep olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ÇL katkısız kirişle kıyaslandığında bu kirişlerde yük altında deplasman yapabilme kapasitesinin ciddi oranda kaybedildiği anlaşılmıştır. Ani kesme kırılması sergileyen yüksek boyuna donatı oranına sahip ikinci grup kirişlerde ise ÇL katkısı etriye görevi görmüş ve davranışı sünek eğilme göçmesine çevirmiştir. Her iki grupta ÇL oranının artırılması çatlak dağılımı üzerine etkili olmuştur.

Amin ve Foster [9] tarafından 2016 yılında yürütölen deneysel çalışmada 300x700x5000 mm ayrıtlara sahip 10 adet kiriş numunesi imal edilmiş ve sonrasında dört nokta basma düzeneğiyle test edilmiştir. Numuneler kesme kritik elemanlar olarak tasarlanmıştır. Bir başka değişle hiçbir eleman eğilme kapasitesini tamamıyla kullanamamıştır. Çalışmada etriye ve ÇL oranı değişken parametreler olarak seçilmiş olup; numunelerden ikisi hiç etriyeye sahip olmazken diğer ikisinde ise hiç lif bulundurulmamıştır. Deneyleerin sonunda 25 kg/m³ ÇL'li numunenin Eurocode 2' de [10] önerilen minimum etriye oranlı kirişteki benzer bir kesme kapasitesi sergilediği ortaya konmuştur. Ancak etriyeli kiriş yük taşıma kapasitesindeki düşüş lifli kirişteki kadar ani olmamış ve görece daha sünek davranış ortaya koymuştur. Ayrıca genel olarak numunelerdeki lif oranı artışının daha dar çatlaklar oluşturduğu fakat sayılarını artırdığı rapor edilmiştir.

Sahoo vd. [11] tarafından 2014 yılında yürütölen deneysel çalışmada, lif tipinin ve oranının büyük ölçekli betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaç için 150x200x1800 mm ayrıtlara sahip yedi adet betonarme kiriş numunesi imal edilmiş ve dört nokta eğilme testleri tamamlanmıştır. Kirişlerden bir tanesi kontrol numunesi olarak tasarlanmış olup lif katkısı bulunmamaktadır. Diğer numunelerin ikisinde hacimce %0.5 ve %1.0 oranında çelik, birinde %1.0 oranında PPL ve üçünde ise farklı oranlarda karıştırılmış ÇL ve PPL kullanılmıştır. Ayrıca, tüm kirişlerde boyuna donatı oranı sabit tutulmuş (%1.35) ve ani kesme kırılmasını önlemek amacıyla etriye bulundurulmuştur. Deneyleerden elde edilen bulgular, ÇL katkısının yük taşıma kapasitesini artırdığını, %1.0 oranında PPL katkısının ise

süneklikte ciddi bir artışa neden olduğunu, tekil veya hibrit lif katkısının pik yük sonrası davranışı iyileştirdiğini ve hasar mekanizmasının mevcut boyuna donatı oranında %1.0' e kadar çelik veya PPL bulunması durumunda değişmediğini ortaya koymuştur.

Meda vd. [12] tarafından 2012 yılında yapılan deneysel çalışmada ÇL katkılı betonarme kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Bu amaç için 200x300x4000 mm prizmatik geometriye sahip yedi adet kiriş numunesi üretilmiş ve bu numuneler dört nokta basma düzeneği ile göçme anına dek yüklenmiştir. Kirişler %0.75 ve %1.5 çekme donatısı oranı ile %0.38 ve %0.76 (30 ve 60 kg/m³) ÇL oranına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneyler tamamlandıktan sonra özellikle yüksek lif oranında kiriş göçme modlarının basma bölgesi beton ezilmesinden çekme donatısının kopmasına dönüştüğü rapor edilmiştir. Bununla birlikte, lifler, özellikle yüksek donatı oranına sahip kirişlerde miktar ve özelliklerine bağlı olarak beton basma bölgesinde tokluğu artırmış ve dolayısıyla söz konusu bölgede betonun ezilerek patlamasına engel olmuştur. Ayrıca, kirişlerde lif ilavesine bağlı yük taşıma kapasitesindeki artışın lifli beton tokluğu (ing. toughness) ile boyuna donatı oranı arasındaki ilişkiye bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Yardımcı [13] tarafından 2007 yılında yapılan bir çalışmada, ÇL içeren ve kendiliğinden yerleşen betonların mekanik, reolojik ve kırılma özellikleri incelenmiştir. Bunun için tepki yüzeyi yöntemi ile ÇL'li kendiliğinden yerleşen betonların optimizasyonu ve performansa dayalı tasarımı yapılmıştır. Karışımın ince agrega kaba agrega oranının etkisi incelenmiştir. Hem lifli hem lifsiz karışımların kırılma enerjileri, çentikli eğilme örnekleri üzerinde kapalı çevrimli deplasman kontrollü eğilme cihazı ile gerçekleştirilmiş olup üç noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. ÇL'li kendiliğinden yerleşen betonda ÇL'nin narinliği ve miktarının artırılması ile çekme dayanımı ve eğilme dayanımında artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre; lif oranının 40 kg/m³ ve üzeri olduğu değerlerde, 55 ve 80 narinliğe sahip lifli betonun yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımında belirgin bir artış elde edildiği görülmüştür. 1.50 – 1.75 adet/cm² ve narinliği 55 olan lifler kullanıldığında 2000 N/m'lik bir kırılma enerjisi seviyesi elde edilirken aynı kırılma enerjisi için 0.50 – 0.75 adet/cm² ve narinliği 80 olan lifler kullanıldığında yeterli

olmaktadır. Yüksek narinlikteki lifler kullanıldığında daha az sayıda lif adeti yeterli olduğu saptanmıştır.

Özcan [14] tarafından 2006 yılında yürütülen çalışmada ise 30 kg/m³ ÇL katkılı/katkısız ve 20 MPa beton basınç dayanımına sahip betonarme kirişlerin statik yükler altındaki davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bu amaç için 250x350x2000 ayrıtlara sahip prizmatik betonarme kiriş numuneleri imal edilmiştir. Deneyleerin tamamlanmasıyla ÇL katkılı betonarme kirişlerde kirişin orta noktasının yer değıştirme değeri 67 mm olmasına karşın ÇL katkısız kirişte bu değeri 40 mm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla ÇL muhteviyatına sahip betonarme kirişlerin daha sünek olduğu sonucuna varılmıştır. Bir başka deyişle ÇL katkısı betona daha fazla enerji yutma kapasitesi sağlamaktadır. Ayrıca deneysel göçme yükleri incelendiğinde, ÇL katkısının betonarme kirişlerde taşıma gücünü %25 artırdığı anlaşılmıştır. Çalışmada sonlu eleman analizi için ANSYS paket programı kullanılmıştır. Modelleme aşamasında donatı için LINK 8 beton için SOLID 65 kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak hesaplanan göçme yükü ÇL katkılı kirişlerde deneysel sonuçlara oldukça yakın çıkmıştır. Diğer taraftan, deneyden ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-deplasman eğrilerinin birbirleriyle uyumlu oldukları anlaşılmıştır. Göçme durumları incelendiğinde de çatlak gelişimi ve dağılımı, deneysel ve sonlu eleman analizinden çıkan sonuçlarla paralellik taşıdığı raporlanmıştır.

Altun vd. [15] tarafından 2002 yılında tamamlanan başka bir çalışmada; üçer adet 2000 mm boyunda, 250x350 mm kesitli ÇL katkılı betonarme kiriş ile ÇL katkısız betonarme kiriş imal edilmiştir. Bu kirişler, 28 gün boyunca yeterli kür şartlarında bekletilmiştir. Daha sonra dört noktalı yükleme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda bu kirişlerin taşıma gücü özellikleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. ÇL katkılı ve katkısız betonarme kirişlerde teorik ve deneysel göçme yükleri arasındaki kapasite artış oranı sırasıyla ortalama 1.73 ve 1.47 olarak gerçekleşmiştir. Çalışma sonucunda ÇL'lerin betonarme kirişlerde taşıma gücünü %18'e kadar artırdığı görülmüştür. Yük-deplasman grafikleri incelendiğinde ÇL'li ve ÇL'siz kirişlerde enerji yutma kapasitesinin sırasıyla, 13140 ve 7175 kN.mm olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlar, ÇL'lerin betonarme kiriş elemanlarda sünekliği artırdığını göstermiştir.

Padmarajaiah ve Ramaswamy [16] tarafından 2002 yılında yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı beton kirişi için üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ÇL katkısının kirişte eğilme davranışı üzerinde bir değerlendirmesini sunmaktadır. Bu çalışmada dört noktalı yükleme testi yapılmıştır. Toplam 15 adet hazırlanan kirişlerden yedi tanesi kısmen 8 tanesi ise tam ön germelidir. Ayrıca eğilme kapasiteleri kesme kapasitelerinden yüksek olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan testlerde değişkenlik gösteren parametreler ise; ön gerilim kuvveti, hacim yüzdeleri farklı ÇL'ler (%0, 0.5, 1.0 ve 1.5), ÇL konumlarıdır. Yapılan deney sonucunda 15 numunenin tamamında hem testlerden hem de analizlerden elde edilen sonuçların karşılaştırılmıştır. Yüksek dayanımlı betona oluk şekilli ÇL ilavesi hem kırılma mukavemetinde hem de maksimum dayanım kapasitesinde artışa neden olduğu belirtilmişti. Yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, eklenen ÇL'ler eğrinin yükselen kısmını çok az değiştirdiği ancak inen kısım daha az dik hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu da malzemenin daha yüksek süneklığe ve tokluğa eriştiği sonucuna varılmıştır. Ön gerilmeli kiriş elemanlarının çekme tarafında kısmi bir derinlikte liflerin dahil edilmesinin ekonomik olduğunu ve istenen performanstan ödün vermeden önemli ölçüde maliyet tasarrufuna yol açtığını doğrulandığı saptanmıştır. Sadece kesme açıklığında derinliğin yarısından fazla life sahip kirişler, lifsiz beton kirişlere kıyasla nihai yükte veya deformasyon özelliklerinde herhangi bir artış göstermedi.

Ashour vd. [17] tarafından 2000 yılında yapılan başka bir çalışmada değişen ÇL katkısı, boyuna donatı oranı ve farklı dayanımlı beton basınç dayanımının kirişlerin eğilme davranışına olan etkisi incelenmiştir. Lif içerikleri hacimce %0, 0.5 ve 1.0, boyuna donatı oranları %1.18, 1.77 ve 2.37 ve beton basınç dayanımları 49, 79 ve 102 MPa olacak şekilde 27 adet betonarme kiriş hazırlanmıştır. Numuneler, dört nokta yükleme deneyi ile test edilmiştir. ÇL katkısı sayesinde çatlak dağılımında azalma gözlemlenmiştir. ÇL artışı betonun akma ve taşıma kapasitesini artırmıştır.

1.3 Amaç ve Kapsam

Yürütülen çalışma, hacimce değişken yüzdelerdeki ÇL ve PPL gibi farklı tipteki lif katkısının, eğilme altındaki betonarme kiriş davranışına etkisini hem deneysel hem de nümerik olarak incelenmeyi amaçlamaktadır.

Bu kapsamda İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda basma donatılı, geniş ölçekli ve 150x200x2450 mm boyutlarında sekiz adet betonarme kiriş numunesi imal edilmiştir. Numuneler, üç nokta basma düzeneğinde, basit mesnetlenme koşullarında ve monotonik artan yük altında test edilmiştir. Deneyleerin tamamlanmasıyla kiriş akma ve yük taşıma kapasiteleri, yük-deplasman ilişkileri, süneklik ve çatlak profili gibi karakteristikler incelenmiştir.

Sonrasında, Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisine (DBAT) dayalı doğrusal olmayan sonlu elemanlar analiz programı VecTor2 kullanılarak kirişler modellenmiş ve elde edilen yük-deplasman ilişkileri ile çatlak profilleri deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

1.4 Tez Organizasyonu

1.4.1 Bölüm 1 Giriş

Bu bölüm yapılan çalışmayla ilgili genel bilgileri ve literatürdeki konuyla ilgili başlıca çalışmaları içermektedir. Bunun yanı sıra çalışmanın amacı ve kapsamı da bu başlık altında sunulmuştur.

1.4.2 Bölüm 2 Deneysel Çalışma

Bu bölümde çalışmada kullanılan deney düzeneği ve sensörler, kiriş numunelerinin kesit kapasite hesapları ile üretim aşama ve detayları sunulmuştur. Son olarak beton karışım hesapları, ÇL ve PPL'nin malzeme özelliklerine de değinilmiş ve bölüm sonlandırılmıştır.

1.4.3 Bölüm 3 Statik Testler

Bu bölümde, laboratuvar ortamında hazırlanan sekiz adet betonarme kiriş numunesinin yükleme deneyleri ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bunun için öncelikle yükleme programı açıklanmış, ardından deney sonuçlarına ait yük-deplasman eğrileri çizdirilmiş ve tartışılmıştır. Sonrasında numune hasarları ve süneklikleri tartışılmıştır.

1.4.4 Bölüm 4 Bilgisayar Destekli Analiz

Bu bölüm, üç-nokta eğilme deneyleri tamamlanan betonarme kiriş numunelerinin DBAT' a dayalı, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerini ve sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrileri ile çatlak haritalarının deneysel sonuçlarla kıyaslanmasını kapsamaktadır.

1.4.5 Bölüm 5 Sonuç

Elde edilen bulgular özetlenmiş ve öneriler sıralanmıştır.

Bölüm 2

Deneysel Çalışma

2.1 Giriş

Sekiz adet betonarme kiriş üretilmiş ve test edilmiştir. Numunelere ait kapasite hesabı, deney düzeneği, numune boyutları ve malzeme özellikleri bu bölümde sunulmuştur. Bölüm, deney düzeneğinin açıklanmasıyla başlayacak olup; numunelere ait kapasite hesaplarıyla devam etmiş ve daha sonra deney numunelerine ait imalat detayları anlatılmıştır. Ardından, hazırlanan beton karışımı ve kullanılan lif malzeme özellikleri açıklanarak bölüm sonlandırılmıştır.

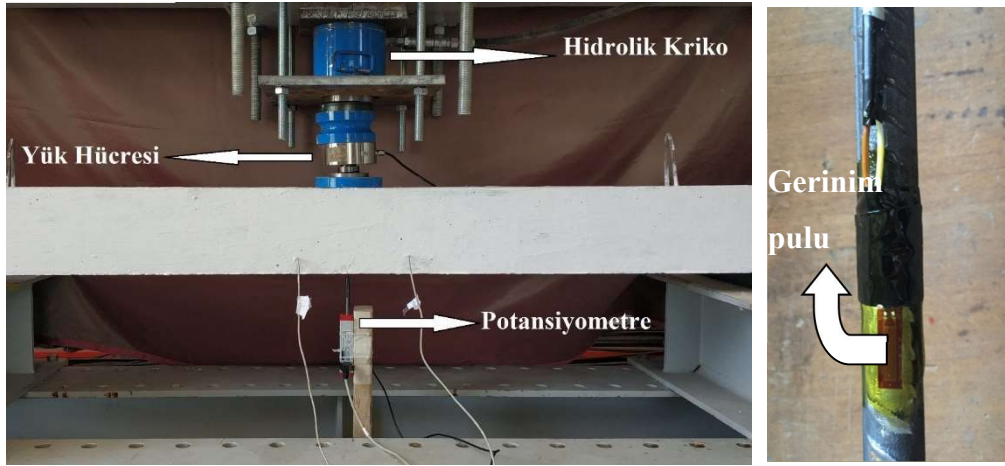
2.2 Deney Düzeneği

Hacimce değişken lif oranına sahip betonarme kirişler, hidrolik piston vasıtasıyla Şekil 2’de gösterildiği gibi açıklık ortasından statik olarak yüklenmiştir. Mesnetler sırasıyla sabit ve hareketli olup iki mesnet arası net açıklık iki metredir.

Deneysel sırasında kiriş orta nokta yer değiştirmesi, uygulanan yük ve çekme donatısı şekil değiştirmeleri ölçülmüştür. Bu amaç için, bir adet yük hücresi ve iki adet gerinim pulu ile potansiyometre kullanılmıştır. Sensörler, 125 milisaniyede bir veri alabilen TestBOX1001 marka sekiz kanallı statik veri edinim sistemine bağlanmıştır. Şekil 3’te çekme donatısı üzerine yerleştirilmiş gerinim pulları, yük hücresi ve potansiyometre gösterilmektedir.



Şekil 2: Deney düzeneği



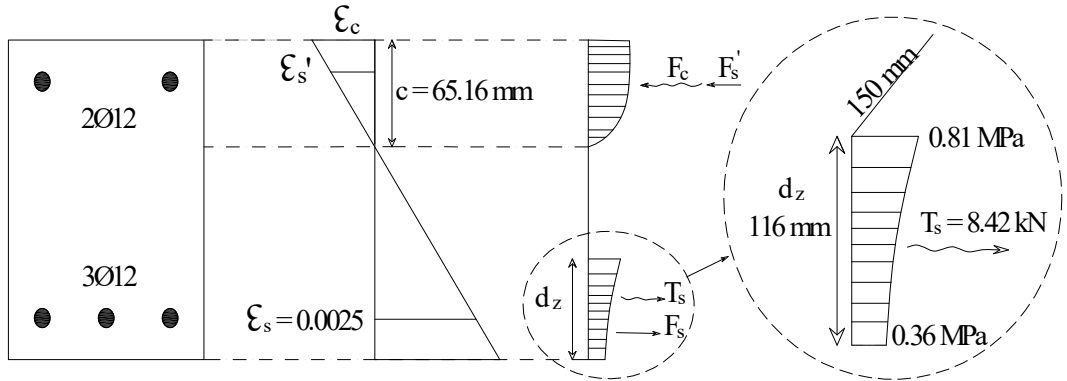
Şekil 3: Kullanılan deney ekipmanları

2.3 Numune Kapasite Hesapları

Numune kesit hesaplarında beton basınç dayanımı Hognestad parabolü ile temsil edilmiştir. Kesit taşıma gücüne eriştiğinde (nihai kapasite) tarafsız eksene en uzak beton basınç lifindeki birim kısalma için TS500 tarafından önerilen değer (0.003) kullanılmıştır. Ayrıca, analizlerde betondaki çekme rijitleşmesi de Wang ve Hsu [18] modeliyle hesaba katılmıştır. Buna göre gerilme-şekil değiştirme ilişkisi betonun çatlama gerilmesine kadar doğrusal olup (Denklem 2.1(a)); bu gerilmenin aşılması halinde parabolik azalmaktadır (Denklem 2.1(b)). Son olarak donatılarda meydana gelen pekleşme de analizlere dahil edilmiştir.

$$\sigma_t = \begin{cases} E_c \varepsilon_t & \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \text{ (a)} \\ \sigma_{cr} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t} \right)^{0.4} & \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \text{ (b)} \end{cases} \quad (2.1)$$

2.3.1 Etriyesiz B1 Kontrol Numunesi Akma Kapasitesi (M_y)



$$\varepsilon'_s = 0.0025 \times \frac{39.16}{108.84} = 0.000899 \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_c = 0.0025 \times \frac{65.16}{108.84} = 0.00149 \quad (2.3)$$

$$F_s = 500^{\text{MPa}} \times 339^{\text{mm}^2} = 169.5 \text{ kN} \quad (2.4)$$

$$F'_s = 200^{\text{MPa}} \cdot 226^{\text{mm}^2} \cdot 0.000899 = 40.66 \text{ kN} \quad (2.5)$$

$$F_c = 25 \times 150 \times 65.16 \left[\frac{\varepsilon_c}{0.002} - \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon_c}{0.002} \right)^2 \right] = 137.26 \text{ kN} \quad (2.6)$$

$$M_{c_{N.A}} = 25 \times 150 \times 65.16^2 \left[\frac{2}{3} \left(\frac{0.00149}{0.002} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{0.00149}{0.002} \right)^2 \right] \quad (2.7)$$

$$= 5.75 \text{ kN.m}$$

$$M_s = 108,84^{\text{mm}} \times 169500^{\text{N}} = 18.45 \text{ kNm} \quad (2.8)$$

$$M'_s = 39.16^{\text{mm}} \times 40661^{\text{N}} = 1.59 \text{ kNm} \quad (2.9)$$

$$M_{TS} = \left(200 - 65.16 - \frac{2}{3} \times 116 \right)^{\text{mm}} \times 8420^{\text{N}} = 0.48 \text{ kNm} \quad (2.10)$$

$$\Sigma M = M_y \cong 26 \text{ kNm} \quad (2.11)$$

Çekme rijitleşmesi hesap örneği:

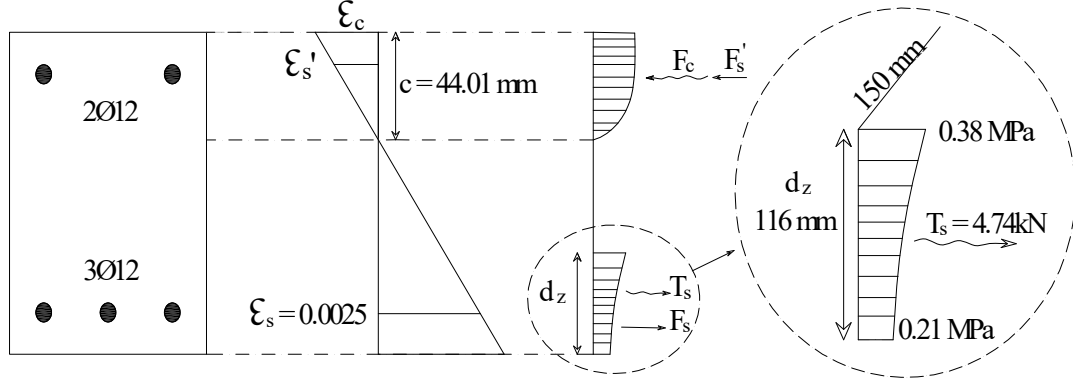
$$\sigma_c = 25 \text{ MPa ve } E = 3250\sqrt{25} + 14000 = 30250 \text{ Mpa}$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{0,35\sqrt{25}}{30250} = 0.0000578 \text{ ve } \varepsilon_t = 0.00383. \text{ Dolayısıyla, } \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \text{ olduğundan}$$

Denklem 2.1(b) kullanılacaktır.

$$\sigma_t = 0.35x\sqrt{25} \left(\frac{0.0000578}{0.00383} \right)^{0.4} = 0.36 \text{ MPa} \text{ olarak tespit edilir.}$$

2.3.2 Etriyesiz B1 Kontrol Numunesi Nihai Kapasite (M_r)



$$\varepsilon'_s = 0.003 \times \frac{18,01}{44,01} = 0,00121 \quad (2.12)$$

$$F_s = 500^{\text{MPa}} \cdot 339^{\text{mm}^2} + \frac{(670 - 500)}{(0,08 - 0,0025)} \cdot 339 \cdot (0,0088 - 0,0025) = 174,18 \text{ kN} \quad (2.13)$$

$$F'_s = 200^{\text{MPa}} \times 226^{\text{mm}^2} \times \varepsilon'_s = 200^{\text{MPa}} \times 226^{\text{mm}^2} \times 0,00121 = 55,14 \text{ kN} \quad (2.14)$$

$$F_c = 25 \times 150 \times 44,018 \left[\frac{\varepsilon'_s}{0,002} - \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon'_s}{0,002} \right)^2 \right] \quad (2.15)$$

$$= 25 \times 150 \times 44,018 \left[\frac{0,003}{0,002} - \frac{1}{3} \left(\frac{0,003}{0,002} \right)^2 \right] = 123,79 \text{ kN}$$

$$M_{C_{N \cdot A}} = 25 \times 150 \times 44,018^2 \left[\frac{2}{3} (1,5) - \frac{1}{4} (1,5)^2 \right] = 3,18 \text{ kNm} \quad (2.16)$$

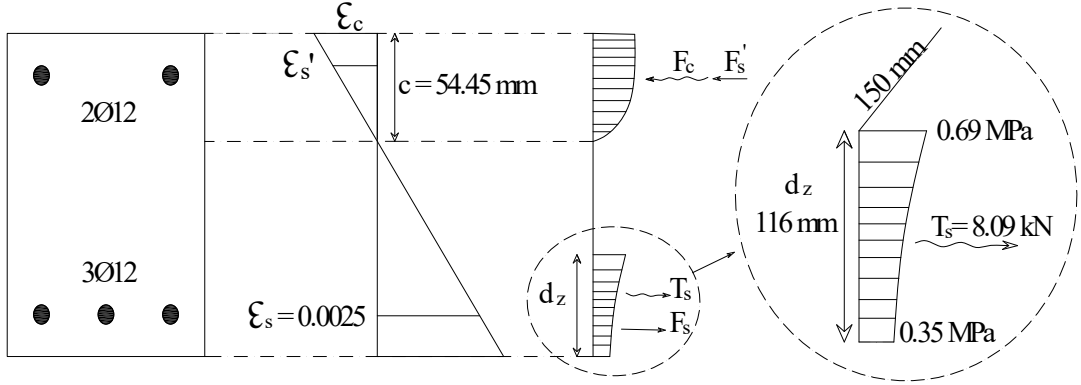
$$M_s = 129,98^{\text{mm}} \times 174183^{\text{N}} = 22,64 \text{ kNm} \quad (2.17)$$

$$M'_s = 18,01^{\text{mm}} \times 55140^{\text{N}} = 1,59 \text{ kNm} \quad (2.18)$$

$$M_{T_s} = \left(200 - 44,018 - \frac{2}{3} \times 116 \right)^{\text{mm}} \times 4747^{\text{N}} = 0,37 \text{ kNm} \quad (2.19)$$

$$\sum M = M_r \cong 27 \text{ kNm} \quad (2.20)$$

2.3.3 Etriyesiz B2 Kontrol Numunesi Akma Kapasitesi (M_y)



$$\epsilon'_s = 0.0025 \times \frac{(54.45 - 26)}{(174 - 54.45)} = 0.00059 \quad (2.21)$$

$$\epsilon_c = 0.0025 \times \frac{54.45}{119.55} = 0.0011 \quad (2.22)$$

$$F_s = 500^{\text{MPa}} \times 226^{\text{mm}^2} = 113 \text{ kN} \quad (2.23)$$

$$F'_s = 200^{\text{MPa}} \times 226^{\text{mm}^2} \times 0.0011 = 26.89 \text{ kN} \quad (2.24)$$

$$F_c = 25 \times 150 \times 54.45 \left[\frac{\epsilon_c}{0.002} - \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_c}{0.002} \right)^2 \right] = 94.2 \text{ kN} \quad (2.25)$$

$$M_{C_{N \cdot A}} = 25 \times 150 \times 54.45^2 \left[\frac{2}{3} \left(\frac{0.0011}{0.002} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{0.0011}{0.002} \right)^2 \right] \quad (2.26)$$

$$= 3.32 \text{ kNm}$$

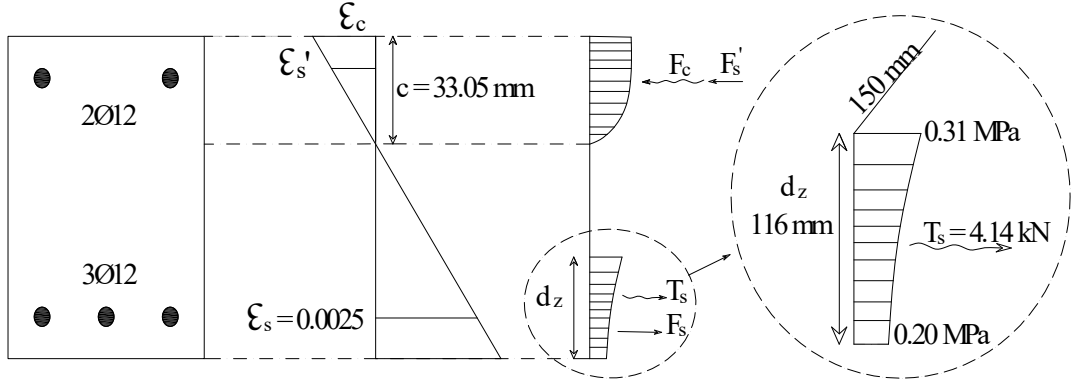
$$M_s = 119.55^{\text{mm}} \times 113000^{\text{N}} = 13.5 \text{ kNm} \quad (2.27)$$

$$M'_s = 28.45^{\text{mm}} \times 26894^{\text{N}} = 0.76 \text{ kNm} \quad (2.28)$$

$$M_{T_s} = \left(200 - 54.45 - \frac{2}{3} \times 116 \right)^{\text{mm}} \times 8092^{\text{N}} = 0.55 \text{ kNm} \quad (2.29)$$

$$\Sigma M = M_y \cong 18 \text{ kNm} \quad (2.30)$$

2.3.4 Etriyesiz B2 Kontrol Numunesi Nihai Kapasite (M_r)



$$\epsilon'_s = 0.003 \times \frac{(33.05 - 26)}{(33.05)} = 0.00065 \quad (2.31)$$

$$F_s = 500^{\text{MPa}} \times 226^{\text{mm}^2} + \frac{(670 - 500)}{(0.08 - 0.0025)} \times 226 \times (0.013 - 0.0025) = 118.2 \text{ kN} \quad (2.32)$$

$$F'_s = 200^{\text{MPa}} \times 226^{\text{mm}^2} \times \epsilon'_s = 200^{\text{MPa}} \times 226^{\text{mm}^2} \times 0.00065 = 29.41 \text{ kN} \quad (2.33)$$

$$F_c = 25 \times 150 \times 33.054 \left[\frac{\epsilon_c}{0.002} - \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_c}{0.002} \right)^2 \right] \quad (2.34)$$

$$= 25 \times 150 \times 33.054 \left[\frac{0.003}{0.002} - \frac{1}{3} \left(\frac{0.003}{0.002} \right)^2 \right] = 92.94 \text{ kN}$$

$$M_{C_{N.A}} = 25 \times 150 \times 33.054^2 \left[\frac{2}{3} (1.5) - \frac{1}{4} (1.5)^2 \right] = 1.78 \text{ kNm} \quad (2.35)$$

$$M_s = 140.94^{\text{mm}} \times 118.203^{\text{N}} = 16.66 \text{ kNm} \quad (2.36)$$

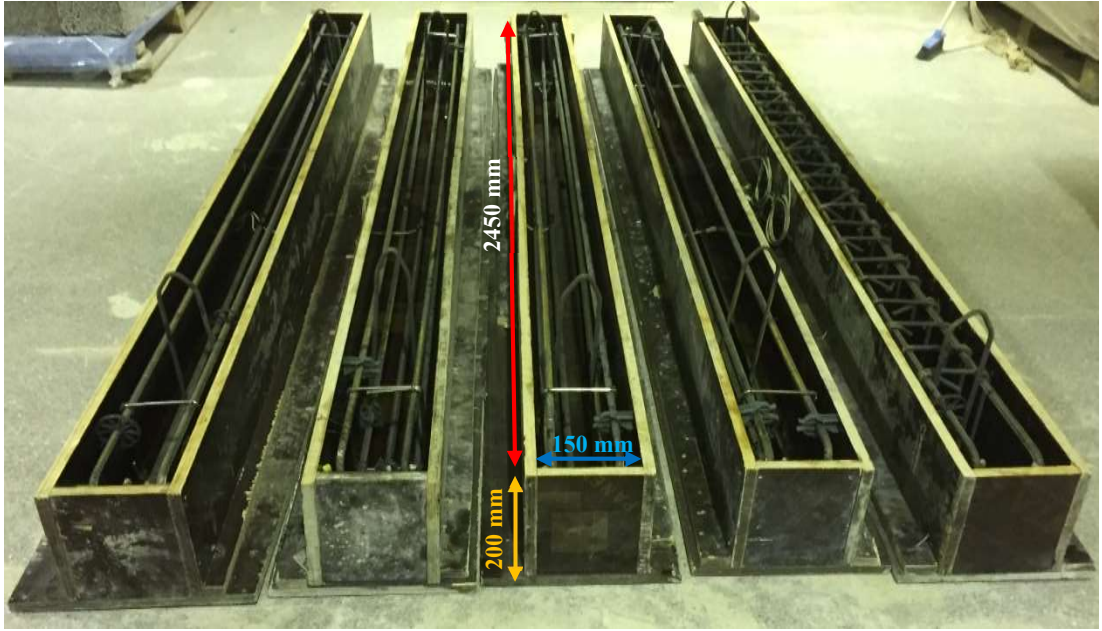
$$M'_s = 7.054^{\text{mm}} \times 29408^{\text{N}} = 0.21 \text{ kNm} \quad (2.37)$$

$$M_{T_s} = (200 - 33.054 - \frac{2}{3} \times 116)^{\text{mm}} \times 4145^{\text{N}} = 0.37 \text{ kNm} \quad (2.38)$$

$$\sum M = M_r \cong 19 \text{ kNm} \quad (2.39)$$

2.4 Deney Numuneleri

Kiriş numunelerinin hazırlığına kalıp imalatıyla başlanmıştır. Bütün kalıp ölçüleri aynı olup genişlik 150 mm, yükseklik 200 mm ve uzunluk ise 2450 mm'dir. Kalıpların iç yüzü donatı yerleşiminden önce kir ve tozdan arındırılmış ve kalıp yağı ile yağlanmıştır. Donatısı yerleştirilmiş kalıplar Şekil 4'te sunulmuştur.



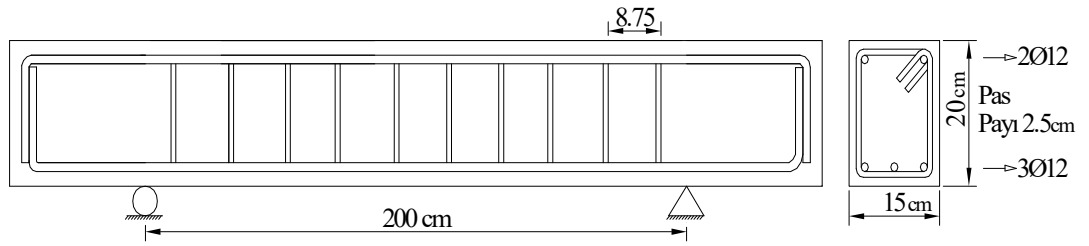
Şekil 4: Kalıpların genişliği ve boyu

Kalıp üretiminin tamamlanmasının ardından, yeterli uzunluklarda kesilen boyuna donatı ve etriyeler için B420C sınıfı çelik kullanılmıştır. Üç adet 30 cm uzunluğunda çelik donatı üzerinde yapılan çekme testleri sonucunda ortalama akma ve nihai dayanımların sırasıyla 500 ve 670 MPa olduğu anlaşılmıştır. Tüm kiriş numunelerinde kenetlenmenin sağlanabilmesi için boyuna donatı uçlarında en az beş cm uzunluğunda 90 derecelik kancalar oluşturulmuştur. Ayrıca, bir kiriş numunesi için hazırlanan toplam 22 adet etriye, mesnet bölgelerinden 4.25 cm uzakta olacak şekilde 8.75 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Numunelerin en kesit ve yan görünümleri Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuş olup donatı detayları Tablo 1'de özetlenmiştir. Numune isimlendirmede B1 çekme donatısı oranına bağlı kiriş grubunu, ardından gelen ikili harfler ÇL veya PPL olmak üzere lifin türünü ve son olarak nümerik değerler ise lifin

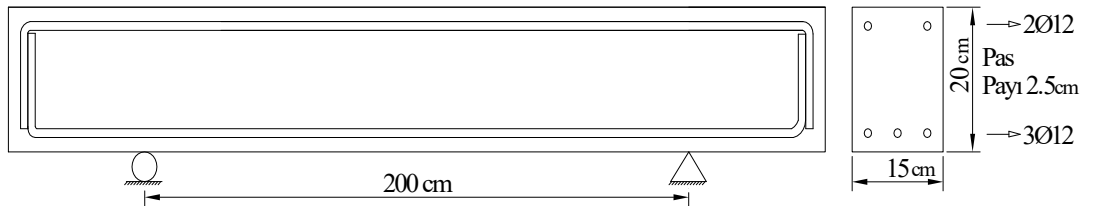
kiriş numuneleri içerisindeki hacimce yüzdeliğini ifade etmektedir. Örneğin, B1-ÇL10 isimli deney numunesi, kirişin B1 grubuna ait ve %1 ÇL oranına sahip olduğunu ifade etmektedir.

Tablo 1: Numunelere ait donatı ve lif (ÇL ve PPL) miktarları

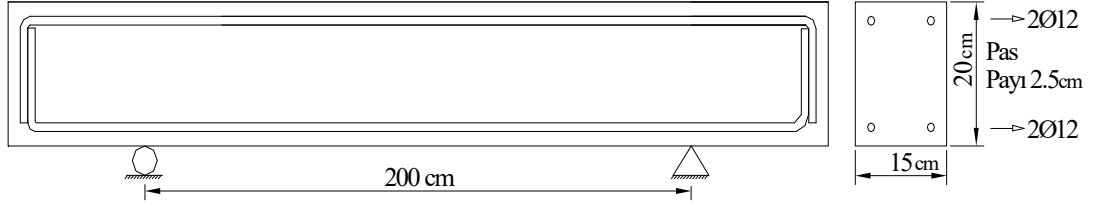
Numuneler	Etriye	Boyuna donatı (çekme ve basma)	Lif tipi ve oranı (%)	Çekme donatısı oranı
B1-kontrol (etriyesiz)	-	3Ø12 +2Ø12	0	0.013
B1-ÇL05	-	3Ø12 +2Ø12	0.5	0.013
B1-ÇL10	-	3Ø12 +2Ø12	1.0	0.013
B1-PPL05	-	3Ø12 +2Ø12	0.5	0.013
B1-kontrol (etriyeli)	22Ø8	3Ø12 +2Ø12	0	0.013
B2-kontrol (etriyesiz)	-	2Ø12+2Ø12	0	0.0086
B2-ÇL10	-	2Ø12+2Ø12	1.0	0.0086
B2-PPL05	-	2Ø12+2Ø12	0.5	0.0086



Şekil 5: B1-kontrol (etriyeli) kirişine ait en ve boy kesiti



Şekil 6: B1-kontrol (etriyesiz), B1-ÇL05, B1-ÇL10, B1-PPL05 kirişlerine ait en ve boy kesiti



Şekil 7: B2-kontrol (etriyesiz), B2-ÇL10, B2-PPL05

2.5 Beton Karışımı ve Lifler

Kiriş numunelerin 28 günlük silindirik beton basınç dayanımı en az 20 MPa olması hedeflenmiştir. Bu amaç için su/çimento (s/ç) oranı 0.55 olarak seçilmiştir. Beton karışımında puzolanik CEM IV/B 32.5N tipi çimento kullanılmıştır. Yürütülen deneysel çalışmada kiriş numunelerinde hacimce 0.5 ve 1.0% oranında ÇL ve PPL bulundurulması planlandığından, lifler; 39.25 kg/m³ ve 78.50 kg/m³ ağırlığa sahip olacak şekilde tartılarak önceden hazırlanmıştır. Bir kiriş için beton karışım oranı ise Tablo 2’de sunulmuştur. Beton üretiminde, laboratuvardaki 125 lt kapasiteli betonyer kullanılmıştır. Beton karışımı için kullanılan betonyer Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 8: Laboratuvar tipi betonyer

Tablo 2: Bir kiriş için karışım oranları

	Su/Çimento	Karma Suyu	Hava Miktarı	Çimento	Agrega	Toplam
Ağırlık (kg)	0.55	20.90	0	36.31	136.41	193.62
Hacimce (m ³)	0.55	0.228	0.025	0.5	0.599	1

Betonyerde öncelikle agrega ve çimentonun birbirleriyle tam karışması sağlanmış sonrasında gerekli miktarda su ve lif ilave edilmiştir. Bu işlem bütün numeneler için hazırlanan beton için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kalıplara dökülen beton karışımında topaklanmanın önüne geçebilmek amacıyla şişleme ve vibrasyon işlemleri uygulanmıştır. Şekil 9'da bu aşamalar gösterilmektedir.

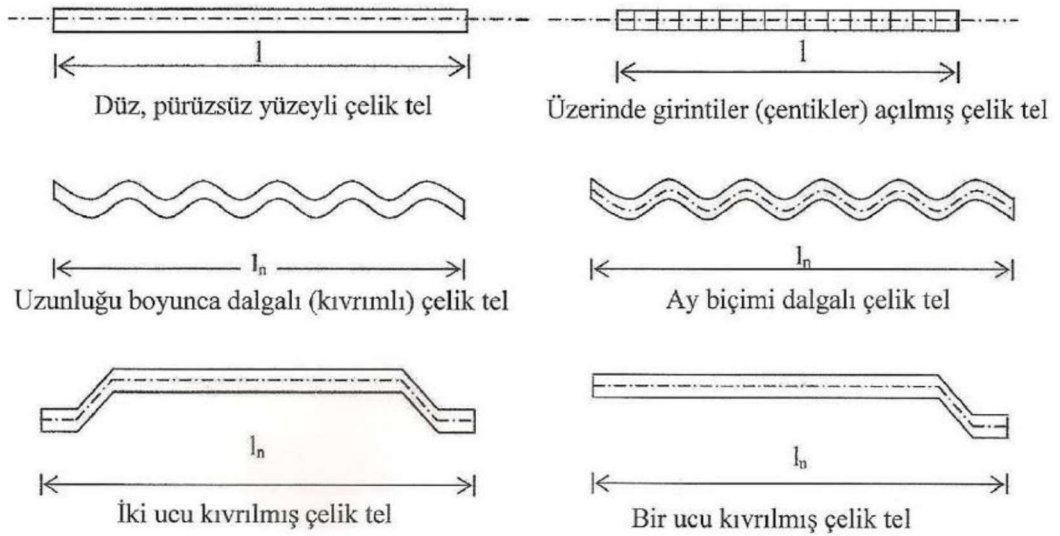


Şekil 9: Beton döküm aşamaları

Beton basınç dayanımının tespit edilebilmesi amacıyla her bir dökümden sonra en az iki adet 15x15x15 cm ayrıtlara sahip küp numune alınmıştır. Kübik beton numuneleri kirişlerle birlikte aynı çevresel şartlara maruz bırakılmış ve 28 gün boyunca sulanarak kürlenmiştir. Kiriş numunelerin statik deneyleri esnasında beton küpler hidrolik basma cihazıyla kırılmış ve elde edilen küp dayanımları 0.85 katsayısı ile çarpılarak silindirik beton basınç dayanımına dönüştürülmüştür. Sonuçta beton basınç dayanımının ortalama 25 MPa olduğu tespit edilmiştir.

2.5.1 Çelik Lif (ÇL)

Betonda kullanılan metal liflerden en çok kullanılanı ÇL'lerdir. ÇL'ler düşük karbonlu çelik olan C1008'den üretilir. Yaygın olarak kullanılan ÇL'ler Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10: Yaygın olarak kullanılan ÇL tipleri [19].

Topçu [20], Bayasi ve Soroushian [21] tarafından yapılan araştırmalar sonucunda beton üzerindeki; enerji yutma kapasitelerinde ve basınç dayanımında düz ve ucu hafif kıvrımlı liflerin diğer liflere oranla eğilme dayanımında daha büyük iyileştirmeler sağladığını göstermiştir. Beton çatlak oluştuğunda ve çatlak genişliği arttıkça liflerin çatlaklara karşı köprüleme yapma özelliği daha baskın olmaktadır. Bu sayede lifler

üzerinden gerilmelerin geçtiği bir köprü görevini görmektedir. Ayrıca ucu kancalı olan lifler kancaların deformasyonu sayesinde enerji yutma kapasitesini artırır. İki ucu kancalı çelik liflerin bu özellikleri göz önünde alınarak bu çalışmada kullanılan ÇL türü iki ucu kıvrılmış çelik tellerdir. Çalışmada kullanılan ÇL Şekil 11’de gösterilmiş olup kullanılan bu ÇL türüne ait fiziksel ve bazı mekanik özellikler Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3: Çalışmada kullanılan ÇL özellikleri

Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	Şekil
50	1	1100	Kanca Uçlu



Şekil 11: Çalışmada kullanılan ÇL

Türk standartlarına göre ÇL’lerin çekme/kopma gerilme ortalaması en az 345 N/mm² olması gerekmekte ve her bir lifin bu gerilmesi en az 310 N/mm² olmalıdır [19]. Ayrıca ÇL’in tipi, kullanım oranı (hacimce), narinlik oranı, ÇL’lerin beton içerisindeki dağılımı ve ÇL’li betonun maksimum agrega boyutu lifli betonların dayanımını

etkileyen bazı parametrelerdir [22]. L'ler çekme dayanımı yüksek olduğu için betona katıldığında çekme dayanımı arttırır. Belli bir değerden fazla katılan L'ler betonun performansını olumsuz etkilediği buna göre eğilme mukavemetinde daha düşük değerler ortaya çıkardığı literatürde mevcuttur [23].

2.5.2 Polipropilen Lif (PPL)

PPL, tekil ve lif hamuru şeklinde bulunmaktadır. Lif tabakaları halinde kullanılır ve genellikle 50-100 mikron arasında değişkenlik gösterir. Bu lifler 100 santigrat dereceye kadar olan betonda özelliğini korumakla beraber birçok kimyasal maddelere yüksek duyarlılık gösterir. Betonda sıkça kullanılması bir nedeni de alkaliye karşı dayanıklılığıdır. PPL'ler betonda genel olarak %0.3-1.5 arasında değişen hacimlerde kullanılmaktadır [24].

Bu alışma kapsamında değişen boyuna donatı oranı için %0.5 hacim oranında PPL kullanılmıştır. Betonyere imento, agrega ve su karışımından sonra rastgele ilave edilip karıştırılmıştır. Kullanılan PPL şekil 12'de gösterilmiş olup bu life ait malzeme zellikleri Tablo 4' te sunulmuştur.



şekil 12: Çalışmada kullanılan PPL

Tablo 4: Kullanılan PPL'nin malzeme özellikleri

Standart	ASTM C1116 CE 14889-2BBA 92/2830	Yanma Noktası	593 °C
Görünüm	Doğal Beyaz Lif	Asit Reaksiyonu	Dayanıklı
Tip	Polipropilen	Tuz Reaksiyonu	Dayanıklı
Saflık	%100 Saf	Alkali Reaksiyonu	Dayanıklı
Yoğunluk	0.91 g/cm ³	UV Direnci	Dayanıklı
Uzunluk	19mm	Oksidasyon Direnci	Yüksek
Kesit ve Çap	Dairesel, 20µm	Aşınma Dayanımı	Yüksek
Çekme Dayanımı	450-700 N/mm ²	Nem Tutma	0
Elastisite Modülü	3000-3500 N/mm ²	Erime Noktası	162 °C
Kullanım Alanları	BF12 Şap Betonlar	Çimento ile Uyum	Çok İyi

Bölüm 3

Statik Testler

3.1 Giriş

Bu bölümde, laboratuvar ortamında hazırlanan sekiz adet betonarme kiriş numunesinin yükleme deneylerine ait detaylar ve sonuçlar sunulmuştur. İlk olarak yükleme programı açıklanmıştır. Ardından kiriş numunelerine ait yük-deplasman eğrileri ile deney sonrası hasar durumu ve süneklik konuları tartışılmıştır.

3.2 Yükleme Programı

Numuneler, 300 kN kapasiteli bir hidrolik kriko vasıtasıyla üç nokta yüklemesi altında monotonik olarak yüklenmiştir. Yükleme, ampirik olarak hesaplanmış belirli bir plastik moment kapasitesine (M_p) ulaşıncaya dek sürdürülmüş ve bu moment değerinde numuneler yük taşıma kapasitesine erişmiş varsayılmıştır. Plastik moment kapasitesi (M_p), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde [25] belirtildiği üzere Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_p = 1.4M_r \quad (3.1)$$

Burada (M_r) analitik olarak hesaplanan nihai moment kapasitesidir. Fakat lifli kiriş numunelerinin kapasite hesabındaki görece zorluk ve klasik kesit hesabındaki gibi evrensel olarak kabul görmüş bir hesap yönteminin bulunmayışı nedeniyle, nihai moment kapasitesi (M_r) yerine, akma moment kapasitesi (M_{ry}) kullanılmıştır. Ancak böyle bir basitleştirme kiriş yük taşıma kapasitesini olduğundan %15 daha yüksek gösterebilmektedir [2]. Bu durum düşünüldüğünde mevcut çalışmada kapasite

dayanımı $1.20M_{ry}$ olarak değerlendirilmiş ve deneyler kiriş çekme donatılarının akma dayanımına karşı gelen kuvvetin %20 fazlasına ulaşıldığında durdurulmuştur. Şekil 13' te yüklemeye hazır bir deney numunesinin genel görünümü sunulmuştur.



Şekil 13: Deneye hazır numune ve düzeneğin genel görünümü

3.3 Yük-Deplasman İlişkileri

Bu bölümde tüm numunelerin yük-deplasman eğrileri incelenmiştir. Şekil 14 ve Şekil 15'te numunelere ait yük-deplasman grafiği ile gerinim ölçer verileri sunulmuştur. Aşağıdaki şekilden de görüleceği gibi etriyesiz B1 kontrol numunesi 44 kN yüke ulaştığında çekme donatısı yaklaşık 2500 $\mu\epsilon$ değerine ulaşarak akmıştır. Bu yükte kiriş orta nokta deplasmanı 10 mm olarak tespit edilmiştir. Yükleme 48.5 kN'a kadar devam etmiş ancak kiriş kesme kritik olduğundan deney ani bir kırılmanın önüne geçmek amacıyla durdurulmuştur. Söz konusu yükte kiriş orta nokta deplasmanı 20 mm değerine ulaşmıştır.

Etriyeli B1-kontrol numunesine ait yük deplasman grafiği incelendiğinde, numune çekme donatılarının 51.3 kN' luk yükte aktığı ve kiriş orta noktasının 10 mm deplasman yaptığı anlaşılmaktadır. Akma yükünün yaklaşık %20 fazlası olan 62.5 kN' a ulaşıldığında deney sonlandırılmıştır. Bu esnada orta nokta deplasmanının 57.7 mm olduğu tespit edilmiştir.

B1-ÇL05 numunesi, etriyeli kontrol numunesine benzer şekilde 51.3 kN' da akmış ve bu esnada 10 mm' lik orta nokta deplasmanına ulaşmıştır. Deney 61.2 kN 'lik taşıma kapasitesine ulaşıldığında durdurulmuştur. Bu yükleme 44.5 mm' lik bir deplasmana neden olmuştur.

Önceki üç numuneden farklı olarak B1-ÇL10 numunesi 56 kN' luk yükleme altında akmıştır. Akma esnasında kiriş orta nokta deplasmanının 10 mm olduğu tespit edilmiş ve deney 67.5 kN' luk yük taşıma kapasitesine gelindiğinde sonlandırılmıştır. Bu sırada orta nokta deplasmanının 50 mm olduğu Şekil 14'ten de anlaşılmaktadır.

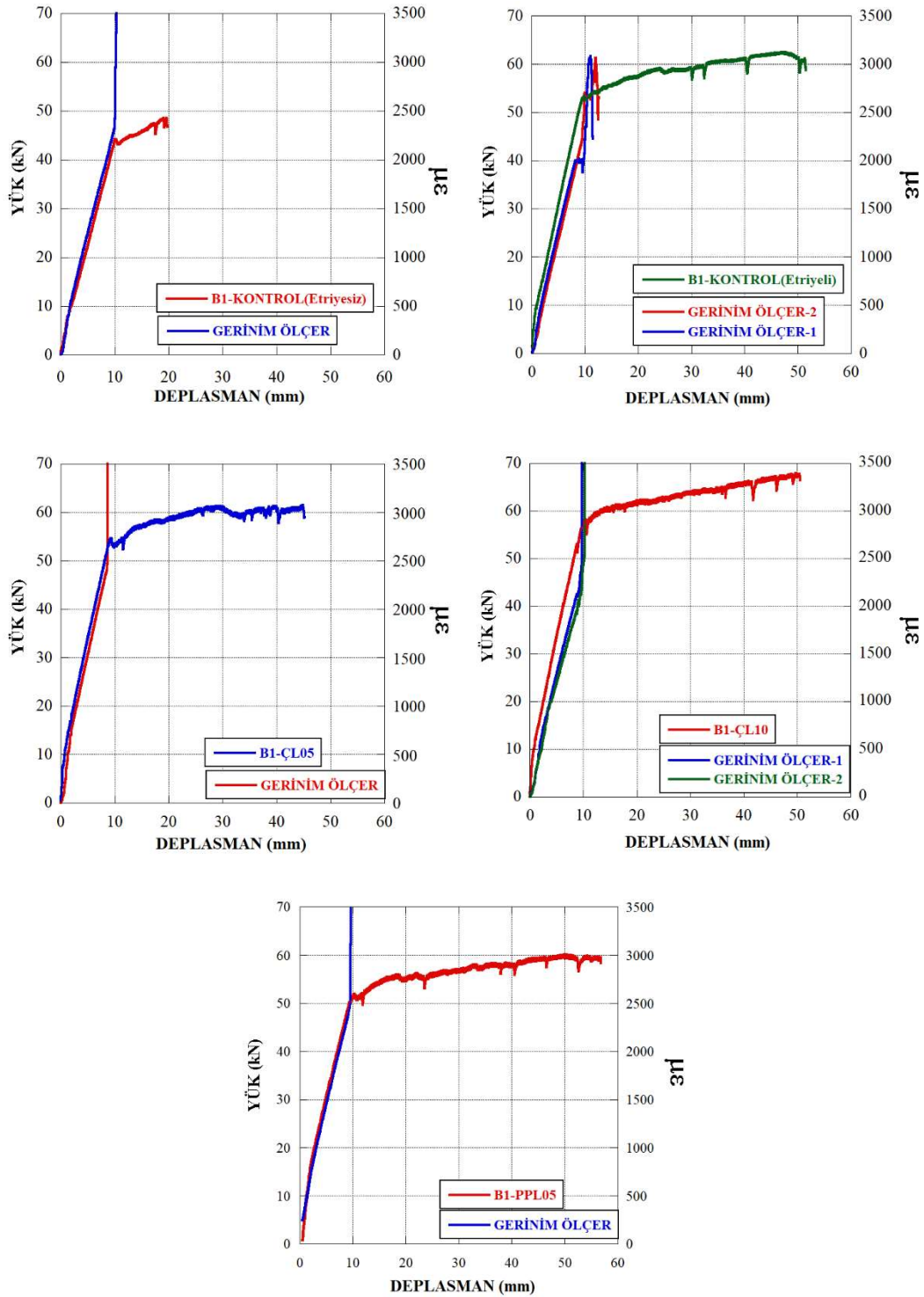
B1 serisi kirişlerin sonucusu olan B1-PPL05, 51 kN civarında akmış ve orta nokta deplasmanı 10 mm olarak tespit edilmiştir. Bu, B1-ÇL05 ve etriyeli kontrol numunesinde ulaşılan değerle aynıdır. Yük taşıma kapasitesi 60 kN olarak tespit edilmiş ve 54 mm' lik kiriş orta nokta deplasmanı gözlemlenmiştir.

Etriyesiz B2-kontrol numunesine ait yük deplasman grafiği incelendiğinde, numune çekme donatılarının 38 kN' luk yükte aktığı anlaşılmaktadır. Bu esnada kiriş orta nokta deplasmanı 8 mm civarındadır. Akma yükünün yaklaşık %20 fazlası olan 43 kN' a ulaşıldığında deney sonlandırılmış ve kiriş orta nokta deplasmanının 57 mm olduğu tespit edilmiştir.

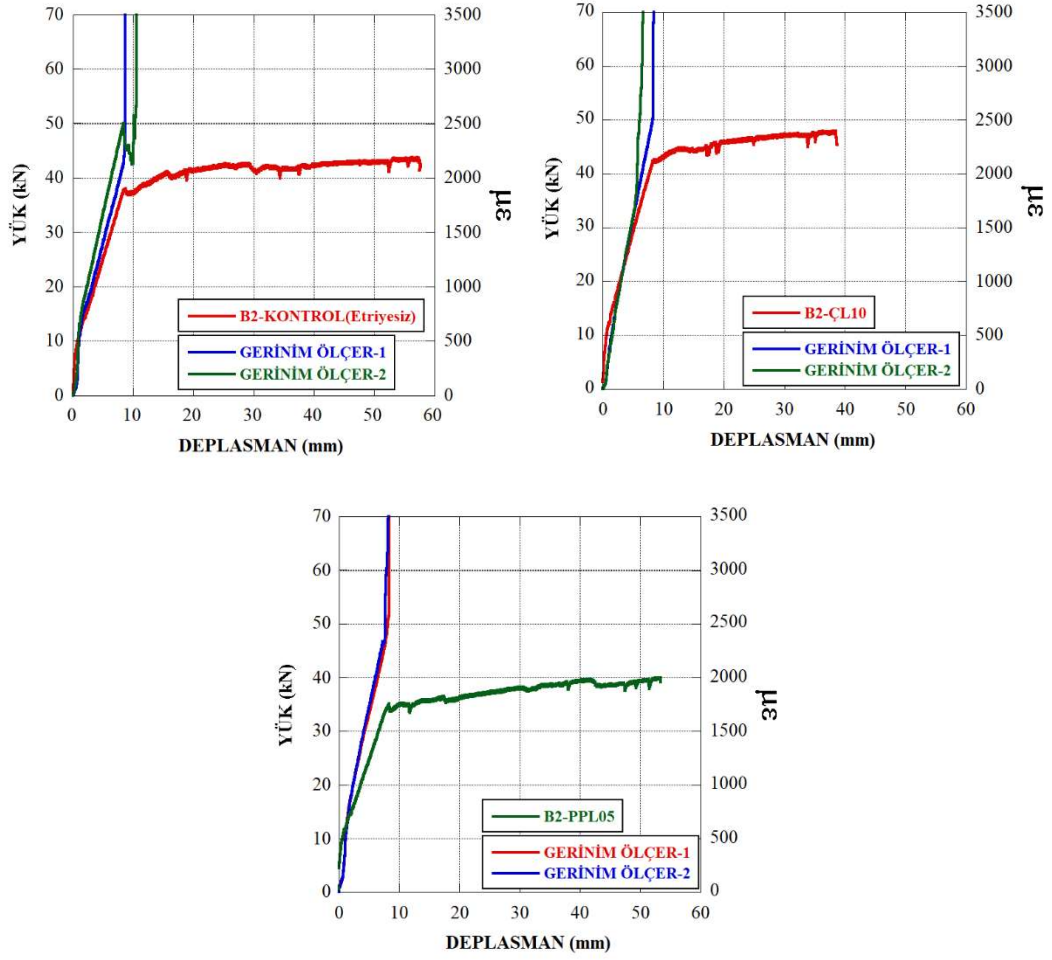
B2-ÇL10 numunesi çekme donatıları 40 kN' luk yükte akmıştır. Etriyesiz kontrol numunesine göre daha yüksek akma kapasitesi performansı sergilemiştir. Bu esnada kiriş orta nokta deplasmanı etriyesiz B2 kontrol numunesine benzer şekilde yaklaşık 8 mm'dir. Deney 48 kN'lik bir taşıma kapasitesine ulaşıldığında durdurulmuştur. Bu yüke karşı gelen kiriş deplasmanı ise 38 mm' olmuştur.

B2-PPL05 numunesine ait yük deplasman grafiği incelendiğinde, B2 serisinin en düşük akma yükü kapasitesine sahip kirişi olduğu görülmektedir. Bu değer yaklaşık olarak 34 kN olup; bu esnada kiriş orta nokta deplasmanı 7 mm civarındadır. Numune

40 kN'luk taşıma kapasitesine eriştiğinde deney durdurulmuştur. Bu taşıma yükü karşısında 53 mm'lik bir deplasman tespit edilmiştir.



Şekil 14: B1 serisinin ait yük-deplasman ve gerinim ölçer-deplasman eğrileri



Şekil 15: B2 serisinin ait yük-deplasman ve gerinim ölçer-deplasman eğrileri

Tablo 5: Numunelere ait yük-deplasman verileri

NUMUNE	Akma yükü (kN)	Deplasman (mm)	Yük taşıma kapasitesi (kN)	Deplasman (mm)
B1-Kontrol (etriyesiz)	44	10	48.5	20
B1-Kontrol(etriyeli)	51.3	10	62.5	47.75
B1-ÇL05	51.3	10	61.2	44.5
B1-ÇL10	56	10	67.65	50
B1-PPL05	50	9.5	60	54
B2-Kontrol(etriyesiz)	38	8	43	57
B2-ÇL10	40	8.2	48	38
B2-PPL05	34	7.75	40	53

Deneyler sonucunda elde edilen akma yükü ve deplasmanı ile taşıma kapasitesi ve deplasmanı Tablo 5’te özetlenmiştir.

3.4 Numune Hasarları

B1 ve B2 serisi kiriş deneylerinin sonunda tespit edilen hasar görünüşleri Şekil 16’da sunulmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi tüm numuneler monotonik artan yüklemeye maruz kalmış ve yükleme, akma kapasitesinin %20 fazlasına erişildiğinde durdurulmuştur.

Etriyesiz B1 kontrol numunesi hasarı incelendiğinde, maksimum moment bölgesinde 2-3 mm kalınlığında majör bir eğilme çatlak gözlemlenmiştir. Buna ek olarak kiriş boyuna yayılmış kılcal eğilme-kesme çatlakları tespit edilmiştir.

Etriyeli B1 kontrol numunesi hasarı etriyesizle bazı benzerlikler taşımaktadır. Öyle ki; yükleme konisinde 4-5 mm kalınlığa ulaşan majör eğilme çatlakları tespit edilmiştir. Ayrıca kirişin her iki yüzündeki yaygın kılcal eğilme çatlakları, kiriş gövdesinde eğik çekme (kesme) çatlaklarına dönüşmüştür. Her biri neredeyse eşit genişlikte olan bu çatlakların etriyesiz numunedekilerden daha geniş olduğu dikkat çekmektedir.

B1-ÇL05 kirişi yükleme konisinde her iki yüzde 5 mm kalınlığa ulaşan majör eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. Bu durum etriyeli kontrol numunesindeki hasarla paralellik taşımaktadır. Diğer taraftan, genişliği 1 mm’yi bulan kesme çatlakları numunenin her iki yüzünde de oluşmuştur. Oluşan bu kesme çatlakları, kontrol numunesinde görülen kesme çatlaklarına kıyasla daha belirgin ve geniştir. Numunede detaylı inceleme yapıldığında daha küçük kesme çatlaklarının kiriş boyunca devam ettiği anlaşılmaktadır. Genel olarak bakıldığında, %0.5 oranında ilave edilen ÇL katkısı etriyeli numuneye benzer hasarlar meydana getirdiği söylenebilir.

B1-ÇL10 kirişi yükleme konisinde kalınlığı 3-5 mm olan majör eğilme çatlakları tespit edilmiştir. %0.5 ÇL katkılı kirişe benzer kesme çatlakları görülmüş ve bunun yanında numunenin her iki tarafında yaklaşık 2 mm genişlikte simetrik eğilme-kesme çatlakları gözlemlenmiştir. B1-ÇL10 numunesinde, B1-ÇL05 ve etriyeli B1 kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında daha az fakat daha geniş çatlaklar oluşmuştur. Yapılan bir çalışmaya göre de elde edilen veriler paralellik göstermiştir [26].

B1 serisi kirişlerine hacimce %0.5 oranın PPL katılması durumunda, yükleme konisinde diğer numune hasarlarına kıyasla daha dar alanda yaklaşık olarak 2 mm kalınlıkta çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca çelik lifli numune hasarlarına göre toplam çatlak sayısı bir miktar artmıştır, bu artışın sebebi yüksek deformasyon değerlerinden dolayı olabilir. Bu çatlaklar genel olarak bakıldığında çelik lifli numunelere benzer bir şekilde kılcal kesme çatlaklarıdır.

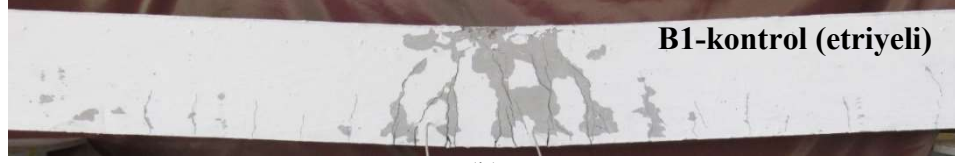
B2 etriyesiz kontrol numunesinin hasar durumu incelendiğinde yükleme bölgesinde 2 ila 3 mm kalınlığında majör eğilme ve kesme çatlakları oluşmuştur. Bunun yanı sıra numune boyunca yayılmış kılcal eğilme çatlakları tespit edilmiştir.

B2-ÇL10 numunesinde ise yükleme konisinde 2-4 mm kalınlığında majör eğilme çatlakları oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kiriş boyunca 1 mm genişlikli kesme çatlakları tespit edilmiştir. Kontrol numunesiyle kıyaslanırsa, numunenin bir tarafında daha az sayıda çatlak oluşmuş ve bunlar yükleme konisinde yoğunlaşmıştır.

B2-PPL05 numunesinde majör bir eğilme çatlakları oluşmamıştır. Yükleme konisinde gözlemlenen kesme çatlakları, B2-ÇL10'a göre daha belirgin olup 1 ile 1.5 daha geniş olduğu fark edilmiştir. Oluşan bu çatlakların kalınlıkları 2-2.5 mm aralığında gerçekleşmiştir. ÇL'li numune hasarına göre sünek bir kırılma gerçekleşmiştir. Toplam çatlak miktarı çelik liflere oranla artmış ve ÇL'lere benzer ağ kesme çatlakları görülmüştür.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



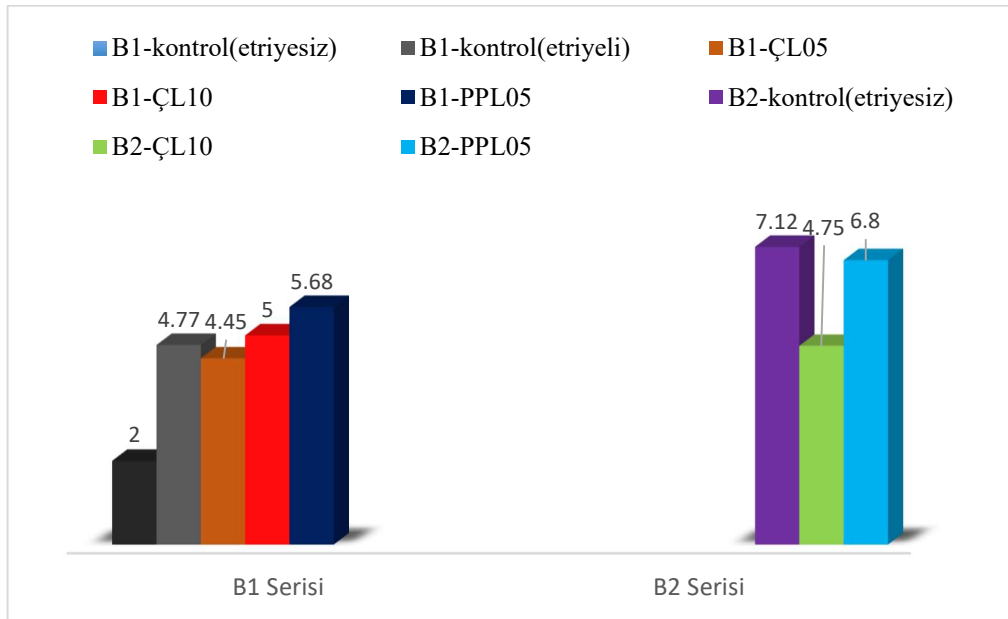
(h)

Şekil 16: B1 serisinde gözlemlenen hasar durumları, (a) B1-kontrol (etriyesiz), (b) B1-kontrol (etriyeli), (c) B1-ÇL05, (d) B1-ÇL10, (e) B1-PPL-05, (f) B2-kontrol (etriyesiz), (g) B2-ÇL10, (h) B2 PPL05.

3.5 Süneklik

Süneklik katsayısı (μ), kopma birim deformasyonun akma birim deformasyona bölünmesi ile hesaplanmıştır. Şekil 17’de numunelerin süneklik katsayıları grafik halde sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı gibi B1 serisindeki kirişlerin tamamı etriyesiz kontrol numunesine göre daha yüksek süneklik performansı sergilemiştir. En sünek davranış B1-PPL05 numunesinde gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, %0.5 oranında PPL kullanımının, minimum etriye oranına veya %0.5 ÇL katkısına kıyasla daha sünek bir davranışa yol açtığını ifade etmek mümkündür. Sahoo vd. [11] tarafından yapılan çalışmada da bu sonucu destekler nitelikte bulgular elde edilmiştir. Diğer taraftan, %0.5 ÇL muhteviyatı minimum etriyenin sağladığı süneklik değerini neredeyse tamamen karşılamıştır. Ancak lif oranı %1.0’ a çıkarıldığında süneklikte sınırlı bir artış (%12) gözlemlenmiştir.

Daha düşük boyuna donatı oranına sahip B2 serisi, B1 serisine göre daha sünek davranmıştır. Ancak lifler, cinsinden bağımsız olarak etriyesiz ve lifsiz kontrol numunesine kıyasla, bu çekme donatısı oranında sünekliği artırmamış; aksine düşürmüştür. Lifli kirişler kendi içerisinde incelendiğinde B1 serisinde olduğu gibi %0.5 oranında PPL katkısı %1.0 ÇL katkısından daha etkili olmuştur.

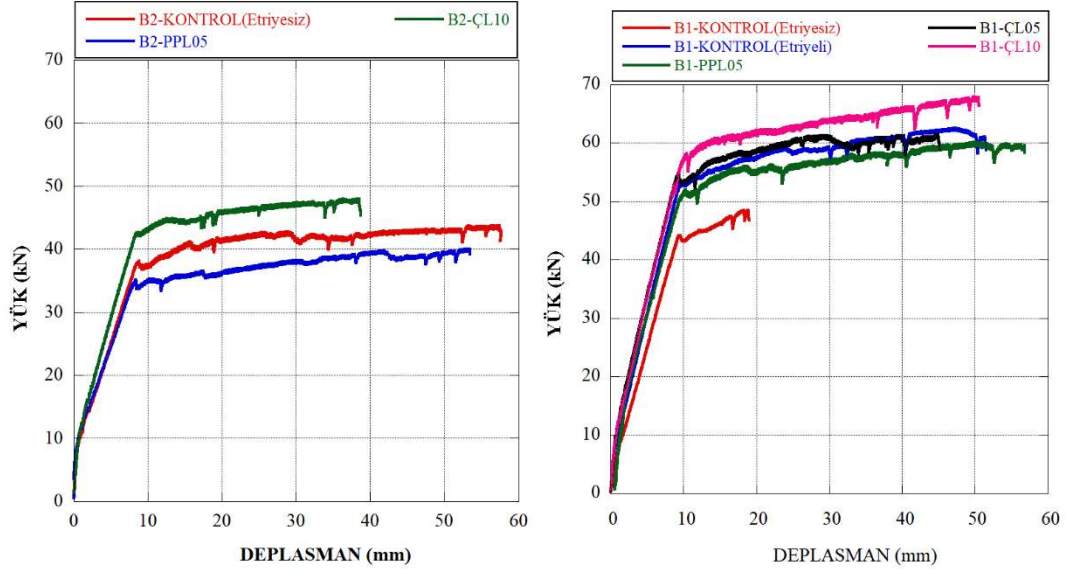


Şekil 17: Numunelerin süneklik katsayısı

3.6 Karşılaştırmalı Sonuçlar

Şekil 18’de B1 ve B2 serisine ait yük-deplasman grafikleri kendi içlerinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik incelendiğinde B1 etriyesiz kontrol numunesinin 44 kN yükte aktığı anlaşılmaktadır. Önceki bölümde gerçekleştirilen kapasite hesaplarında kiriş için 51.32 kN’lik bir akma yükü hesaplanmıştır. Bu iki değer karşılaştırıldığında %16.6 bir hata oranı ortaya çıkmaktadır. Bu hatanın ki burada görece düşük bir yükte akmadan bahsedilmektedir, Ersoy vd. [27] tarafından sunulan eserde bahsedildiği gibi kesme gerilmelerinin boyuna donatılara bindirdiği ilave gerilmeler nedeniyle oluşmuş olması mümkündür. Öte yandan B1 serisi kirişlerde minimum oranda etriye bulundurulması, %0.5 oranında ÇL veya PPL katkısı bu numunelerin hesapla tespit edilen akma kapasitelerine erişmelerine imkan tanımıştır. Ancak dikkat edilirse, B1 serisinde %1 oranında ÇL kullanıldığında akma kapasitesinin yaklaşık %10 arttırdığı gözlenmiştir.

B2 serisinde çekme donatısı oranının görece düşük oluşu kirişlerin eğilme kapasitesini tümüyle kullanmasına izin vermiştir. Öyle ki; etriyesiz kontrol numunesi 37 kN noktasal yüke eriştiğinde numune çekme donatılarının aktığı anlaşılmıştır. Bu yük, bir önceki bölümde analitik hesaplamayla tespit edilen akma yüküne eşittir. Söz konusu kirişin deneyi ani bir göçmenin engellenmesi amacıyla akma kapasitesinin %20 fazlasına kadar sürdürülmemiş ancak bu değer %13 fazlası olan 42 kN’ da durdurulmuştur. Diğer taraftan, hacimce %1.0 oranında ÇL katkısı kiriş numunesinin akma kapasitesini %8 kadar artırmıştır. Ancak %0.5’ PPL katkısı söz konusu kapasitenin %7 kadar düşmesine neden olmuştur. Bu durumun nedeni olarak liflerin varlığına bağlı olarak betonda oluşan boşluklu yapı ve hava muhteviyatındaki artış gösterilebilir [28]. Kirişlerin yük taşıma kapasitelerine bakıldığında, en yüksek performans kapasitede %10’ luk artışla B2-ÇL10 kirişinde tespit edilmiştir. Bu artış B1 serisinde gözlemlenen ile benzerdir. PPL kiriş numunesinde, B2-PPL05, akma kapasitesinde gözlemlenen %7’ lik azalma yük taşıma kapasitesine erişinceye dek sürmüştür.



Şekil 18: B1 ve B2 serisine ait yük-deplasman grafiği

Bölüm 4

Bilgisayar Destekli Analiz

4.1 Giriş

Sekiz adet betonarme kirişin üç-nokta eğilme deneyleri, FormWorks arayüz programı (ing. post-processor) vasıtasıyla modellenmiş ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar programı VecTor2 kullanılarak analiz edilmiştir. Söz konusu sonlu elemanlar yazılımı, iki boyutlu betonarme elemanların düzlem içi gerilme durumunu, Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisine dayalı analiz etmektedir. Bu teori, kesme ve normal gerilmelere maruz kalan betonarme membran elemanların yük-deformasyon ilişkisini kestirmeye çalışan analitik bir model olup; temelde üç set denklemden oluşmaktadır: (1) beton ve çelik malzeme için ortalama gerinim uygunluk denklemleri, (2) yine bu iki malzemede oluşan dış kuvvet ve iç direnç kuvvetlerinin denge şartları ve (3) denge şartlarıyla tespit edilen ortalama kuvvetler veya gerilmeler ile uygunluk denklemleriyle elde edilmiş gerinim denklemlerinin ilişkisini tanımlayan bünyesel denklemlerdir. Konunun teorisi hakkında daha detaylı bilgi [29]'da sunulmuştur.

4.2 Nümerik Modelleme

Daha önce de bahsedildiği gibi numune sonlu elemanlar modelleri FormWorks ön-işlemci yazılımında oluşturulmuştur [29]. Bu yazılımın kontrol panelinde yer alan '**Job**' menüsünden '**Define Job**' sekmesi tıklanarak Şekil 19'da sunulan pencere aracılığıyla: (1) 0.1 mm aralıklarla artımsal olarak göçme anına kadar sürdürülen bir yükleme protokolü ve (2) beton ile donatı çeliğinin bünyesel modelleri tanımlanmıştır. Tablo 6'da analizlerde kullanılan beton ve çelik malzemeler için seçilen bünye denklemleri özetlenmiştir.

Şekil 19: Görev tanımlama paneli

Bünyesel modellerin seçimi ve yükleme protokolü girişinin ardından, malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri tanımlanmıştır. Beton ve çelik lifler için kontrol panelinde yer alan ‘**Structure**’ menüsündeki ‘**Define Material**’ sekmesi tıklanmış ve Şekil 20’de sunulan malzeme özellikleri veri giriş penceresi kullanılmıştır. Ancak, çelik donatılar için ayrık (discrete) modelleme tekniği uygulandığından, donatı fiziksel ve mekanik özellikleri diğer iki malzemedan bağımsız olarak girilmiştir. Bunun için yine kontrol panelinde bulunan ‘**Structure**’ menüsünden ‘**Define Reinforcement Material**’ sekmesi tıklanmış ve Şekil 21’de sunulan pencere aracılığıyla veri girişi sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan malzemelere ait; beton basınç dayanımı, donatı çeliği akma ve nihai dayanımı, liflerin çapı, uzunluğu ve çekme dayanımı gibi mekanik ve fiziksel özellikler, üretici firma tarafından sağlanan verilerden ve yürütülen laboratuvar testlerinden elde edilmiştir. Ayrıca, beton çekme dayanımı gibi eksik ve gerekli diğer bilgiler için yazılımdaki varsayılan değerler kullanılmıştır.

Tablo 6: Malzemeler ve seçilen bünyesel modelleri

Malzemeler ve özellikleri	Bünyesel Model
Beton – Basma (Tepe öncesi)	Lifsiz kirişler: Hognestad ÇL' li kirişler: Lee et al. 2011 (FRC) PPL' li kirişler: Popovics (NSC)
Beton – Basma (Tepe sonrası)	Lifsiz kirişler: Modified Kent-Park ÇL' li kirişler: Lee et al. 2011 (FRC) PPL' li kirişler: Montoya 2003
Beton – Basma yumuşaması	Vecchio 1992-A (e1/e2 form)
Beton – Çekme rijitleşmesi	PPL' siz kirişler: Lee 2010 (w/Post Yield) PPL' li kirişler: Modified Bentz 2003
Beton – Çekme yumuşaması	Lifsiz kirişler: Linear PPL' li kirişler: Bilinear ÇL' li kirişler: Exponential
Lifli betonarme – Çekme	SDEM- Monotonic
Çelik donatı – Kama etkisi	Tassios (Crack Slip)
Çelik donatı- Burkulma	Akkaya 2012 (Modified Dhakal-Maekawa)

Şekil 20: Malzeme özellikleri veri giriş penceresi

Define Reinforcement Properties

Reinforcement Type

Type:

Reinforcement 1 Add

Reinforcement 2 Update

Reinforcement 3 Delete

Reinforcement Properties

Reference Type: Ductile Steel Reinforcement

Cross-Sectional Area: 339 mm²

Reinforcement Diameter, Db: 12 mm

Yield Strength, Fy: 500 MPa

Ultimate Strength, Fu: 670 MPa

Elastic Modulus, Es: 200000 MPa

Strain Hardening Strain, esh: 10 me

Ultimate Strain, eu: 150 me

Thermal Expansion Coefficient, Cs: 0 /°C

Prestrain, Dep: 0 me

Unsupported Length Ratio, b/t: 0

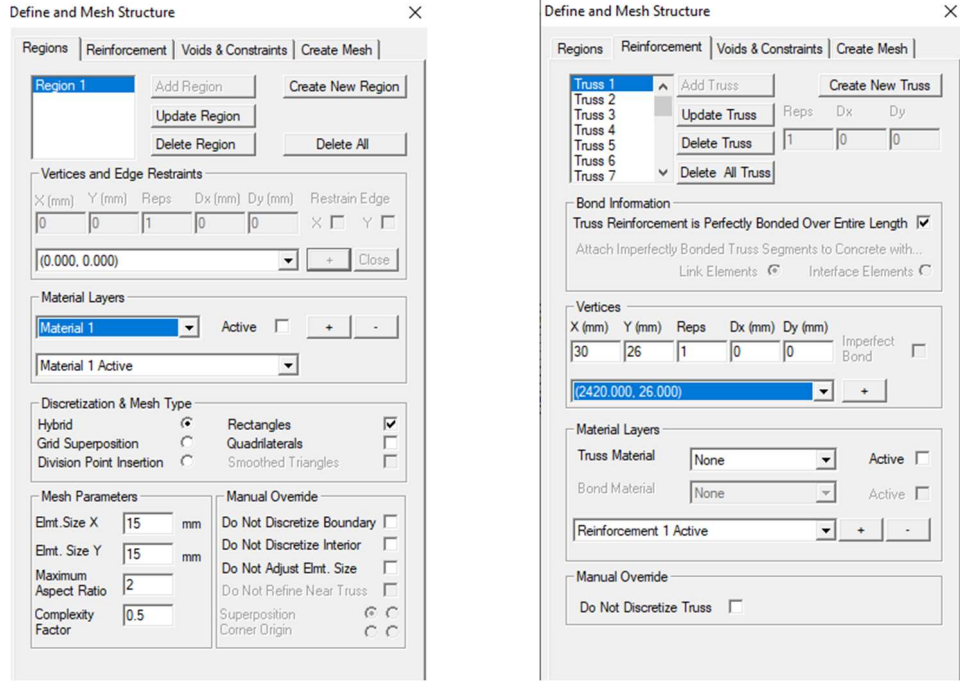
Color

Reinforcement material types to be used for truss elements only.

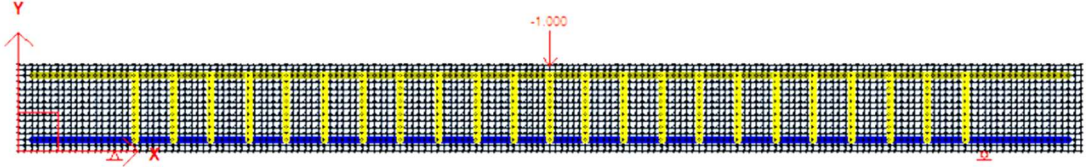
OK Cancel

Şekil 21: Çelik donatı malzeme özellikleri veri giriş penceresi

Malzeme özelliklerinin tanımlanmasıyla kiriş numunelerinin katı modelleri tam ölçekli olarak oluşturulmuştur. Bunun için kontrol panelinde yer alan ‘**Structure**’ menüsü kullanılmış ve ‘**Define and Mesh Structure**’ sekmesi tıklanmıştır. Ardından açılan pencerede, Şekil 22, kiriş elemanının köşe koordinatları girilmiş ve bu kapalı dikdörtgen alana belirli bir ağ modeli (mesh) uygulanmıştır. Ağ modeli, yapılan hassasiyet analizlerinin sonunda ortaya çıkmıştır. Buna göre, bir ayrıtı 15 mm ve en/boy oranı ise en çok iki olan dört noktalı düzlem gerilme elemanları beton malzeme için ve iki noktalı çubuk elemanlar ise çelik donatılar için kullanılmıştır. Ayrıca bu iki malzeme arasında aderansın tam sağlandığı varsayımı yapılmıştır. Nümerik modelleme çalışması, deneydekine benzer mesnet şartlarının (sabit ve hareketli) tanımlanmasıyla sonlandırılmıştır. Bunun için mesnetin hareketli veya sabit oluşuna göre ilgili noktalarda X, Y ve Z eksenleri ötelenmeye karşı kısıtlanmış ve dönmeye karşı serbest bırakılmıştır. Elde edilen kiriş sonlu elemanlar modeli Şekil 23’te sunulmuştur.



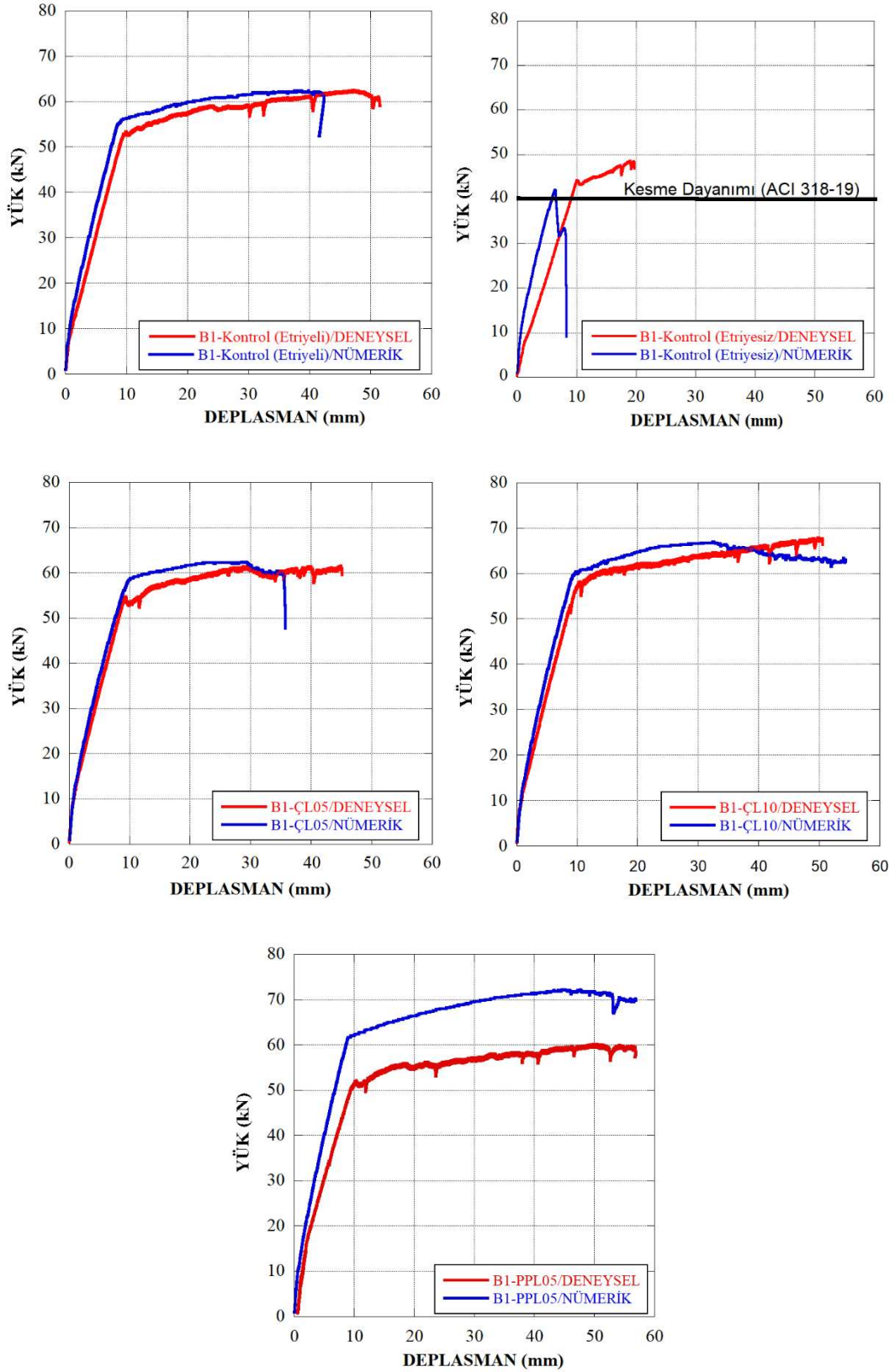
Şekil 22: Katı model atama pencereleri



Şekil 23: Kiriş sonlu elemanlar modeli

4.3 Analiz Sonuçları ve Tartışma

B1 serisi kiriş numunelerinin nümerik ve deneysel olarak elde edilen yük-deformasyon eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 24’te ve analiz sonunda elde edilen çatlak haritaları ise Şekil 25’te sunulmuştur.

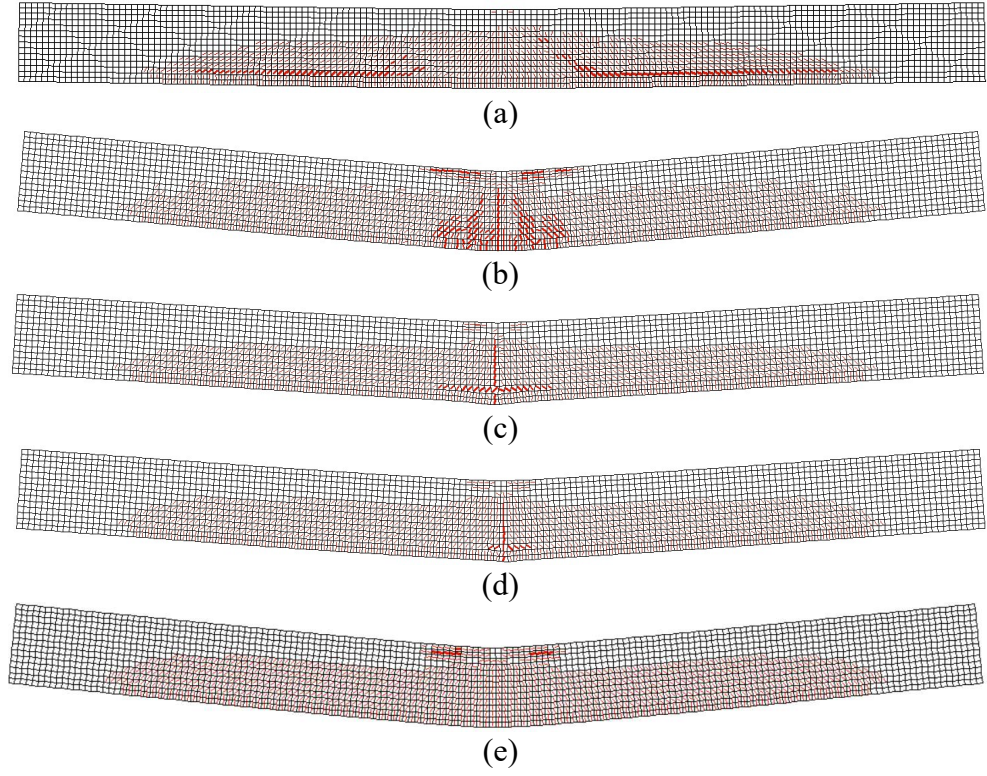


Şekil 24: B1 serisi kiriş numunelerinin deneysel ve nümerik olarak elde edilen yük-orta nokta deplasman karşılaştırması

Etriyeli kontrol numunesinin analiz sonuçları incelendiğinde, elde edilen akma ve yük taşıma kapasiteleri, deneysel kıyasla ihmal edilebilecek kadar az bir hatayla yüksek bulunmuştur. Buna ek olarak, yük-deformasyon ilişkisinin eğiminden elde edilen akma öncesi eğilme rijitliği, deneysel rijitlikle örtüşmüştür. Son olarak, momentin en yüksek olduğu bölgelerde majör eğilme ve eğilme-kesme çatlakları deneydeki hasara benzer şekilde bulunmuştur.

Etriyersiz B1 kontrol numunesinin analiz sonuçları numunede çekme donatılarının akmasından önce gerçekleşen prematüre bir kesme göçmesine işaret etmektedir. Bu durum çatlak haritaları incelendiğinde gövdede ve boyuna donatılar boyunca oluşan kesme çatlaklarıyla da doğrulanmaktadır. Ayrıca, bu kirişin analitik olarak tespit edilen kesme kapasitesi ile nümerik analizden elde edilen taşıma gücü kapasitesi aynıdır. Nümerik analizden hesaplanan eğilme rijitliği deneyle kıyaslandığında 1.35 kat daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, temelde testlerde ve analizde elde edilen çatlak haritasının farklılığından kaynaklanmaktadır.

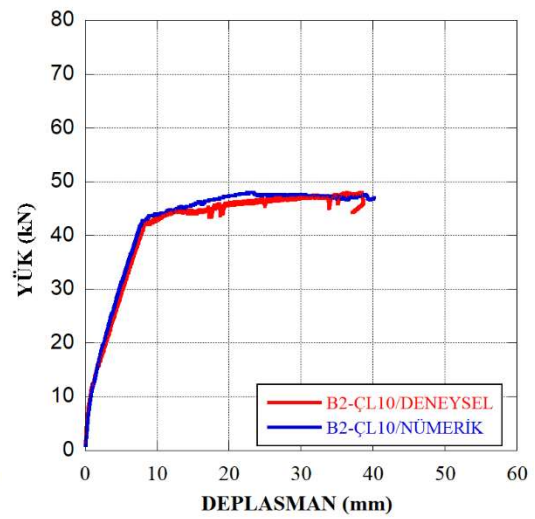
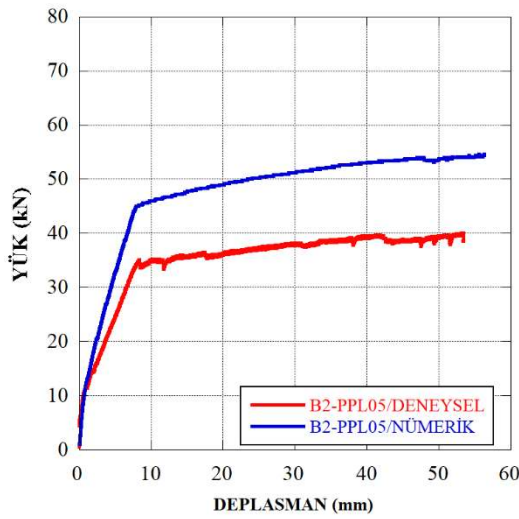
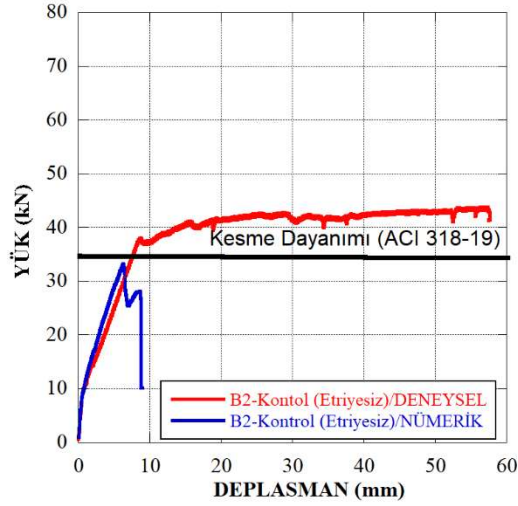
Bu serideki lif katkısı tüm kiriş numunelerinde çekme donatılarının akmasına izin vermiş ve prematüre bir kesme kırılmasının (göçmesinin) önüne geçmiştir. ÇL'ye sahip kirişlerde, akma dayanımı ve kiriş orta nokta deplasmanı, yük taşıma kapasitesi ile akma öncesi eğilme rijitliği gibi parametreler deneysel sonuçlarla örtüşürken, PP lifli numunede söz konusu parametrelerin tümü fazla tahmin edilmiştir.



Şekil 25: B1 serisi kirişlerinin nihai yükleme esnasında hasar durumları: (a) B1-kontrol (etriyesiz), (b) B1-kontrol (etriyeli), (c) B1-ÇL05, (d) B1-ÇL10, (e) B1-PPL-05.

Ayrıca, ÇL'li kirişler yük taşıma kapasitesine eriştiklerinde maksimum moment bölgesinde belirgin bir eğilme çatlakları ve çekme donatısı bölgesinde kesme çatlakları oluşmuştur. Yük ve deplasmanın artmasıyla söz konusu kesme çatlakları hızla çekme donatısı boyunca ilerlemiş ve böylelikle yük taşıma kapasitesi düşmeye başlamıştır.

B2 serisine ait yük-deplasman eğrileri Şekil 26'da sunulmuştur. Bu serideki etriyesiz kontrol numunesi, B1 etriyesiz kontrol numunesine benzer şekilde boyuna donatılar akmadan önce kesmeye bağlı geçmiştir.

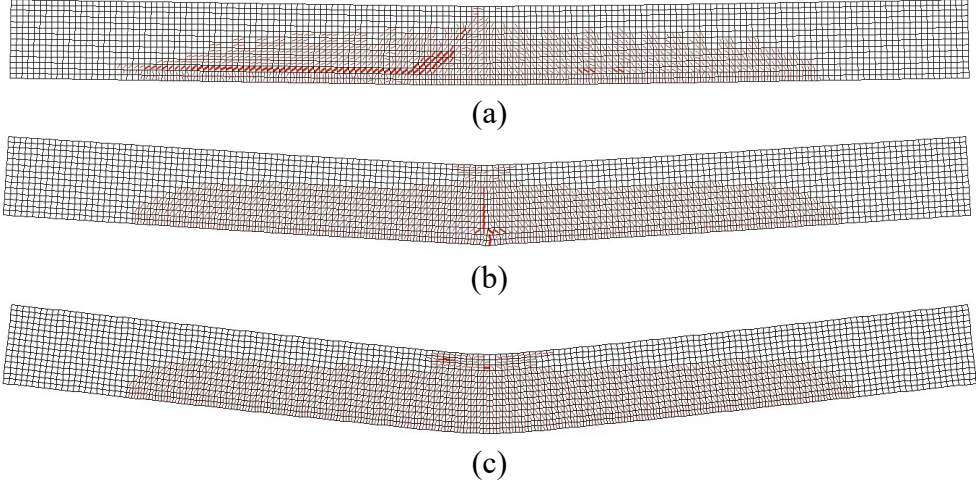


Şekil 26: B2 serisi kiriş numunelerinin deneysel ve nümerik olarak elde edilen yük-orta nokta deplasman karşılaştırması

Kesme dayanımı analitik hesaplama sonucuyla neredeyse benzerdir. Diğer taraftan, lif katkısı B1 serisinde olduğu gibi bu serideki kirişlere de eğilme kapasitelerini tam olarak kullanma imkanı tanımıştır. Özellikle ÇL içerikli kirişin akma ve taşıma kapasiteleri deneysel sonuca göre yüksek hassasiyetle tahmin edilmiş ancak, PPL içerikli kirişte ise söz konusu kapasiteler görece yüksek bulunmuştur. B2 serisinin akmadan önceki eğilme rijitliğine bakıldığında, kontrol ve ÇL içerikli kirişlerin paralellik gösterdiği görülmektedir. Bunların aksine PPL içerikli kirişin akmadan önceki eğilme rijitliğini deneyselle kıyasla 1.45 kat daha fazla tespit etmiştir.

Şekil 27'de B2 serisine ait hasar durumları gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, ÇL içerikli numune yük taşıma kapasitesine eriştiğinde açıklık ortasında major bir eğilme

çatlağı gerçekleştiği görülmektedir. Yük arttıkça kesme çatlakları çekme donatısı boyunca ilerlemiştir.



Şekil 27: B2 serisi kirişlerinin nihai yükleme esnasında hasar durumları: (a) B2-kontrol (etriyesiz), (b) B2-ÇL10, (d) B2-PPL-05

Bölüm 5

Sonuçlar

Bu tez kapsamında, sekiz adet büyük ölçekli ve çift donatılı betonarme kiriş üzerinde deneysel ve nümerik araştırmalar yürütülmüştür. Çalışmanın ana amacı lif tipinin ve hacimce yüzdesinin, boyuna donatı oranına bağlı olarak eğilmeye maruz kalan betonarme kiriş davranışına etkilerini incelemektir. Bu amaç için kirişlere çelik ve PP lifler hacimce %0.5 ve 1.0 oranında ilave edilmiştir. Ayrıca, boyuna donatı oranı üç-nokta yükleme altında kesme veya eğilme göçmesine sebebiyet verecek şekilde %0.86 ve 1.30 olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmanın yanı sıra; DBAT' a dayalı doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodunun VecTor2 yazılımı vasıtasıyla söz konusu tipteki kirişlerin davranışını ne derece temsil edebileceği de araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışma literatüre deneysel veri sağlayan önemli bir eser niteliği de taşımaktadır. Elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- ✓ Liflerin betonarme kiriş davranışı üzerindeki etkisi, çekme donatısı oranına bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin, görece yüksek oranda boyuna donatı içeren B1 serisi kirişlerinde %0.5 ÇL ve PPL katkısı eğilme kapasitesinin tam olarak kullanılmasına imkan vermiş, fakat daha düşük boyuna donatı oranına sahip B2 serisinde %0.5 PPL katkısının eğilme kapasitesi üzerine bir etkisi gözlemlenmemiştir.
- ✓ Hem yüksek hem de düşük boyuna donatı oranına sahip kirişlerde (B1 ve B2 serileri) %1.0 ÇL katkısının yük taşıma kapasitesinde %10' luk bir artış sağladığı anlaşılmıştır.

- ✓ Her iki kiriş grubunda da %0.5 oranında PPL kullanımını ÇL'ye göre sünekliği daha fazla artırmıştır. Ancak, çekme donatısı oranının yüksek olması durumunda (B1 serisi) lifler sünekliği kontrol numunelerine göre artırırken, donatı oranının düşük olması (B2 serisi) sünekliği de düşürmüştür.
- ✓ DBAT' a dayalı doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi için seçilen model, ÇL ve PPL içerikli betonarme kirişlerin akma ve taşıma kapasitesinin belirlenmesinde olumlu sonuçlar vermiştir. Fakat etriyesiz kontrol kirişleri için doğru tahminler yapılmamıştır. Bunun nedeni betonun gerçekte olan ile varsayılan çekme dayanımlarının farklı olmasıyla açıklanabilir. Genel olarak yük- deplasman ilişkileri doğru tahmin edilmiştir.

Kaynakça

- [1] G. A. Plizzari ve G. S. Tiberti, «Steel fibers as reinforcement for precast tunnel segment,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 21:3-4, 438-439, 2006.
- [2] W. A. Elsaigh vd, «Modeling the behavior of steel-fiber reinforced concrete ground slabs II: Development of slab model,» *Journal of Transportation Engineering*, pp. 137:12, 889-896, 2011.
- [3] A. Meda ve G. A. Plizzari, «New design approach for steel fiber-reinforced concrete slabs-on-ground based on fracture mechanics,» *ACI Structural Journal*, pp. 101:3, 298-30, 2004.
- [4] Hameed R., A. Sellier, A. Turatsinze ve F. Duprat , «Flexural behaviour of reinforced fibrous concrete beams,» *Experiaments and analytical modelling, Pak. J. Engg. and Appl. Sc.*, 13,, pp. 19-28, 2013.
- [5] Campione G., «Simplified flexural response of steel fiber-reinforced concrete beams,» *J. Mater. Civ. Eng.*, 20(4), pp. 283-293, 2008.
- [6] A. Karimipoura ve M. Ghalehnovib, «Comparison of the effect of the steel and polypropylene fibres on the flexural behavior of recycled aggregate concrete beams,» *Structures*, pp. 29, 129-146, 2021.
- [7] C. Folinoa, M. Ripania, H. Xargaya ve N. Roccaa, *Comprehensive analysis of Fiber Reinforced Concrete beams with conventional reinforcement*, Buenos Aires, 2019, p. 202.
- [8] S. Saatçi ve B. Batarlar, «Çelik Fiber Katkılı Etriyesiz Betonarme Kirişlerin Davranışı,» *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Dergisi*, 32, pp. 1143-1154, 2017.
- [9] A. Amin ve S. J. Foster, «Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups,» *Engineering Structures*, pp. 111, 323-332, 2016.
- [10] British Standards Institution, Eurocode 2 : design of concrete structures: British standard, London, 2008.
- [11] D. R. Sahoo vd, «Influence of steel and polypropylene fibers on flexural behavior of RC beams.,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 27:8, 2015.
- [12] A. Meda vd, «Flexural behavior of RC beams in fibre reinforced concrete,» pp. Composites: Part B, 43:8, 2930-2937, 2012.

- [13] Yardımcı M.Y., *Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [14] Özcan D. M., «Çelik Lif ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi,» %1 içinde *Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu*, Denizli, 2006.
- [15] F. Altun, D. Özcan, M. Vekli ve T. Haktadır, «Çelik Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Taşıma Gücünün Deneysel İncelenmesi,» %1 içinde *205 ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, Ankara, 2002.
- [16] S. K. Padmarajaiah ve A. Ramaswamy, «A Finite Element Assessment of Flexural Strength of Prestressed Concrete Beams with Fiber Reinforcement,» *Cement&Concrete Composites*, pp. 24:229-241, 2002.
- [17] S. A. Ashour vd, «Effect of the concrete compressive strength and tensile reinforcement ratio on the flexural behavior of fibrous concrete beams,» *Engineering Structures*, pp. 22, 1145-1158, 2000.
- [18] T. Wang ve T. Hsu , «Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures Using New Constitutive Models,» *Computers and Structures*, pp. 79, 2781-2791., 2001.
- [19] TS 10513, *Çelik Teller – Beton Takviyesinde Kullanılan.*, Ankara: Türk Standardları Enstitüsü, 1992.
- [20] İ. B. Topçu, *Beton Teknolojisi*, Eskişehir: Uğur Ofset A.Ş., 2006.
- [21] Z. Bayasi ve P. Soroushian , «Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete,» *ACI Materials Journal*, 1991, pp. 88:129-134.
- [22] A. Bentur ve S. Mindness, *Fiber Reinforced Cementitious*, London and NewYork, 1990.
- [23] B. Durmaz, *Bölgesel Basınca Maruz Lifli Betonlarda Yatak Mukavemeti*, Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [24] B. Bahadır, *Liflerin Beton Kırılma Tokluğuna Etkileri*, Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [25] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, «Türkiye bina deprem Yönetmeliği,» Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018.
- [26] S. Saatçi ve B. Batarlar, «Çelik Fiber Katkılı Etriyesiz Betonarme Kirişlerin Davranışı,» *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Dergisi*,32, pp. 1143-1154, 2017.
- [27] U. Ersoy, G. Özcebe ve T. Tankut , *Betonarme*, Ankara: ODTÜ Basını, 2016.
- [28] A. Aran, *Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler*, İstanbul: İ.T.Ü. Yayını, 1990.
- [29] P. S. Wong, F. J. Vecchio ve H. Trommels, *VecTor2 & FormWorks User's Manual*, 2002.

- [30] ASTM-A820M, Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, Philadelphia: American Society for Testing And Materials, 1996.
- [31] S. Yıldız ve ., Z. Ulucan, «Beton Borularda Cam Lif Katkısının Tepe Yük Dayanımına Etkisinin Araştırılması,» *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, pp. 23, 267-271, 2008.
- [32] U. Ersoy, «Betonarme kiriş ve kolonların moment kapasitelerinin saptanması,» *İMO Teknik Dergi*, pp. 9-44, 1781-1798,, 1998.
- [33] ACI318, «Building code requirements for structural concrete,» American Concrete Institute, 2019.
- [34] TBDY, «Türkiye bina deprem yönetmeliği,» Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, 2018.
- [35] F. J. Vecchio ve M. P. Collins, «The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear,» *ACI Structural Journal*, pp. 83:2, 219-231, 1986.
- [36] O. Fernández, d. I. F. Albert ve A. David, «IOP Conference Series Materials Science and Engineering 442(1):012008,» 2018.
- [37] «<https://www.roadsbridges.com/>,» [Çevrimiçi].
- [38] H. H. Dinh vd, «Shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams without stirrup reinforcement,» *ACI Structural Journal*, pp. 107:5, 597-606,, 2010.
- [39] A. A. Abbas vd, «Shear behavior of steel-fibre-reinforced concrete simply supported beams,» *Structures and Buildings*, pp. 167:SB9, 544-558, 2014.
- [40] Gülşan M.E., «Yüksek Mukavemetli Çelik Lif Katkılı Betonarme Değişken Kesitli Kirişlerin Mekanik Davranışı,» *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 8, Sayı 1,, pp. 206-214, 2019.
- [41] D. Y. Yoo vd, «Feasibility of replacing minimum shear reinforcement with steel fibers for suitable high-strength concrete beams,» *Engineering Structures*, pp. 147, 207-222,, 2017.

Ekler

Ek A

Veri Edinim Sistemi ve Sensörlerin
Teknik Özellikleri

A.1 Veri Edinim Sistemi

- Marka: Teknik Destek Grubu (TDG)
- Model: Test Box-1001

Technical Specifications

CHANNELS		INPUT / OUTPUT INTERFACES	
Number of Channels	8 per Device (Chassis)	Channel Inputs	DSUB9 Female
Extention	Up to 64 Channels (per Gateway)	Power Input and Chain	C14 Connector (IEC Power Cable, Computer Type)
Input Range	±10 V	Inter Connection (RS485)	2 x DSUB9 Male
Input Type	Differential	Gateway Communication	USB B Type (Printer Cable)
Gain Selection	Independent Adjustable Gain for Each Channel 8 levels from x1 to x890	Gateway Power	DC Jack
		Display	7-Segment Address Display
DIGITIZATION		PHYSICAL & ENVIRONMENTAL	
ADC	16 Bit, Delta-Sigma Oversampling	Dimensions	288 x 103 x 160 mm
Sampling Rate	8 Örnek / Saniye (Kanal Başına)	Operating Temperature	-20 C° ... + 60 C°
Sampling Type	Multiplexing	Storage Temperature	-30 C° ... + 80 C°
Dynamic Rate	< 72 dB	Enclosure	Aluminium, Laboratory Type
Filtering	Analog Anti-Aliasing Low Pass Filter		
COMMUNICATION		ACCESSORIES	
Devices and Gateway	RS485	TESTBOX Bridge	Gateway for Computer Connection (1 Gateway is Included Free of Charge To Be Used With Up To 8 Devices)
Connection to Computer	USB via Gateway	TESTBOX Q-Cable	120, 350 Ohm Quarter/Half Bridge Completion Cable
SENSOR COMPATIBILITY		TESTBOX RTD Cable	For Connection PT100 sensors
Compatible Sensor Types	Position Transducers (Potentiometric, DC Type, Strain Based) Load Cell LVDT (DC Type) Voltage Output Sensors Full Bridge Strain Based Sensors Strain Gauge (via Q-Cable) Thermocouple (via TC Connection Box) RTD (via RTD Cable)	Thermocouple	Connector Box for Multiple Thermocouple Inputs with Cold Junction Compensation Sensor
Sensor Excitation (Supply) Options	5 VDC, 10 V DC (Independently Adjustable via Switch For Each Channel)	CERTIFICATION	
POWER		CE	LVD (2014/35/EU) EMC (2014/30/EU)
Power Input	220 V AC - 50 Hz	Local	Home (Inland) Produce Certification
Power Consumption	10W Max.	Calibration	TDG Calibration Lab. Factory Calibration
Gateway	9V DC 500 mA Adapter	SOFTWARE	
		TDG Software	EASYTEST BASIC



Teknik Destek Grubu Bilimsel Ölçme Ltd. Şti.
ODTÜ Teknokent Bilişim İnovasyon Merkezi
Mustafa Kemal Mah. Dumlupınar Bul. 280G B-Blok
D:214 Çankaya/Ankara/TURKEY
P : +90 312 473 97 91-92
info@tdg.com.tr
www.tdg.com.tr

A.2 Tek Eksenli Gerinim Ölçer

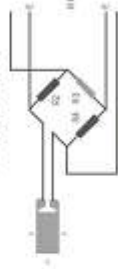
- Marka: Teknik Destek Grubu (TDG)
- Model: BF120 -10AA

STRAIN GAUGES BİRİM DEFORMASYON ÖLÇERLER

- Yüksek Performans-Maliyet
- TESTBOX Serisi Veri Toplama Sistemleri ile Uyumluluk
- 16-24 Bit Statik/Dinamik Ölçümler
- Uygun Maliyetli İnovatif Q-Cable Çözümü ile
- Pratik Çeyrek/Yarı/Tam Köprü Ölçümler
- 3 Telli Bağlantı-Sönt Kalibrasyon Opsiyonu
- Entegre Rozet Hesaplama
- EASYTEST ile Kolay Kalibrasyon ve Gerçek Zamanlı Hesaplama

TEST BOX SERIES

TEST BOX 1000
TEST BOX 2000



TEST BOX CABLE

Eğilim Üzerine Çözüm

TEMEL AKSESUARLAR
ÇN Yapımcısı
Bağlantı Terminali
Kablo

Strain ölçerler hem deformasyon ölçümü için en uygun maliyetli ve en yüksek doğrulukta laboratuvarlarda, üretim tesislerinde, alanlarda kullanılmaktadır. Her bir ölçer için bir dizi kalibrasyon işlemi gerekir. Bu işlem, ölçerlerin doğru ve güvenilir olarak çalışmasını sağlar.

Temel olarak birim ölçüm için, ölçerler kullanılmaktadır. Bu ölçerler, birim ölçüm için en uygun maliyetli ve en yüksek doğrulukta laboratuvarlarda, üretim tesislerinde, alanlarda kullanılmaktadır. Her bir ölçer için bir dizi kalibrasyon işlemi gerekir. Bu işlem, ölçerlerin doğru ve güvenilir olarak çalışmasını sağlar.

	IP-120-10AA	IP-120-20AA	IP-120-00A
Birim Ölçüm Boyutu (mm)	10x25	30x20	6x2,2
Taahhüt Boyutu (mm)	16,7x5,0	36,1x5,0	12,5x4,3
Diyer (µV)	220	120	320
Yük Hücresi Faktörü	2	2	2
Strain Limit	0,3	0,3	0,3
Faaliyet Ömrü (Yıllar)	105	105	105
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-20 ~ +60	-20 ~ +60	-20 ~ +60

1328 Sokak 5/6 Asmalı Öveder Ofisleri / Ankara / TÜRKİYE
Tel: +90 312 473 97 92 - Faks: +90 312 473 97 93
info@teknikdestek.com.tr - www.teknikdestek.com.tr

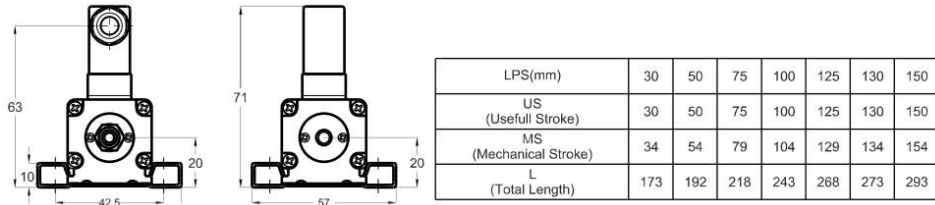
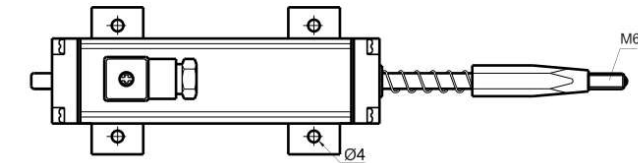
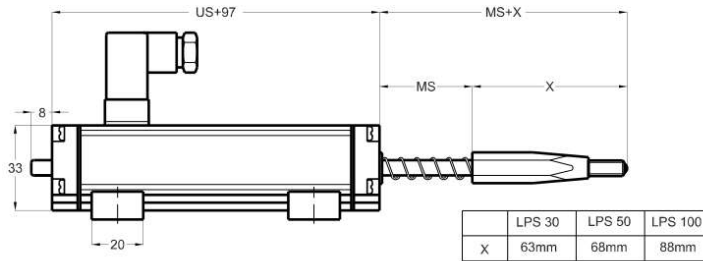


A.3 Lineer Potansiyometrik Cetvel

- Marka: Opkon
- Model: LPS-50-D-5K ve LPS-30-D-10K

Technical specifications

Measurement stroke	30 to 150 mm
Linearity	± %0.05
Repeatability	< 0,01 mm
Resolution	Infinite
Resistance	5 KOhm or 10 KOhm
Resistance tolerance	± %20
Load resistance	100 KOhm min.
Recommended cursor current	<1 µA
Permissible applied voltage	28 VDC max.
Electrical connections	4 pin connector
Displacement speed	< 5 m/s
Mechanical life	100 million cycles
Case dimensions	33 mm x 33 mm
Case material	Anodized aluminium
Rod material	Stainless steel



A.4 Yk Hücresi

- Marka: Keli Sensing Technology
- Model: LFSCE-A

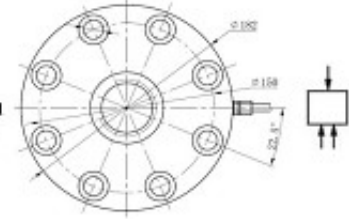


TTM
TEKNOLOJİ TASARIM MERKEZİ
Bilgisayar Yazılım Nakliyecilik Makine ve Kalıp Tic. Ltd. Şti.
Keykubat Mah. Yarma Sok. No: 17/A Karatay/KONYA
Tel: +90.332.3538491 - Fax: +90.332.3534303 - ttm@ttmteknoloji.com.tr

KELI LOAD CELL

Model: LFSCE-A Load Cell

Test makineleri, deneysel uygulamalar, aks baskl/kantarları
Test machines, experimental machines, axle-load scales etc.



LFSCE-A (20, 30 Ton)

TEKNİK ÖZELLİKLER TECHNICAL PARAMETERS		EXC + (Kırmızı, Red) EXC – (Siyah, Black)	SIG + (Yeşil, Green) SIG – (Beyaz, White)
Kapasite Rated capacities (Emax)	20, 30 Ton	Sıcaklık (Kompanse) Temperature range, compensated	-10°C ~ +40°C
Hassasiyet Sensitivity	3.0 ± 0.006 mv/V	Çalışma Sıcaklığı Temperature range, operating	-30°C ~ +70°C
Creep Error (30 min.) Total Error	± 0.05 %F.S. ± 0.3 %F.S	Maksimum Güvenli Yükleme Maximum safe overload	120 %F.S.
Sıfır Dengesi Zero Balance	± 1%F.S.	Doğru Tartım Limiti Ultimate overload	150 %F.S.
TCO (Temp. Effect on Min. Dead Load Output)	± 0.05 %F.S./10°C	Tavsiye Edilen Akım Excitation, recommend	10 ~ 12 VDC
TC SPAN (Temperature Effect on Sensitivity)	± 0.05 %F.S./10°C	Maksimum Akım Excitation, maximum	15 VDC
Giriş Direnci Input Impedance	760 ± 10 Ω	Koruma Sınıfı Protection Class	IP67
Çıkış Direnci Output Impedance	703 ± 2 Ω	Gvde Malzemesi Construction	Alloy Steel (Alaşım Çeliği)
İzolasyon Direnci Insulation Impedance	≥ 5000 MΩ	Kablo Çapı Cable Diameter: 6 mm	Kablo Uzunluğu Cable Length: 6 m.



www.ttmteknoloji.com.tr

TTM

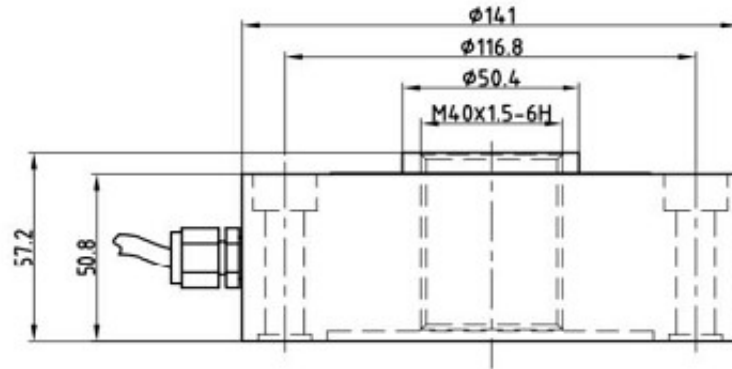
TEKNOLOJİ TASARIM MERKEZİ

Bilgisayar Yazılım Nakliyecilik Makine ve Kalıp Tic. Ltd. Şti.

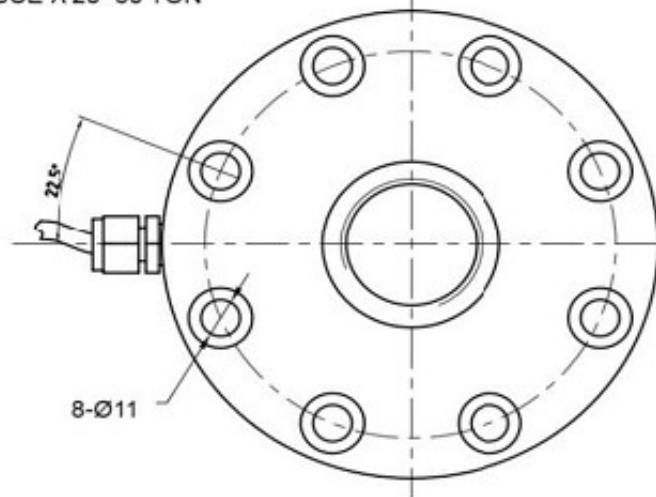
Keykubat Mah. Yarma Sok. No: 17/A Karatay/KONYA

Tel: +90.332.3538491 - Fax: +90.332.3534303 - ttm@ttmteknoloji.com.tr

Model: **LFSCE-A Load Cell**



LFSCE-A 20~30 TON



Özgeçmiş

Adı Soyadı: Çetin Akan

Eğitim:

2014–2018 Avrasya Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü

2019–2022 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Müh.

İş Deneyimi:

2020 – 2021 İzmir Gediz Yapı Denetim

2021 – 2022 İzmir Başaran Yapı Denetim