

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

**ANKASTRE MESNETLİ BETONARME KİRİŞLERDE
AÇIKLIK ORTASI DAİRESEL BOŞLUKLARIN
DAVRANIŞA OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL VE
NÜMERİK ANALİZİ**

**Hazırlayan
Hüseyin Hilmi ASLANBAY**

**Danışman
Prof. Dr. Fatih ALTUN**

Yüksek Lisans Tezi

**Temmuz 2021
KAYSERİ**

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

**ANKASTRE MESNETLİ BETONARME KİRİŞLERDE
AÇIKLIK ORTASI DAİRESEL BOŞLUKLARIN
DAVRANIŞA OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL VE
NÜMERİK ANALİZİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Hüseyin Hilmi ASLANBAY**

**Danışman
Prof. Dr. Fatih ALTUN**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Tarafından FYL-2020-10446 Kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Temmuz 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Hüseyin Hilmi ASLANBAY

YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI

“Ankastre Mesnetli Betonarme Kirişlerde Açıklık Ortası Boşlukların Davranışa Olan Etkisinin Deneysel ve Nümerik Analizi ” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Hüseyin Hilmi ASLANBAY

Danışman

Prof. Dr. Fatih ALTUN

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın tüm aşamalarında gerek engin bilgi ve tecrübeleriyle bana yön veren, gerekse ilgi ve desteğini her an olsun hissettiren, tez çalışmamın ilerleyişinde ve şekillenmesinde çok büyük katkıları olan değerli hocam Prof. Dr. Fatih ALTUN'a saygı, minnet ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Dr. Öğr. Üyesi Tamer DİRİKGİL, Dr. Öğr. Üyesi Oğuz DÜĞENCİ ve Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Özbayrak'a katkılarından dolayı teşekkür ederim. Üretim ve deneysel çalışmalarım boyunca yardımlarını ve emeğini esirgemeyen Arş. Gör. Yüksel GÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımın tamamında aktif olarak görev alan, çalışmaların sorunsuz şekilde ilerlemesinde büyük emek ve özveri gösteren, her daim koşulsuz yardımlarını sunan Sayın Enes ASLANBAY ve Sayın Yusuf ÇİLENKOĞLU' na teşekkürlerimi ve minnetimi bir borç bilirim. Nümerik çalışmalarında yardımını esirgemeyen Sayın Enes YURTERİ'ne teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca manevi desteklerini daima yanımda hissettiğim üzerimde sonsuz emek ve hakları bulunan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin Hilmi ASLANBAY

Temmuz 2021, KAYSERİ

ANKASTRE MESNETLİ BETONARME KİRİŞLERDE AÇIKLIK ORTASI DAİRESEL BOŞLUKLARIN DAVRANIŞA OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ

Hüseyin Hilmi ASLANBAY

**Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2021
Danışman: Prof. Dr. Fatih ALTUN**

ÖZET

Betonarme kirişlerin belirli bölgelerinde çeşitli sebeplerden dolayı farklı geometrilerde boşluklar oluşturulmaktadır. Bırakılan bu boşluk bölgelerindeki etriyelerin çoğunlukla kesilmesi veya beton kesitinin daralması sebebiyle yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Bu durum kiriş davranışına olumsuz etki yapmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, boşlukların betonarme kirişin davranışı üzerine etkilerinin deneysel ve nümerik olarak analiz edilmesi hedeflenmiştir. Boşluklar, betonarme kirişlerin eğilme bölgesinde yani açıklık ortasında oluşturulmuştur. Boşluklar dairesel olarak kiriş yüksekliğinin %20, %40 ve %60 oranında konumlandırılmıştır. Mesnetler gerçek davranışı daha yakın temsil etmesi açısından ankastre mesnet olarak planlanmıştır. Kiriş numuneleri gerçek boyutlarda 1/1 ölçekte imal edilmiştir. Çalışma sonucunda, boşluk oranlarının artması süneklilikte belirli bir boşluk yüzdesine kadar artışa sebebiyet vermiştir. Özellikle kiriş derinliğine göre dairesel boşluk yüksekliğinin %40'ın üzerinde olması durumunda süneklilik azalmış ve davranışta ani kırılmalar gerçekleşmiştir. Boşluk üzerindeki et kalınlığının kiriş yüksekliğinin %20'sinden fazla tutulması betonarme davranış için önemlidir. ABAQUS sonlu elemanlar programında nümerik sonuçlarda değerlendirildiğinde, boşluk yüksekliğinin kiriş yüksekliğinin %40'ından fazla olması durumunda ani kırılmalar gelişmektedir. Benzer şekilde boşluk üzeri et kalınlığının kiriş yüksekliğinin %20'sinden fazla olması, donatı ve betondaki gerilme yığılmalarını azaltmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme boşluklu kiriş, ankastre mesnet, eğilme davranışı, süneklilik, ABAQUS.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF MID-SPAN CIRCULAR OPENINGS ON BEHAVIOR IN RC BEAMS WITH FIXED SUPPORT

Hüseyin Hilmi ASLANBAY

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, Temmuz 2021

Supervisor: Prof. Dr. Fatih ALTUN

ABSTRACT

Due to various reasons, openings in different geometries are formed in certain parts of reinforced concrete beams. High stresses occur due to the fact that the stirrups in these opening zones are mostly cut or the concrete section is narrowed. This situation affects the beam behavior negatively. Within the scope of this thesis, it is aimed to analyze the effect of openings on the behavior of reinforced concrete beams, empirically and numerically. The openings are formed in the bending zone of the reinforced concrete beams, that is, in the middle of the span. The openings are positioned circularly at 20%, 40% and 60% of the beam height. The supports are planned as fixed support in order to represent the real behavior more closely. Beam samples were produced in 1/1 scale in real dimensions. As a result of the study, the increase in opening ratios caused an increase in ductility up to a certain percentage of openings. Especially when the circular opening height is over 40% relative to the beam depth, the ductility decreased and instantaneous rupture in the behavior occurred. It is important for reinforced concrete behavior that the wall thickness above the opening is more than 20% of the beam height. When evaluated in numerical results in the ABAQUS finite element program, instantaneous rupture develop when the opening height is more than 40% of the beam height. Similarly, the fact that the wall thickness over the opening is more than 20% of the beam height reduces the stress concentrations in the reinforcement and concrete.

Keywords: RC Beam with opening, fixed support, flexural behavior, ductility, ABAQUS.

İÇİNDEKİLER

ANKASTRE MESNETLİ BETONARME KİRİŞLERDE AÇIKLIK ORTASI DAİRESEL BOŞLUKLARIN DAVRANIŞA OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	iii
KABUL ve ONAY	iv
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xii
TABLolar LİSTESİ	xvi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgi	3
1.2. Araştırmanın Amacı	4
1.3. Araştırmanın Özgün Değeri	4
1.4. Araştırmanın Etkisi ve Katkısı	6
1.5. Literatürde Mevcut Çalışmalar	7

2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deney Numuneleri	24
2.1.1. Boyut, Geometrik ve Diğer Parametrelerinin Belirlenmesi	24
2.1.1.1. Referans (Boşluksuz) Kirişler	27
2.1.1.2. Boşluklu Kirişler	27
2.1.1.3. 120 mm Çaplı % 20 Boşluk oranına Sahip Kirişler	27
2.1.1.4. 240 mm Çaplı % 40 Boşluk Oranına Sahip Kirişler	28
2.1.1.5. 360 mm Çaplı % 60 Boşluk Oranına Sahip Kirişler	28

2.1.2. Beton Sınıfı, Donatı Bilgileri ve Detayları	29
2.1.2.1. Boyuna Donatının Belirlenmesi ve Yönetmelik Kriterlerine Uygunluğu	29
2.1.2.2. Kesme Donatısının Belirlenmesi ve Yönetmelik Kriterlerine Uygunluğu.....	30
2.1.2.3. Numunelerin Donatı Şeması ve Bilgileri	31
2.1.3. Ankastre Boşluksuz Kirişin Teorik Taşıma Gücü Hesabı	32
2.2. Numunelerin Üretimi.....	35
2.2.1. Deney Numunelerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri	40
2.2.1.1. Beton Basınç ve Çekme Deneyleri	41
2.2.1.2. Donatı Numuneleri Çekme Deneyleri	44
2.3. Betonarme Kiriş Deneyleri.....	45
2.3.1. Deney Düzenegi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	45
2.3.1.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması	45
2.3.1.2. Deney Düzeneginin Kurulması	46
2.3.1.3. Deney Numunesinin Düzenegine Yerleştirilmesi	49
2.3.1.4. Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Ekipmanlar	51
2.3.1.5. Deplasman Ölçerlerin Bağlanması	52

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Deneyler	54
3.1.1. Deney Numunelerine Ait Sonuçlardan Elde Edilecek Veriler ve Grafikler.....	54
3.1.1.1 Yük-Deplasman Grafiklerinin Elde Edilmesi	55
3.1.1.2 Süneklik Değerinin Elde Edilmesi	55
3.1.1.3. Rijitlik Grafiklerinin Çizilmesi	56
3.1.1.3. Tüketilen Enerji Miktarlarının Hesaplanması.....	57
3.1.1.4. Moment Eğrilik Grafiklerinin Çizilmesi.....	57
3.2. Deney Sonuçları.....	59
3.2.1. Referans-1 Deney Numunesi	59
3.2.2. Referans-2 Deney Numunesi	64
3.2.3. K1 Deney Numunesi.....	69

3.2.4. K2 Deney Numunesi.....	74
3.2.5. K3 Deney Numunesi.....	79
3.2.6. K4 Deney Numunesi.....	84
3.2.7. K5 Deney Numunesi.....	89
3.2.8. K6 Deney Numunesi.....	94
3.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	99
3.3.1. Yük-Orta Nokta Deplasman Grafiklerinin Karşılaştırılması.....	99
3.3.2. Moment Eğrilik Grafiklerinin Karşılaştırılması.....	103
3.3.3. Rijitlik Grafiklerinin Karşılaştırılması	106
3.3.4. Eğim Açısı Grafiklerinin Karşılaştırılması.....	108
3.3.5. Deplasman Eğrilerinin Karşılaştırılması	109
3.3.6. Toplam Tüketilen Enerji Miktarının Karşılaştırılması	110
3.3.7. Numunelerin Kırılma Anlarının Karşılaştırılması	112
3.3.8. Numunelerin Süneklilik Değerlerinin Karşılaştırılması	114

4. BÖLÜM

NÜMERİK ÇALIŞMA AŞAMASI

4.1. Giriş	115
4.2. Sayısal Modellemenin Oluşturulması.....	115
4.2.1. Kesit Geometrilerinin Oluşturulması ve Kesit Atamaları	117
4.2.2. Malzeme Modellerinin Oluşturulması	118
4.2.3. Temas Yüzeylerinin Oluşturulması ve Donatı Beton Etkileşimi	124
4.2.4. Analiz Yönteminin Belirlenmesi	125
4.2.5. Sınır ve Yükleme Şartlarının Oluşturulması.....	126
4.3. Analiz Sonuçları	128
4.3.1. Referans Numunesi Analiz Sonuçları	128
4.3.2. % 20 Boşluklu Numunenin Analiz Sonuçları.....	131
4.3.3. % 40 Boşluklu Numunenin Analiz Sonuçları.....	133
4.3.4. %60 Boşluklu Numunenin Analiz Sonuçları.....	135
4.3.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	138

5. BÖLÜM

DENEYSEL ve NÜMERİK SONUÇLAR

5.1. Referans Numunelerinin Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması	139
5.2. %20 Boşluklu Numunelerin Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması	140
5.3. %40 Boşluklu Numunelerin Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması	140
5.4. %60 Boşluklu Numunelerin Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması	141

6. BÖLÜM

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar	143
6.2. Öneriler	145
KAYNAKLAR	147
EKLER.....	155
ÖZGEÇMİŞ.....	163

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

a	: Kesme Açıklığı
A_c	: Kiriş en kesit alanı
A_s	: Kiriş çekme donatısı alanı
A_{sw}	: Kesme donatısı toplam kesme alanı
b_w	: Kiriş genişliği
$B420C$	: Betonarme elemanlar için beton çeliği
c	: Tarafsız eksen derinliği
cm	: Santimetre
$C25/30$	: Betonun 28 günlük silindir basınç dayanımı
d	: Kiriş faydalı yüksekliği
d_c	: Betonun eksenel basınç durumundaki hasar parametresi
d_t	: Betonun eksenel çekme durumundaki hasar parametresi
d'	: Pas payı
E	: Elastisite modülü
E_o	: Başlangıç elastisite modülü
f_{ck}	: Betonun karakteristik silindir basınç dayanımı
f_{cd}	: Betonun tasarım basınç dayanımı
f_{ctk}	: Betonun karakteristik çekme dayanımı
f_{ctd}	: Betonun tasarım çekme dayanımı
f_{yk}	: Donatının karakteristik akma dayanımı
f_{yd}	: Donatının tasarım akma dayanımı
f_{ywk}	: Enine donatının karakteristik akma dayanımı
f_{ywd}	: Enine donatının tasarım akma dayanımı
h	: Kiriş yüksekliği

I_{eq}	: Mesh boyutu
K	: Eğrilik
k_1	: Beton sınıfına bağlı olan katsayı
K_{ilk}	: Deney numunesinin ilk yüklemede olan rijitlik değeri
K_j	: Deney numunesinin i'inci yüklemede rijitlik değeri
kN	: Kilo Newton
L	: Kiriş boyu
L_{net}	: Kiriş net açıklığı
L_{top}	: Kiriş toplam boyu
M	: Eğilme Momenti
m	: Metre
mm	: Milimetre
Mpa	: Mega Pascal
M_r	: Taşıma Gücü Momenti
N	: Eksenel Kuvvet
rad	: Radyan
s	: Enine donatı aralığı
t	: Döşeme kalınlığı
T	: Tablalı
u	: Yer değiştirme
V	: Kesme Kuvveti
V_c	: Kesme dayanımına betonun katkısı
V_{cr}	: Kesitin kesmede çatlama dayanımı
V_r	: Kesme Dayanımı
V_w	: Kesme dayanımına enine donatı katkısı
w	: Çatlak genişliği
ψ	: Dilasyon açısı

ϵ	: Akma yüzeyi eksantrisitesi
Δ	: Deplasman
δ_i	: i'inci yüklemede deney numunesinde meydana gelen deplasman
$\delta_{\max}$	: Deney numunesinde meydana gelen maksimum deplasman
δ_u	: Deney numunesinde meydana gelen göçme anındaki deplasman
δ_y	: Akma anında meydana gelen deplasman
ϵ	: Şekil değiştirme
ϵ_c	: Betonun birim şekil değiştirmesi
ϵ_c^{in}	: Betonun inelastik birim şekil değiştirmesi
ϵ_c^{pl}	: Betonun plastik birim şekil değiştirmesi
ϵ_{cu}	: Betonun ezilme birim şekil değiştirmesi
ϵ_s	: Donatının çekme birim şekil değiştirmesi
ϵ_s^{pl}	: Donatının plastik birim şekil değiştirmesi
ϵ_{su}	: Kopma anında donatı çekme birim şekil değiştirmesi
ϵ_t	: Betonun çekme birim şekil değiştirmesi
ϵ_{to}	: σ_{to} değerine karşılık gelen betonun çekme birim şekil değiştirmesi
ϵ_t^{ck}	: Betonun çatlama sonrası inelastik birim şekil değiştirmesi
ϵ_t^{pl}	: Betonun asal plastik çekme birim şekil değiştirmesi
K	: Çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranı
μ	: Vizkozite parametresi
σ	: Gerilme
σ_c	: Beton basınç gerilmesi
σ_{cu}	: Beton maksimum basınç gerilmesi
σ_t	: Beton çekme gerilmesi
σ_s	: Donatı gerilmesi

σ_{bo} / σ_c	: Başlangıç eksenel akma gerilmesinin başlangıç eksenel basınç basınç gerilmesine oranı
$\emptyset$	: Donatı çapı
ρ	: Donatı oranı
ρ_b	: Dengeli donatı oranı
ρ_{max}	: Maksimum donatı oranı
ρ_{min}	: Minimum donatı oranı

Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute
BHP	: Beton hasar plastisite
K-1	: %20 boşluk oranına sahip birinci betonarme kiriş
K-2	: %20 boşluk oranına sahip ikinci betonarme kiriş
K-3	: %40 boşluk oranına sahip birinci betonarme kiriş
K-4	: %40 boşluk oranına sahip ikinci betonarme kiriş
K-5	: %60 boşluk oranına sahip birinci betonarme kiriş
K-6	: %60 boşluk oranına sahip ikinci betonarme kiriş
R-1	: Boşluksuz birinci referans betonarme kiriş
R-2	: Boşluksuz ikinci referans betonarme kiriş
LVDT	: Elektronik deplasman ölçer
PC	: Potansiyometrik Cetvel
PEEQT	: Eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme
SR	: Shear reinforcement (Kesme donatısı)
ST	: Sonlu Elemanlar
TBDY 2018	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
TS 500 (2000)	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Kiriş numunelerinin adlandırılması ve boyut özellikleri	26
Tablo 2.2. Kiriş numune boyutları	26
Tablo 2.3. Seçilen beton ve donatı sınıfının mekanik özellikleri.....	29
Tablo 2.4. Deney numunelerine ait donatı özellikleri.....	31
Tablo 2.5. Değişken yükler altında referans kirişte oluşacak olan moment değerleri	32
Tablo 2.6. Moment hesabı için gerekli malzeme bilgileri	33
Tablo 2.7. 7 ve 28 Günlük kür yapılan beton basınç testi sonuçları	42
Tablo 2.8. TS 500 (2000)'e göre elastisite modülü değerleri	44
Tablo 2.9. Donatı numunelerine ait mekanik özellikler.....	45
Tablo 3.1. Tüm numuneler için yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması	101
Tablo 3.2. Tüm numuneler için moment-eğrilik karşılaştırmaları	105
Tablo 3.3. Tüm numuneler için rijitlik değerlerinin karşılaştırmaları	107

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Çelik ankastre mesnetli kiriş düzeneği	5
Şekil 2.1. Betonarme kiriş yükleme deney düzeneği	24
Şekil 2.2. Kiriş yükleme durumu	25
Şekil 2.3. Kiriş kesme kuvveti diyagramı	25
Şekil 2.4. Kiriş moment diyagramı	25
Şekil 2.5. Referans numunelerinin boyutları	27
Şekil 2.6. 120 mm çaplı % 20 boşluk oranına sahip numunelerin boyutları	28
Şekil 2.7. 240 mm çaplı % 40 boşluk oranına sahip numunelerin boyutları	28
Şekil 2.8. 360 mm çaplı % 60 boşluk oranına sahip numunelerin boyutları	28
Şekil 2.9. Deney numunelerinin donatı şeması ve detayı	31
Şekil 2.10. XTRACT programında oluşturulan kiriş moment-eğrilik diyagramı.....	32
Şekil 2.11. Deney numunelerinin kalıp imalatı.....	35
Şekil 2.12. Boşluklar için kullanılan sac ve boru malzemeler	36
Şekil 2.13. Donatıların ve boşlukların hazırlanması ve yerleşimi	36
Şekil 2.14. Kalıpların desteklenmesi ve silindir numunelerin hazırlanması.....	37
Şekil 2.15. Silindir numunelere beton dökümü.....	37
Şekil 2.16. Kiriş numunelerine beton dökümü	38
Şekil 2.17. Deney numunelerinin kür işlemi	39
Şekil 2.18. Silindir numunelerin kür havuzuna konulması	40
Şekil 2.19. Deney numunelerinin laboratuvara taşınması.....	40
Şekil 2.20. Deplasman ölçer saat ve basınç test cihazı	41
Şekil 2.21. Silindir numunelere kükürt başlık yapma işlemi	41
Şekil 2.22. Basınç testi deneyleri	42
Şekil 2.23. Yarmada çekme testi deneyleri.....	43
Şekil 2.24. Donatı numuneleri çekme deneyleri	44
Şekil 2.25. Numunelerin boyanması ve pürüzlerinin giderilmesi.....	46
Şekil 2.26. Deney düzeneğinde kullanılan ankastre mesnet ayağı.....	46
Şekil 2.27. Ankastre mesnet ayaklarının deney platformundaki konumları	47
Şekil 2.28. Çerçeve sistemi destekleyen payandalar.....	47
Şekil 2.29. Yükleme düzeneğinin bağlanması ve sabitlenmesi	48
Şekil 2.30. Yükleme aparatının bağlanması.....	48

Şekil 2.31. Yükleme kirişinin hazırlanması	49
Şekil 2.32. Deney numunesinin düzeneğe yerleştirilmesi	49
Şekil 2.33. Deplasman ölçerlerin bağlanacağı düzeneklerin imalatı	50
Şekil 2.34. Yükleme kirişi.....	50
Şekil 2.35. Hidrolik piston ve yük hücresi.....	51
Şekil 2.36. Elektrikli motor ve veri toplama cihazı	51
Şekil 2.37. Deplasman ölçerler (LVDT ve Potansiyometrik Cetvel).....	52
Şekil 2.38. Deplasman ölçerlerin deney düzeneğindeki konumları	52
Şekil 2.39. Deplasman ölçerlerin bağlanması	53
Şekil 3.1. Süneklik değerinin elde edilmesi	55
Şekil 3.2. Rijitlik değerlerinin Elde Edilmesi	56
Şekil 3.3. Tüketilen enerji miktarının hesaplanması.....	57
Şekil 3.4. Kiriş numunelerinin eğriliklerinin belirlenmesi (Ünal A., 2016)	58
Şekil 3.5. R-1 numunesinin deney öncesi görünümü.....	59
Şekil 3.6. R-1 numunesinin deney sonrası görünümü	60
Şekil 3.7. R-1 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları.....	60
Şekil 3.8. R-1 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....	61
Şekil 3.9. Mesnet bölgesi kesme çatlakları	61
Şekil 3.10. R-1 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği.....	62
Şekil 3.11. R-1 numunesi moment-eğrilik grafiği	62
Şekil 3.12. R-1 numunesi rijitlik grafiği	63
Şekil 3.13. R-1 numunesi eğim açısı grafiği.....	63
Şekil 3.14. R-1 numunesi deplasman eğrileri	63
Şekil 3.15. R-2 numunesinin deney öncesi görünümü.....	64
Şekil 3.16. R-2 numunesinin deney sonrası görünümü	65
Şekil 3.17. R-2 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları	65
Şekil 3.18. R-2 numunesinin çatlaklarının ölçülmesi	65
Şekil 3.19. R-2 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....	66
Şekil 3.20. Mesnet bölgesi kesme çatlakları	66
Şekil 3.21. R-2 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği.....	67
Şekil 3.22. R-2 numunesi moment-eğrilik grafiği	67
Şekil 3.23. R-2 numunesi rijitlik grafiği	68
Şekil 3.24. R-2 numunesi eğim açısı grafiği.....	68

Şekil 3.25. R-2 numunesi deplasman eğrileri	68
Şekil 3.26. K-1 numunesinin deney öncesi görünümü	69
Şekil 3.27. K-1 numunesinin deney sonrası görünümü	70
Şekil 3.28. K-1 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları	70
Şekil 3.29. K-1 numunesinin hasar dağılımı	70
Şekil 3.30. K-1 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....	71
Şekil 3.31. Mesnet bölgesi kesme çatlakları	71
Şekil 3.32. K-1 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği.....	72
Şekil 3.33. K-1 numunesi moment-eğrilik grafiği	72
Şekil 3.34. K-1 numunesi rijitlik grafiği	73
Şekil 3.35. K-1 numunesi eğim açısı grafiği.....	73
Şekil 3.36. K-1 numunesi deplasman eğrileri	73
Şekil 3.37. K-2 numunesinin deney öncesi görünümü	74
Şekil 3.38. K-2 numunesinin deney sonrası görünümü	75
Şekil 3.39. K-2 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları	75
Şekil 3.40. K-2 numunesinin hasar dağılımı	75
Şekil 3.41. K-2 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....	76
Şekil 3.42. Mesnet bölgesi kesme çatlakları	76
Şekil 3.43. K-2 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği.....	77
Şekil 3.44. K-2 numunesi moment-eğrilik grafiği	77
Şekil 3.45. K-2 numunesi rijitlik grafiği	78
Şekil 3.46. K-2 numunesi eğim açısı grafiği.....	78
Şekil 3.47. K-2 numunesi deplasman eğrileri	78
Şekil 3.48. K-3 Numunesinin deney öncesi görünümü.....	79
Şekil 3.49. K-3 Numunesinin deney sonrası görünümü	80
Şekil 3.50. K-3 Numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları	80
Şekil 3.51. K-3 Numunesinin hasar dağılımı	80
Şekil 3.52. K-3 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....	81
Şekil 3.53. Mesnet bölgesi kesme çatlakları	81
Şekil 3.54. K-3 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği.....	82
Şekil 3.55. K-3 numunesi moment-eğrilik grafiği	82
Şekil 3.56. K-3 numunesi rijitlik grafiği	83
Şekil 3.57. K-3 numunesi eğim açısı grafiği.....	83

Şekil 3.58. K-3 numunesi deplasman eğrileri	83
Şekil 3.59. K-4 numunesinin deney öncesi görünümü	84
Şekil 3.60. K-4 numunesinin deney sonrası görünümü	85
Şekil 3.61. K-4 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları	85
Şekil 3.62. K-4 numunesinin hasar dağılımı	85
Şekil 3.63. K-4 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....	86
Şekil 3.64. Mesnet bölgesi kesme çatlakları	86
Şekil 3.65. K-4 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği.....	87
Şekil 3.66. K-4 numunesi moment-eğrilik grafiği	87
Şekil 3.67. K-4 numunesi rijitlik grafiği	88
Şekil 3.68. K-4 numunesi eğim açısı grafiği.....	88
Şekil 3.69. K-4 numunesi deplasman eğrileri	88
Şekil 3.70. K-5 numunesinin deney öncesi görünümü	89
Şekil 3.71. K-5 numunesinin deney sonrası görünümü	90
Şekil 3.72. K-5 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları	90
Şekil 3.73. K-5 numunesinin hasar dağılımı, donatı burkulması.....	90
Şekil 3.74. K-5 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....	91
Şekil 3.75. Mesnet bölgesi kesme çatlakları	91
Şekil 3.76. K-5 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği.....	92
Şekil 3.77. K-5 numunesi moment-eğrilik grafiği	92
Şekil 3.78. K-5 numunesi rijitlik grafiği	93
Şekil 3.79. K-5 numunesi eğim açısı grafiği.....	93
Şekil 3.80. K-5 numunesi deplasman eğrileri	93
Şekil 3.81. K-6 numunesinin deney öncesi görünümü	94
Şekil 3.82. K-6 numunesinin deney sonrası görünümü	95
Şekil 3.83. K-6 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları	95
Şekil 3.84. K-6 numunesinin hasar dağılımı	95
Şekil 3.85. K-6 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....	96
Şekil 3.86. Mesnet bölgesi ezilme ve çatlakların görünümü	96
Şekil 3.87. K-6 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği.....	97
Şekil 3.88. K-6 numunesi moment-eğrilik grafiği	97
Şekil 3.89. K-6 numunesi rijitlik grafiği	98
Şekil 3.90. K-6 numunesi eğim açısı grafiği.....	98

Şekil 3.91. K-6 numunesi deplasman eğrileri	98
Şekil 3.92. R1-R2 numunelerinin yük-orta nokta deplasman eğrileri	99
Şekil 3.93. K1-K2 numunelerinin yük-orta nokta deplasman eğrileri	100
Şekil 3.94. K3-K4 numunelerinin yük-orta nokta deplasman eğrileri	100
Şekil 3.95. K5-K6 numunelerinin yük-orta nokta deplasman eğrileri	100
Şekil 3.96. Tüm numunelerin yük-orta nokta deplasman eğrileri.....	101
Şekil 3.97. R1-R2 numunelerinin moment-eğrilik grafikleri.....	103
Şekil 3.98. K1-K2 numunelerinin moment-eğrilik grafikleri	104
Şekil 3.99. K3-K4 numunelerinin moment-eğrilik grafikleri	104
Şekil 3.100. K5-K6 numunelerinin moment-eğrilik grafikleri	104
Şekil 3.101. Tüm numunelerin moment-eğrilik grafikleri	105
Şekil 3.102. Tüm numunelerin rijitlik grafikleri.....	107
Şekil 3.103. Tüm numunelerin eğim açısı grafikleri.....	108
Şekil 3.104. Numunelerin akma yük değerinde deplasman eğrileri	109
Şekil 3.105. Numunelerin maksimum yük değerinde deplasman eğrileri	109
Şekil 3.106. Numunelerin göçme yük değerinde deplasman eğrileri	110
Şekil 3.107. Numunelerin enerji tüketme miktarları.....	111
Şekil 3.108. Numunelerin kırılma anları.....	113
Şekil 4.1. ABAQUS ara yüzü	116
Şekil 4.2. Numunelerin model görünüşleri.....	117
Şekil 4.3. Nümerik model donatı görünümü.....	117
Şekil 4.4. Betonun basınç davranışı (Hibbitt ve ark., 2013)	119
Şekil 4.5. Betonun çekme davranışı (Hibbitt ve ark., 2013).....	120
Şekil 4.6. Betonun çekme rijitliği modelleri (Earji ve ark., 2017).....	122
Şekil 4.7. Numunelerin beton basınç davranış grafikleri.....	122
Şekil 4.8. Numunelerin basınç etkisindeki hasar parametresi grafikleri.....	122
Şekil 4.9. Numunelerin basınç etkisindeki hasar parametresi grafikleri.....	123
Şekil 4.10. Donatı-beton etkileşimi.....	124
Şekil 4.11. Kiriş numunelerinin sonlu eleman modelleri.....	125
Şekil 4.12. Ankastre mesnetli kiriş numunelerinin sonlu eleman modelleri	126
Şekil 4.13. Kiriş numunelerinin mesh görünüşleri	127
Şekil 4.14. Referans numunesinin sonlu eleman deplasman davranışı.....	128
Şekil 4.15. Referans numunesinin sonlu eleman yük-deplasman grafiği	129

Şekil 4.16. Referans numunesinin donatılarının gerilme davranışı	129
Şekil 4.17. Referans numunesinin basınç etkisi altında hasar dağılımı	130
Şekil 4.18. Referans numunesinin çekme etkisi altında hasar dağılımı	130
Şekil 4.19. Referans numunesinin PEEQT davranışı	130
Şekil 4.20. %20 boşluklu numunenin sonlu eleman deplasman davranışı	131
Şekil 4.21. %20 boşluklu numunenin sonlu eleman yük-deplasman grafiği	131
Şekil 4.22. %20 boşluklu numunenin donatılarının gerilme davranışı	132
Şekil 4.23. %20 boşluklu numunenin basınç etkisi altında hasar dağılımı	132
Şekil 4.24. %20 boşluklu numunenin çekme etkisi altında hasar dağılımı	132
Şekil 4.25. %20 boşluklu numunenin PEEQT davranışı	133
Şekil 4.26. %40 boşluklu numunenin sonlu eleman deplasman davranışı	133
Şekil 4.27. %40 boşluklu numunenin sonlu eleman yük-deplasman grafiği	133
Şekil 4.28. %40 boşluklu numunenin donatılarının gerilme davranışı	134
Şekil 4.29. %60 boşluklu numunenin basınç etkisi altında hasar dağılımı	134
Şekil 4.30. %40 boşluklu numunenin çekme etkisi altında hasar dağılımı	135
Şekil 4.31. %40 boşluklu numunenin PEEQT davranışı	135
Şekil 4.32. %60 boşluklu numunenin sonlu eleman deplasman davranışı	135
Şekil 4.33. %60 boşluklu numunenin sonlu eleman yük-deplasman grafiği	136
Şekil 4.34. %60 boşluklu numunenin donatılarının gerilme davranışı	136
Şekil 4.35. %60 boşluklu numunenin basınç etkisi altında hasar dağılımı	136
Şekil 4.36. %60 boşluklu numunenin çekme etkisi altında hasar dağılımı	137
Şekil 4.37. %60 boşluklu numunenin PEEQT davranışı	137
Şekil 4.38. Tüm numunelere ait nümerik yük-deplasman grafikleri	138
Şekil 5.1. Referans numunelerinin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri	139
Şekil 5.2. %20 boşluklu numunelerin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri	140
Şekil 5.3. %40 boşluklu numunelerin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri	141
Şekil 5.4. %60 boşluklu numunelerin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri	142

GİRİŞ

Ülkemizin büyük bir bölümü deprem tehlikesi altındadır. Yaşanan son depremler ile birlikte mevcut yapıların deprem etkisi altında davranışının zayıflığı yapıların güvenilirliğini sorgulayıcı bir hale getirmiştir. Deprem tehlikesi altında yapıların depreme karşı performansları büyük önem arz etmektedir. Ülkemizdeki yapıların çok büyük bir çoğunluğu betonarme yapılardan oluşmaktadır. Bu nedenle betonarme yapıların taşıyıcı sisteminin yönetmelik kurallarına göre oluşturulmasının çok ciddi bir öneme sahip olduğu net bir şekilde görülmektedir.

Yapıların gerek üretim esnasında gerekse üretim sonrasında yapısal davranışını ve servis ömrünü sürdürmesi açısından dış etkilere korunması gerekmektedir. Üretim sonrasında yapı elemanlarına herhangi bir analiz yapılmadan müdahale edilmesi yapı sağlığı genelinde tehlike oluşturmaktadır. Geçmişten günümüze insanların binalardan bekledikleri talebin artması üzerine mevcut ve modern binalarda insanların taleplerini karşılamaya yönelik birçok inovasyon geliştirilmiştir. Teknolojinin hızla ilerlemesi de bu inovatif fikirlerin uygulanmasına olanak sağlamıştır. Yapı iskeletinin oluşturulmasından sonra ihtiyaçlar doğrultusunda gerek mevcut alanı azaltmamak gerekse estetik dokuyu korumak amacı ile yapının taşıyıcı elemanlarına işlem uygulanarak bu gereksinimler giderilmiştir. Elektrik tesisatının döşenmesi, internet kabloları, hatlar, tesisat işlemleri, havalandırma sistemleri, kalorifer sistemleri, yangın söndürme sistemleri gibi birçok ihtiyaç için yapı elemanları üzerinden borular, kablolar ve kanalların geçmesi gerekmektedir. Bu faaliyetlerin gerçekleştirilmesi ve mali açıdan da daha uygun olması sebebiyle, yapının taşıyıcı elemanları üzerinde gerekli alan açılarak hedeflenen işlemler uygulanmaktadır.

Yapının taşıyıcı elemanlarında yapısal davranış baz alındığında, daha az kritik önem teşkil etmesi nedeniyle üzerinde işlem uygulanan yapı elemanları döşemeler ve kirişlerdir. Kirişsiz plak döşemelerde bu işlemlerin yapıyor olması zımbalama riskini

artırmaktadır. Bu sebeple plak kalınlığının fazla olması gerekçesi, kesitin artırılmasına sebebiyet vereceğinden mali açıdan zarar oluşturmaktadır. Mali açıdan daha uygun olması nedeni ile en çok uygulanan yöntem kiriş gövdesinde boşluk oluşturulmasıdır. Çeşitli geometrilerde boşluk açılarak malzemeler bu boşluklardan geçirilmektedir. Herhangi bir tasarım, planlama, statik hesaplama yapılmadan kirişler üzerinde oluşturulan boşluklar, kirişin performansı üzerinde ciddi tehlikeler oluşturmaktadır. Bu konuyla alakalı literatürde birçok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde genelde mesnetlenme koşulu olarak basit mesnetin tercih edildiği görülmektedir. Ayrıca tam ölçeklendirme yapılmadan deney numunelerinin belirli ölçeklendirme ile küçültülerek imal edildiği saptanmıştır. Bu çalışmada farklı olan, yapı davranışını daha yakın temsil etmesi açısından birinci olarak ucu ankastre mesnet olacak şekilde deney düzeneği hazırlanmıştır. Çünkü statik sistemlerde düğüm noktaları genellikle ankastre olarak teşkil edilmektedir. Çalışmada ikinci olarakta deney numunelerinin tamamı, tam ölçekli olacak şekilde gerçek davranışı temsil etmesi için imal edilmiştir. Betonarme deney kirişleri, yerinde dökme betonarme imalat ile 4 metre uzunluğa sahip 250 mm genişliğinde, 600 mm yüksekliğinde olacak şekilde 8 adet üretilmiştir. Araştırma sonuçlarının ortaya etkin olarak konulması için 2 adet referans numunede üretilmiştir. Kiriş yüksekliğinin %20, %40, %60 oranlarında her numune tipi için ikişer adet numune üretilmiştir. Boşluklar kiriş ortasında merkezleri arasında 50 cm mesafe olacak şekilde simetrik olarak konumlandırılmıştır.

Deneysel çalışmanın yanında numuneler nümerik olarak ta ABAQUS programında analiz edilmişlerdir. Çalışma sonunda deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmış, değerlendirmeler ve önerilerde bulunulmuştur.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgi

Betonarme yapılardan deprem etkisi altında iyi sismik performans elde edilmesi can güvenliği açısından önem teşkil etmektedir. Bu nedenle yapının taşıyıcı elemanlarının üretimi esnasında ve üretim sonrasında yapısal performansına zarar verici unsurlardan kaçınılması gerekmektedir. Üretim sonrasında yapının taşıyıcı elemanlarında özellikle kirişlerde elektrik, su, havalandırma, kalorifer ve diğer tesisat borularının geçişini sağlamak amacıyla gövdesinde, hesaplamalarda ve analizlerde dikkate alınmamış boşluklar oluşturulmaktadır. Herhangi bir analiz yapılmadan yapılan bu işlemin, kirişlerin kapasitesinde ve servis ömründe azalmaya neden olacağı belirgin bir durumdur. Belirtilen nedenlerden dolayı açılan bu boşluklarla alakalı literatürde fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki mevcut çalışmalara ek olarak, kirişin yapı davranışını daha yakın ve daha doğru temsil etmesi açısından mesnet noktalarının ankastre olarak oluşturulması hedeflenmiştir. Mevcut yapısal formda kolon-kiriş birleşim noktasında, kirişin ankastre davranış gösterdiği dikkate alınarak deney düzeneğinde de bu davranışı sağlaması amacı ile mesnet noktalarının hareketini ve dönmesine engel olacak şekilde çelik ankastre mesnetler kullanılmıştır. Boşluklar, moment değerlerinin mesnet noktalarına göre daha düşük değerlerde olduğu açıklık ortasında oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında $4 \times 2 = 8$ adet numune üretilmiştir. Numuneler referans ve kiriş yüksekliğinin %20, %40, %60 oranında boşluk çapına sahip numunelerdir. Deneysel olarak test edilip sonrasında elde edilen veriler ABAQUS programında elde edilen nümerik analiz sonuçları ile kıyaslanacaktır. Değerlendirme ve sonuçlar doğrultusunda boşluk konumu ve geometrisine yönelik çıkarım ve öneriler sunulacaktır.

1.2. Araştırmanın Amacı

Betonarme yapı elemanlarında özellikle de kiriş elemanlarında gerek ihtiyaç doğrultusunda gerekse estetik kaygı güdülerek çeşitli nedenlerden dolayı boşluk bırakılarak, döşeme altından asma tavan ve benzeri uygulamalarla kapatılmaktadır. Bu uygulamalar genellikle binanın iskelet yapısı oluştuktan sonra yapılması ve herhangi bir analiz gerçekleştirmeden uygulanması nedeniyle kiriş performansında tehlike arz etmektedir. Kirişler betonarme yapılarda döşemeden gelen yükleri kolonlara aktaran yapı elemanları olduğu için, kirişlerde bırakılan boşluklar kiriş davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürdeki mevcut çalışmalarda kirişler genellikle ölçeklendirilmiş olarak ve küçük ölçekte tasarlanmıştır. Kirişler deney düzeneğinde basit mesnetli olarak deneye tabi tutulduğundan bu gerçek kiriş davranışını tam olarak yansıtamamıştır. Ayrıca bu çalışmalarda bırakılan boşluklar çoğunlukla mesnet bölgesine yakın konumda kesme bölgesinde konumlandırılmıştır. Mevcut çalışmalarda kullanılan mesnetlenme koşulunun da basit mesnet olduğu görülmektedir. Bu çalışmada deney düzeneği kirişlerin gerçek davranışını temsil etmesi açısından ankastre mesnetli olarak tasarlanmıştır. Ankastre mesnetli kirişlerde açıklık ortasında moment değeri mesnet noktalarına oranla azalacağı için boşlukların eğilme bölgesinde planlanması büyük öneme sahiptir. Boşluklar dairesel ve simetrik olacak şekilde oluşturulmuştur. Eğilme bölgesinde tasarlanan boşluklar kiriş yüksekliğinin %20, %40, %60 oranında hesaplanarak planlanmıştır. Boşluk çapının değişiminin kirişin performansı üzerindeki etkilerinin ne olacağı analiz edilerek betonarme davranış prensibine katkı sunulacaktır. Laboratuvar ortamında yapılacak yükleme deneyi ile birlikte elde edilecek deneysel sonuçlar, ABAQUS programında analiz edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Verilerin mukayesesinde değerlerin örtüşmesi hedeflenmektedir. Ayrıca sonuçlar mukayese edilerek boşlukların konumu, geometrisi üzerine öneriler ve değerlendirmeler sunulacaktır.

1.3. Araştırmanın Özgün Değeri

Bu çalışmada Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 ve TS 500-2000 şartlarına uygun olarak tasarlanmış kirişler, çift noktalı olarak monotonik yükleme altında test edilecektir. Literatürdeki mevcut çalışmalarda boşluklu kirişlere ait yayınlara bakıldığında, genel olarak yapılan çalışmaların deney düzenekleri incelendiğinde

mesnetlenme koşulu olarak bir ucu basit mesnet diğer ucu kayıcı mesnet olarak tasarlanmış ve deney düzenekleri bu tasarıma göre kurulmuştur. Bu tasarım mesnet noktalarının dönme hareketini ve düşeydeki hareketi kısıtlamadığından ötürü mevcut yapılardaki gerçek kiriş davranışını tam olarak temsil edememektedir. Bu çalışmadaki deney düzeneği ise mevcut çalışmalara kıyasla, kirişlerin iki ucu da ankastre mesnet olarak tasarlanıp hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde bu kurulumun yapılabilmesi için kirişin mesnet noktalarının dönmesinin ve hareketinin engellenebilmesi için ankastre çelik mesnetler kullanılacaktır. Kirişler bu çelik mesnetlerin içinde sabitlenip mesnet noktalarının dönmesi engellenecek şekilde konumlandırılacaklardır. Şekil 1.1' de ankastre mesnetli kiriş düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Çelik ankastre mesnetli kiriş düzeneği

Mevcut çalışmalarda boşlukların konumu mesnet bölgelerine yakın kesme bölgesi olarak nitelendirilen kiriş yüksekliğinin iki katı yani $2h$ mesafesinde tasarlanmıştır. Bu çalışmada boşlukların konumu kiriş yüksekliğinin %20, %40, %60 oranında moment değerlerinin ankastre mesnetli kirişlerde mesnet noktalarına göre daha düşük değerlerde olduğu açıklık ortası yani eğilme bölgelerinde planlanmıştır. Ayrıca gerçek yapıdaki kiriş davranışını yüksek oranda temsil etmesi açısından kiriş numuneleri 1/1 ölçek oranında herhangi bir küçülme yapılmadan üretilecektir. Yapılacak bu çalışma ve mevcut çalışmalar doğrultusunda, kirişlerde oluşturulacak boşlukların kirişin hangi bölgesinde hangi mesafede hangi geometrik özelliklerde oluşturulmasının kiriş performansına daha olumlu sonuçlar doğuracağı belirtilecektir.

1.4. Araştırmanın Etkisi ve Katkısı

Betonarme yapılarda genel olarak, Elektrik Tesisatları, Telefon, internet ve bilgisayar ağları, Su, buat, havalandırma, kalorifer, yangın söndürme gibi diğer tesisat uygulamaları ve Estetik kazançlar gibi nedenlerden ötürü betonarme yapılardaki kirişlerde ihtiyaç doğrultusunda bırakılan boşluklar kiriş elemanlarının performansına önemli ölçüde olumsuz etki oluşturmaktadır. Herhangi bir performans analizi yapılmadan ve projeye aykırı olarak üretim safhasında oluşturulan bu boşluklar kirişlerin döşemelerden gelen yükü kolonlara güvenli şekilde aktarmasında ve performansını ve kapasitesini tam anlamıyla gerçekleştirmesinde tehlike oluşturmaktadır. Ayrıca kirişlerin üretimi sonrasında kirişlerin herhangi bir noktasında açılan bu boşluklar gerekli analizler yapılmadan sonradan bırakılmaktadır. Mevcut çalışmalarda çoğunlukla boşlukların mesnet bölgesine yakın olarak kesme bölgesinde oluşturuldukları saptanmıştır. Bu yapılacak çalışmada kiriş elemanlarının boşluksuz ve eğilme bölgesinde yani açıklık ortasında oluşturulacak boşluklu durumları deneylerle incelenecek ve nümerik analizle de desteklenerek bu boşlukların kiriş davranışı üzerine etkisi ortaya konulmuş olacaktır. Ayrıca eğilme bölgesinde oluşturulacak boşluklu çalışmalar ile mevcut çalışmalardaki kesme bölgesindeki oluşturulan boşluklu çalışmalar karşılaştırılarak nümerik analizle de doğrulanarak, boşluğun kirişin hangi bölgesinde ve hangi mesafesinde konumlandırılmasının daha doğru ve daha olumlu sonuçlar üreteceği araştırılacaktır. Bu bağlamda olası bir şantiyede ya da herhangi bir inşaat sahasında yukarıda belirtilen ya da farklı herhangi bir nedenden ötürü zorunlu olarak oluşturulması gereken kiriş boşluklarının nerede konumlandırılacağına dair bu çalışma sonuçları doğrultusunda yön verilecektir. Ayrıca oluşturulan boşlukların kiriş performansı üzerine etkisinin ne kapsamda olacağı, kapasitesini ne oranda düşüreceği artan boşluk yüzdesinin bu kapasiteye etkisinin ne denli olacağı, bu etkilerin nasıl giderileceği, ne gibi önlemler alınması gerektiği çalışma sonunda detaylı olarak belirtilecektir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda boşlukların proje kriterlerine uygun bir şekilde ve nerelerde konumlandırılmasının kirişin performansına ve davranışına daha olumlu etki oluşturacağı belirlenecektir. Yapılan deney sonuçları, nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak deney sonuçları ile nümerik sonuçların örtüşme durumu saptanacaktır.

1.5. Literatürde Mevcut Çalışmalar

Literatürde boşluklu betonarme kiriş üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur. Literatürdeki çalışmalar tarandığında çalışmaların genelinde mesnetlenme koşulunun basit mesnet olarak uygulandığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda da kiriş imalatının küçük ölçeklerde yapıldığı saptanmıştır. Çalışmalarda kirişlerde bırakılan boşluğun 2h sıklaştırma bölgesi, kesme bölgesinde konumlandırıldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada ankastre mesnet koşulunun uygulanmasına, tam ölçeğin uygulanmasına ve boşlukların eğilme bölgesinde konumlandırılmasına dikkat edilmiştir. Literatürde tez içeriği ile ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Demiral T. vd. (2018), yaptıkları tez çalışması kapsamında, betonarme kirişlerin sıklaştırma bölgesi olarak bilinen kiriş yüksekliğinin iki katı mesafesinde ve tarafsız eksende kiriş yüksekliğinin %20, %40 ve %60 oranında boşluklara sahip kirişlerin simetrik tekil yükleme altındaki davranışı deneysel olarak araştırmıştır. Deneylerde, 2h bölgesinde %20, %40 ve %60 oranında boşluk bulunan 2' şer adet kiriş ile karşılaştırma amacıyla boşluksuz olarak üretilen 2 adet referans kiriş deneye tabi tutulmuştur. Deney değişkeni olarak, 'boşluk oranı' seçilmiştir. Deney esnasında kiriş-kolon birleşim noktalarının ankastre mesnet özelliğinde olmasına dikkat edilmiş ve bunda da yüksek oranda başarı elde edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonunda, referans kirişler ve %20 boşluk oranına sahip kirişlerin yeterli dayanım ve süneklilik gösterebildiği görülmüştür. Dayanım ve süneklilik bakımından diğer boşluk oranlarına sahip kirişlerin istenilen seviyede olmadığına deneyler sonucunda ulaşılmıştır [1].

Quaderi A. (2020), betonarme kiriş gövdesinde bırakılan boşluk adedinin ve yatay doğrultudaki konum değişiminin kiriş davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu amaçla 9 adet betonarme kiriş numunesi üretmiştir. Bu üretilen kirişlerden bir adedi boşluksuz olarak üretilmiş referans numunedir. Diğer bütün numuneler dairesel boşluk bırakılarak üretilmiştir. Boşluklu numunelerde boşluk adedi ve konumu değiştirilmiş ve ilgili parametrelerin davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar genel olarak yorumlandığında, boşluk sayısının artması ile ve boşluğun konumu mesnete doğru yaklaştıkça numunenin yük taşıma kapasitesi ve deplasman kapasitesi önemli derecelerde azalmaktadır [2].

Jasim W. A. vd. (2019), bu makalede, boşlukların boyut ve konumunun yük taşıma kapasitesi ve betonarme derin kirişlerin performansı üzerindeki etkisini incelemek için deneysel ve nümerik bir çalışma sunmuştur. Kesme bölgelerinde oluşturulan iki büyük boşluğa sahip, beş adet tam ölçekli, basit mesnetli olarak desteklenen betonarme derin kirişleri kırılma yüküne kadar test etmişlerdir. Kesme açıklığının toplam derinliğe oranı (1.1) olarak belirlenmiştir. Kare boşlukları, kesme açıklığının orta noktasında veya iç bölgelerinde orta açıklık kısmına göre simetrik olarak yerleştirmişlerdir. Bu testin sonucunda ilk diyagonal çatlak yükü (% 8-9) oranlarında değişirken ilk eğilme çatlak yükü de (% 17-23) seviyelerinde artmış ve kırılma yükünün de (% 3-11) oranlarında değiştiği saptanmıştır [3].

Smarzewski P. (2018), çalışmasında, güçlendirilmiş boşluklu yüksek performanslı beton (HPC) kirişlerin performansının artırılması için güçlendirici bir çözüm metodu olarak hibrid çelik-polipropilen kullanımının test edilmesine yönelik araştırmalarının sonuçlarını sunmuştur. Toplam altı adet basit mesnetli kirişi dört noktalı eğilme altında test etmiştir. Kesme bölgesinde iki kare boşluğu üç tane kirişte orta noktaya göre simetrik olarak yerleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında, mevcut çalışmadan elde ettiği sonuçlar şu şekildedir. Hibrit lif içeriği % 1'in üstünde olan boşluksuz kirişler ve % 1.6'nın üstünde lif ilavesi olan boşluklu kirişler, en yüksek verimi ve maksimum değerleri göstermiştir. Hibrit lif içeriğindeki artış kirişin ilk çatlama yükünü, nihai yük kapasitesini, tokluğunu, sünekliliğini arttırmıştır. Standart betonarme kirişlerine göre ortalama çatlaklar arası mesafe, çatlak genişliği ve yükte bir azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir. En büyük etkiyi ise, elyaflar kullanılarak üretilen kirişlerde görmüşlerdir. Sırasıyla en az % 1 ve % 1.6 oranlarında gözlemlemiştir. Düşük lif oranına sahip kirişler için ise, nihai yükte bir azalma ve ani olarak kesme kırılması moduna dönüşüm gözlemlemiştir. Hibrit elyaflı kirişler için minimum/ortalama çatlak aralığı ve maksimum/ortalama çatlak aralığı oranları benzerdir. Boşluklar çatlak aralığı, tokluk ve süneklilik faktörünün azalması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [4].

Senthil K. vd. (2018), çalışmasında sayısal araştırmalarını, sonlu elemana dayalı sayısal modellerin doğruluğunu göstermek amacıyla, statik monotonik yüklemeye maruz bırakılan derin kirişler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonları ve modellemeleri ABAQUS / CAE sonlu eleman programı ile analiz ederek bu şekilde elde ettikleri sonuçları literatürde mevcut deneylerle doğrulamışlardır. Basit mesnetli olarak altı

kirişte, kirişin merkezinde, üstünde ve altında 200 ve 250 mm uzunluklarda oluşan iki dikdörtgen boşlukla modellemişlerdir. İlaveten, on yedi kirişi, boşluk konumu, boşluğun boyutu, şekli ve yüksekliği, boşluk ve kesme açıklığının derinlik oranına etkisini incelemek amacıyla statik yükleme altında ABAQUS programında simüle etmişlerdir. Genel olarak, sayısal sonuçları, deformasyon ve yer değiştirme modülünü doğru bir şekilde tahmin etmişler ve yaptıkları deneylerle iyi bir yakınlık sağlamışlardır. Boşluk boyutunda 200 ila 250 mm boyutunda bir artışın, ortalama kayma mukavemetinde % 35 oranında bir azalmaya neden olduğunu saptamışlardır. Dairesel boşluklara sahip derin kirişler daha az sapma gösterdikleri için kare boşluklara göre daha çok tercih edildiğini yorumlamışlardır. Bu gözlemlerinden, dairel boşlukların derin kirişler üzerinde kare boşluklardan daha olumlu sonuçlar oluşturacağı kanısına varmışlardır [5].

Shather L. M. vd. (2018), incelemesinde, çelik levhalarla güçlendirilmiş boşlukları olan betonarme (RC) derin kirişlerin kullanılma potansiyelini analiz etmişlerdir. On üç kare boşluklu derin kirişleri iki noktalı yükleme altında test etmişlerdir. Denedikleri her kiriş 100 mm x 400 mm kesit alanına ve toplam 1000 mm uzunluğa sahipti. Her kesme bölgesinde bir tane olmak üzere iki boşluğu, kiriş ortası etrafında simetrik olarak konumlandırmışlardır. Boşluklu derin kirişte, ilk diagonal çatlaklar deneysel olarak %28, ilk çatlama gerilmesi ise sonlu eleman yazılımında [ABAQUS] %30 seviyelerinde meydana gelmiştir. Güçlendirilmemiş boşlukların yakınlığının, ABAQUS sonucuna kıyasla, numune için orta boşluk sapmasını (%8) oranında azalttığını ortaya koymuşlardır [6].

Hassan H. M. vd. (2019), araştırmalarında yüksek mukavemetli kendiliğinden yerleşen beton ile üretilen betonarme derin kirişlerde boşluğun kiriş davranışı üzerindeki etkisini incelemiş ve analiz etmişlerdir. Boşluk boyutu olarak 75 mm ve 50 mm boşluk boyutu kullanmışlar, şekil olarak kare, dairel ve yeni tip “eşkenar dörtgen” şekli seçerek altmış bir derin kiriş test etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, derin kirişler dar bir genişliğe sahiptir ve sıkışık takviye içerir. Bu nedenden ötürü, kendiliğinden yerleşen betonun derin kirişlerin dökümü için en uygun tip olduğu kanısına varmışlardır. Boşluklu derin kirişlerin nihai ve çatlak yükünün, boşluksuz derin kirişe kıyasla azaltılması % 5 ila 55 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Test edilen tüm boşluklu derin kirişler ile kesmede yetersizlik olmuştur. Boşluk boyutunun büyüklüğünün arttırılmasının, nihai ve çatlak yükünde azalmaya neden olduğunu saptamışlardır. Nihai ve çatlak yük değerleri

ve tüketilen enerji açısından, boşluk tipi eşkenar dörtgen şekli olan, tüm durumlarda genel olarak kare şekilden daha iyi sonuç verdiğini ve bu sonuçların dairesel boşluk şekillerinin sonucuna yakın sonuç verdiğini saptamışlardır. Boşlukların konumu göz önüne alındığında, derin kirişlerin nihai ve çatlak yüklerindeki en büyük azalmanın, simetrik boşluklar durumu, ardından asimetrik boşluk, sonra ortalanmış boşluk için olduğu sonucuna varmışlardır [7].

Smarzewski P. (2018), çalışmasında, hibrit çelik-polipropilen lif takviyeli yüksek performanslı betondan üretilen boşluklu ve boşluksuz derin kirişlerin davranışı ve yük taşıma kapasitesini deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Kirişler üç nokta yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Tüm numuneleri aynı basit mesnetli koşullarda test etmiştir. Araştırmada, betonarme donatı miktarına ve türüne odaklanılmıştır. Yaptığı çalışmada, hibrit liflerin derin kiriş çatlak genişlikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve boşluklu derin kirişlerin yük taşıma kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Deneysel araştırmalar ve teorik analizlerden elde edilen sonuçlar temelinde aşağıdaki sonuçları çıkarmıştır. % 1 ila % 1.5 arasında çelik lif içeriği ve % 0.05 ila % 0.1 arasında polipropilen lif ile güçlendirilmiş boşluklu beton derin kiriş numuneleri % 28 daha büyük bir nihai mukavemete ulaşmıştır. Boşlukların etrafında bulunan hibrit lifler sayesinde derin kirişlerin mukavemetinin önemli ölçüde arttığının sonucuna varmıştır [8].

Osman B. H. vd. (2017), çalışmasında lif takviyesi kullanarak güçlendirilmiş boşluklu betonarme kirişlerin yüzeylerindeki polimerler sayesinde beton yapıların ağır yükleri taşıyacak şekilde tasarlanması için yararlı bir çözüm sunmuştur. İki güçlendirilmemiş kontrol kirişi, güçlendirilmemiş dört kiriş ve ön çatlama olmadan güçlendirilmiş bir kiriş test etmişlerdir. Sonuçlarda, hem önceden var olan hasar seviyesinin hem de FRP oryantasyonunun, etkinlik ve hasar güçlendirme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Sonuçlarında AFRP levhalarla güçlendirilmiş boşlukları olan önceden çatlamış RC derin kirişleri daha yüksek bir rijitlik ve süneklilik seviyesi göstermiştir. Bunun nedeni AFRP güçlendirme şeridinin uygulanmasından önce epoksi reçinesi kullanılarak kesme çatlaklarının gelişimlerinin sınırlandırılması olarak değerlendirmişlerdir. Güçlendirilmiş örneklerin tümünün, eşdeğer güçlendirilmemiş kontrol kirişlerinden daha yüksek kapasiteler sergilediği sonucuna varmışlardır [9].

Saleem Abdul-Razzaq K. vd. (2017), bu çalışmalarında, boşlukları olan betonarme (RC) derin kirişlerin çelik levhalarla güçlendirilmesinin potansiyel kullanımı üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Oluşturulan kare, dairesel, yatay ve dikey dikdörtgen boşluklarla 4 noktalı yükleme altında on üç derin kiriş test etmek için deneyler yapmışlardır. Kare, dairesel, yatay ve dikey dikdörtgen boşlukların oluşturulmasının nihai kapasitesinin referans boşluksuz kiriş ile karşılaştırıldığında azalmasına neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu boşlukların çelik plakalar ile güçlendirilmesinin, RC derin kiriş kesme mukavemetinin yükselmesinde çok etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Boşlukları güçlendirilmiş kirişlerde kazanılan mukavemetin, güçlendirilmemiş boşluklarla kıyasla %10 oranlarında artış olduğunu göstermişlerdir. Güçlendirilmemiş kare boşlukların boyutunun % 25-50 azaltılması nihai yük kapasitesinin % 11-17 oranında artmasına neden olduğunu saptamışlardır. Buna ek olarak, güçlendirme plakası kalınlığının giderek artırılmasının nihai yük kapasitesinin artmasına neden olduğunu göstermişlerdir [10].

Saleh A. vd. (2017), çalışmalarında, boşluk bulunduran bir betonarme kirişin davranışının güçlendirilmiş olarak oluşturulan boşluk ve konumuna bağlı olarak (çatlama şekli, kırılma yükü, rijitlik azalması, çelik takviyeli gerilme, enerji dağılımı, yük-deplasman zarfı, mukavemet ve süneklilik) gibi parametrelerin bir betonarme kiriş-kolon birleşimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Üç büyük ölçekli kiriş-kolon birleşimini çevrimsel yükleme altında test etmişlerdir. Sonuç olarak güçlendirilmiş bir boşluklu kirişin, enerji yayma kapasitesini, kiriş kolon birleşiminin nihai yükünü, yer değiştirmesini ve rijitliğini azalttığını saptamışlardır [11].

Mansur M.A. vd. (1985) çalışmalarında kesme ve eğilme yükleri altında, gövdesinde geniş boşluk bulunduran dikdörtgen en kesite sahip betonarme kiriş numuneleri için bir yöntemi sunmuşlardır. Sundukları yöntem için, boşluğun ve bulunduğu konumunun, boşluğun üst ve alt bölgelerindeki kesme kuvveti miktarında oluşturmuş olduğu etkinin ne boyutta olduğunu hedeflemişlerdir. Bu nedenden ötürü, 12 adet betonarme kirişi monotonik tek noktalı yükleme altında test etmişlerdir. Çalışma kapsamında ana değişken parametreler, boşlukların genişliği, konumu, boşluk etrafındaki donatı dizaynı ve miktarıdır. Deney sonuçlarına baktıklarında, boşluğun kirişlerin yük taşıma kapasitesini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Boşluğun üst ve alt bölgelerinin Vierendeel panel gibi davrandığını ve bu bölgelerde birçok çatlağın oluştuğunu

gözlemlemişlerdir. Boşluklu kirişlerde boşluk konumunun çevresinde bulunan kesitler yeterince donatılarla güçlendirilirse, kirişlerin boşlukları etrafında mafsallar oluşturarak göçebilecek seviyeye ulaşabileceklerini belirtmişlerdir [12].

Sayed A. M. (2019), çalışmasında, bir betonarme kirişin kesme bölgesindeki boşluk bulundurması ve bulundurduğu dairesel boşlukların, kesme performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. ANSYS sonlu elemanlar programı kullanarak 41 kiriş analiz etmiştir. Yeni tasarlanan FE modelinin kirişin yük kapasitesini hesaplamak ve kırılma modlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Dikey boşluk çapının kiriş bölümünün genişliği üzerindeki etkisinin daha büyük olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, boşluk çapının etkisinin, boşluk sayısının etkisinden daha büyük olduğu sonucuna varmıştır. Parametrik çalışmaları, boşluk konumunun, yükün, boşluk sayılarının ve boyutlarının kirişteki etkilerini araştırmak için yapmıştır. Boşluk çapının etkisinin, boşluk sayısının etkisinden daha büyük olduğu sonucuna varmıştır [13].

Ashour A. F. vd. (2000) gövdesinde iki boşluğa sahip 16 adet betonarme kirişi test etmişlerdir. Kiriş numunelerinin tamamı aynı en ve boy kesite sahip aynı basınç ve çekme donatısına sahiptirler. Deney değişkenleri ise, boşluk boyutu, boşluğun konumu ve boşluk bölgesindeki donatı düzenidir. Deney sonuçlarında, boşluk bölgesindeki donatı miktarı ve düzeni dikkate alınmadığında, sadece boşluğun konumuna bağlı olarak göçme tipi iki türde oluşmuştur. Gövde boşluğu çevresine yerleştirilen boyuna donatılar enine donatılara oranla kirişin kesme kapasitesini yükseltmede daha etkili sonuçlar doğurduğunu, mesnet reaksiyonlarının boşluğun boyutuna ve konumuna bağlı olarak değişim gösterdiğinin, kesme bölgesinde oluşturulan küçük gövde boşluğuna sahip sürekli derin kirişlerin, referans kirişlere daha yakın davranış gösterdiğini ve sürekli derin kirişler için önceden belirtilen denklemler ile uyumlu sonuçlar gösterdiğini gözlemlemişlerdir [14].

Salama, A. E. vd. (2018), çalışmalarında burulma etkisi altında dikdörtgen boşlukların T-şekilli betonarme kirişlerin davranışına etkisi üzerine deneysel bir araştırma yaparak sonuçlarını sunmuşlardır. Boşluğun çatlama momenti, nihai moment, çatlaktaki dönme açısı, nihai dönme açısı ve hasar modları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Test sonuçlarının analizi ile bu tür kirişler için bir dizi öneri sağlayarak birkaç temel hususu

vurgulamışlardır. Deneysel sonuçlar ile geometrik parametrelerin kiriş üzerinde derin bir etkisi olduğunu göstermişlerdir. Yumuşatılmış kafes modelini, burulma etkisi altında büyük boşluğu olan T-şekilli betonarme kirişlerinde burulma için artarda kullanmışlardır. Analitik moment rotasyon eğrilerini deneysel olanlarla karşılaştırmışlardır [15].

Mansur M.A. vd. (1991), gövdesinde geniş boşluk bulunduran 8 adet betonarme kiriş numuneleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Kiriş numuneleri aynı miktarda boyuna donatıya sahip olup her bir numune de aynı dikdörtgen en kesite sahiptir. Bu çalışma kapsamında değişken parametreler, boşluğun konumu, boşluk sayısı ve boşluğun kirişteki konumudur. Deney sonuçlarında ise, sürekli kirişin belirgin olarak dört farklı ana safhadan oluştuğunu göstermişlerdir. Deneylerde boşluk genişliği ve uzunluğundaki artışın kirişin mukavemetini ve rijitliğini düşürdüğünü saptamışlardır. Boşluk uçlarının plastik mafsalları oluşumu için en uygun yerler olduğu, boşluğun büyüklüğünün kirişin daha erken çatlak oluşumuna ve daha büyük deformasyonlara sebebiyet verdiğini gözlemlemişlerdir. İlaveten, gövdede oluşturulan boşluğun çatlama yüküne etkisinin çok az olduğu tespitine varmışlardır. Boşluk, moment değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde ise kirişin daha fazla deplasman yaptığı ve daha küçük yük değerinde göçtüğünü belirtmişlerdir [16].

El-kareim Shoeib A. vd. (2017), çalışmalarında on beş dikdörtgen kesitli kiriş test etmişlerdir. Sonuçlarla bir boşluğun olması nedeniyle performansta bir azalma olduğunu göstermişlerdir. Boşluk yükleme altına yerleştirildiğinde sistemin kapasitesi daha da azalır. Bu çalışmada test edilen betonarme kirişlerin deneysel sonuçlarının analizine dayanarak şu sonuçlar çıkarılmıştır. Mevcut bina için, betonarme kirişlerde oluşturulan boşlukların kesme kuvvetinde bir azalmaya neden olduğunu saptamışlardır. Bu nedenden ötürü, bir betonarme kirişte oluşturulan bir boşluk, kritik bölümden geçen boşluktaki makaslama nedeniyle ani hasara neden olacağı sonucuna varmışlardır.

Betonarme kirişteki boşluklar kapasitede azalmaya neden olmuş ve boşluk açma tekniğine bağlı olarak, servis yükleri altındaki boşluklar için sistemde daha fazla değişiklik meydana getirdiği tespitinde bulunmuşlardır. Çelik takviyesinin etkisini ve betonarme kirişlerdeki boşluğun etrafındaki dış ek takviyeyi anlamak amacıyla daha fazla çalışma gerektiği sonucuna varmışlardır [17].

Tan K.H. vd. (2001), yapmış oldukları çalışmada, dairesel boşluk bulunduran betonarme kirişlerin kesmeye bağlı tasarımı ile ilgili olarak ACI yönetmeliğinde belirtilen yaklaşımın yeterliliğini incelemiş ve sorgulamışlardır. T kesitli 7 adet betonarme kirişi üzerinde oluşacak fazla kesme kuvvetini azaltacak şekilde planlanması olan elemanları deneye tabi tutmuşlardır. Deney sonucunda, dairesel boşluklu kirişlerin ACI yönetmeliğine göre tasarımının yapılabileceğini, çapraz konulan donatıların çatlakların belirli bir seviyede kalmasında önemli etki oluşturduğunu ve yerleştirilen çapraz donatıların kesme kuvveti kapasitesini en az %50 oranda taşıyacak seviyede olması gerektiğini, dolu gövdeli kirişlerde ise maksimum kesme kuvvetini sınırlayan ACI yönetmeliğinin, küçük boşluk bulunduran kiriş elemanlarında kullanılabileceğini belirtmişlerdir [18].

Aksoylu C. vd. (2020), bu çalışmalarında, kirişlerin güçlendirilmesi için iki CFRP uygulaması yöntemi kullanmışlardır. Dairesel boşluklar ve 11 ölçekli numunelerden oluşan kapsamlı bir deney programı üstlenmişlerdir. Delik çapı (D)/ kiriş yükseklik oranı (H) olan kirişlerde belli oranlarda, kesme bölgesinde simetrik olarak boşluklar konumlandırmışlar ve düşey yükleme altında test etmişlerdir. 0.30 D/H oranında sadece yük taşıma kapasitesinde azalma görülürken kirişin sünekliliğinde artma tespit etmişlerdir. Boşluk çapları arttıkça yük taşıma kapasitelerinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Yük taşıma kapasitesi ve süneklilik, farklı CFRP konfigürasyonları nedeniyle önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Boşluk çapının ve CFRP güçlendirme yönteminin, güçlendirme için çok önemli parametreler olduğu kanısına varmışlardır. CFRP güçlendirme alternatifi olmayan D/H oranı 0.64 olan kirişlerde başarı sağlamışlardır. Ayrıntılı bir makro ve mikro hasar analizleri sunmuşlardır [19].

Tan K. H. vd. (1996), bir bölgesi negatif moment etkisi altında bir kısmı da pozitif moment etkisi altında bırakılmış olan ve büyük gövde boşluğu bulunduran betonarme kirişlerin davranışlarını incelemek için deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında toplam 15 adet T kesitli sürekli kiriş kullanmışlardır. Çalışmada, M.A. Mansur, L.M. Huang, K.H. Tan ve S.L. Lee tarafından önerilen analitik bir yöntem kullanmışlardır [20].

Mansur M. A. vd.(1992), çalışmalarında, kirişlerde geniş boşlukların çatlama ve göçme kapasitelerinde azalmalara neden olduğu, gövdesinde geniş boşluk bulunan T kesitli

betonarme kirişlerin davranışı ile birden fazla küçük boşluk bulunan T kesitli betonarme kirişlerin dayanım ve servis ömrü bakımından daha iyi performans gösterdiklerini gözlemlemişlerdir. İlaveten, geniş dikdörtgen gövde boşluğu bulunan T kesitli betonarme kirişlerin boşluk kısmında Vierendeel panel gibi davranış gösterdiğini onaylamışlardır [21].

Abdul-Razzaq K. S. vd. (2018), çalışmada, büyük ve küçük dairesel, dikdörtgen ve kare betonarme T şekilli kiriş boşluklarını güçlendirmek için çelik levhaların kullanılmasını önermişlerdir. Boşluklar nedeniyle çıkan betonu telafi etmek amacıyla çelik plakalar kullanmışlardır. Sonuç olarak, dikdörtgen boşluk, nihai kapasitede daha az azalma göstermiştir. Kare açıklık, nihai kapasitede minimum düşüş sağlamıştır. Bu çalışma ile dairesel, dikdörtgen ve kare açıklıklara sahip betonarme T-kirişlerin nihai kapasitesini tahmin etmek için denklemler önermişlerdir. Ek olarak, bu çalışma ile açıklıkların çelik plakalarla güçlendirildiği T-kirişlerinin nihai kapasitesini tahmin etmek için denklemler önermişlerdir [22].

Daniel J. J. vd. (2014), yapmış oldukları çalışma kapsamında, boşluklu betonarme kirişlerin eğilme davranışını irdelemişlerdir. Bu çalışma için, bir adet referans kiriş ve üç adet farklı boşluk boyutuna sahip kirişleri test etmişler ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Deneylerin sonucunda, referans kirişe ve boşluk uzunluğuna bağlı olarak, boşluk uzunluğu arttıkça, kiriş çatlama yüklerinin ve yük taşıma kapasitelerinin düştüğünü, deformasyonların arttığını ve rijitliğin azaldığını gözlemlemişlerdir [23].

Hemzah S.A. vd. (2020), bu çalışmada çeşitli pozisyonlarda yerinde dairesel boşluklar içeren kendiliğinden yerleşen beton kullanılan kirişlerin yapısal davranışlarını deneysel olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Çalıştıkları parametreler, CFRP tarafından güçlendirilen veya güçlendirilmeyen boşluklar ve bu boşlukların sayısı ve pozisyonlarıdır. Sonuçlar, boşlukları olan tüm betonarme örneklerin, yüzeylerindeki azalma nedeniyle kapasitelerinde azalma olduğunu ortaya koymuştur. Bir kirişte çeşitli yerinde dairesel boşlukların oluşturulmasının, kaydedilen hasar durumunun konumuna göre değişkenlik göstereceğini belirtmişlerdir. Kesme ve eğilme bölgesinde konumlandırılan yerinde boşlukların, nihai yük taşıma kapasitesinde azalma oluşturduğunu belirtmişlerdir. Güçlendirilmiş kirişler için güçlendirilmemiş olanlardan

daha düşük sapma oranları saptamışlardır. Süneklik değerlerinin güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş kirişler için marjinal olarak azalma gösterdiğini belirtmişlerdir [24].

Herrera L. vd. (2014), gövdesinde geniş boşluklar bulunan iki adet T kesitli betonarme kirişin deprem yüklemesi altındaki davranışını incelemişlerdir. Deneyin parametreleri olarak boşluk, kiriş uzunluğu ve donatı düzenleme şeklini ele almışlardır. Deneylerin sonucunda, boşluğun alt ve üstündeki bölgelerinde Vierendeel paneli gibi davrandığını ve kesme kuvvetinin bu bölgelerde kesit alanlarıyla orantılı olarak dağıldığını, boşluk kenarlarında ilk çatlakların diyagonal olduğunu ve sonrasında boşluğun alt bölgelerinde belirgin eğilme çatlaklarının oluştuğunu, aşırı miktarda betonda ezilme ve donatıda bükülme olduğunu ve ayrıca akma noktasına ulaşan kirişte önemli ölçüde dönme meydana geldiğini saptamışlardır [25].

Nie X. F. vd. (2018), çalışmada FRP ile güçlendirilmiş dikdörtgen boşluğa sahip betonarme kirişlerin simülasyonu için ABAQUS kullanılarak geliştirilen üç alternatif FE modelini, kırılğan beton kırma modeline dayanan iki model ve hasarlı betona dayalı bir model olmak üzere sunmuşlardır. Tahminlerini yayınlanan literatürden toplanan test sonuçlarıyla karşılaştırarak en uygun FE yaklaşımını tanımlamışlardır. Bu FE yaklaşımını kullanarak, tipik bir boşluklu zayıflatılmış RC kirişi için FRP güçlendirme sisteminin tasarımı için parametrik çalışmalar yapmışlar ve pratikte kullanım için güvenilir bir FRP güçlendirme sistemi önermişlerdir [26]

Yang K.H. vd. (2006), gövdesinde boşluklar bulunan yüksek dayanıma sahip toplamda 32 adet betonarme kirişlerle ilgili olarak deneysel ve analitik çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada içerisinde boşluk bulunan ve bulunmayan kirişlerin davranışını incelemişlerdir. Deney parametreleri olarak beton dayanımını, kesme açıklığının derinliğe oranını, boşluğun genişliğini ve boşluğun derinliğini ele almışlardır. Deney elemanlarının ölçekleri küçültülmüş ve basit mesnetli olarak 4 noktadan tekil yükleme yapılarak deneye tabi tutmuşlardır. Deneylerin sonucunda, boşluk genişliğinin ve derinliğinin yüklemenin başlangıç aşamasında orta açıklıkta deplasmanı fazla etkilemediğini, ancak çatlakların boyutları ilerledikçe orta nokta deplasmanının etkilendiğini, derin kirişlerde yalın kirişlere göre beton dayanımının nihai durumdaki kesme dayanımına olan etkisini düşürdüğünü, kesme açıklığının

derinliğe oranı arttıkça kiriş rijitliğini de kademeli olarak düşürdüğünü gözlemlemişlerdir [27].

Ahmet A. vd. (2012), bu çalışma ile betonarme (RC) kirişlerin davranışı, analizi ve tasarımı üzerine en son teknolojiye sahip bu çalışmayı enine boşluklar ile derlemeyi amaçlamışlardır. RC kirişlerin Fiber Takviyeli Polimer (FRP) malzeme ve çelik plakalar kullanılarak açıklıklar ile güçlendirilmesi sunulmuştur. Boşluklu RC kirişler üzerinde hiçbir onarım çalışması yapılmadığından, hasarlı RC kirişlerin, dıştan bağlanmış FRP malzemesi veya farklı parametrelili çelik plakalar kullanılarak açılan boşlukların vermiş olduğu zararın onarımı için deneysel bir çalışma yapılmasını önermişlerdir [28].

Nie X. F. vd. (2018), çalışmalarında iyi sismik performans elde etmek için betonarme çerçevelerin tasarımında artık yaygın olarak kabul edilen güçlü kolon-zayıf kiriş anlayışını, yetersiz tasarım kodlarına göre tasarlanmış birçok mevcut betonarme çerçevesinde ihlal edildiğini belirtmişlerdir. Bu teknik ile, kirişin dış kapasitesinde bir azalma için bir T kesitli kirişte (veya benzer bir etkiye sahip alternatif bir özellik) bir boşluğun oluşturulmasını ve kirişin kesme hasarını önlemek için lokal FRP güçlendirme kullanımını içermişlerdir. Sünek bir hasar süreci sağlamak istemişlerdir. Tekniklerinin etkinliğini kanıtlamak ve göstermek için, toplam 8 tam ölçekli RC kirişi kullanmışlardır. Bu çalışmada incelenen boşluklar, kirişin enerji kapasitesinde % 47'ye varan oranlarda azalma ile büyük derecelerde performansın azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Boşluk boyutlarının T-kesitli kirişlerin kapasitesi üzerindeki etkisini açıklığa kavuşturmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır [29].

Mansur M.A. vd. (1999), yaptıkları çalışmada, 9 adet dairesel boşluklara sahip tablalı betonarme kiriş test etmişlerdir. Deney değişkenleri olarak ise, boşluğun yerini ve boyutunu dikkate almışlardır. Deneyler neticesinde, boşluğun mesnet bölgelerine yakın olması halinde çatlakların erken oluştuğunu ve rijitlik değerlerinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Boşluğun boyutunun sınırlandırılıp enine donatının hasar görmemesi halinde, dayanımın ve rijitliğin azalmasının en aza indiğini gözlemlemişlerdir. Grout malzeme ile doldurulması durumunda orjinal davranışa benzer davranış göstermediğini saptamışlardır. 9 kiriş numunesinde bırakılan boşluk çevresine yapıştırılan FRP plakalarla güçlendirilerek boşluğun oluşturduğu dayanım kaybını yeniden kazandırmışlardır [30].

Arabzadeh A. vd. (2019), bu çalışmada, oluşturulan boşluklardan kaynaklanan zayıflığı telafi etmek için CFRP kullanmışlardır. Bu amaçla, her biri simetrik ve asimetrik sırada yerleştirilmiş 200 mm çapında bir veya iki dairesel açıklığa sahip $100 \times 500 \times 1200$ mm boyutlarında 10 derin kiriş üretmişlerdir. Üç noktalı bir monotonik yükleme ile deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak güçlendirme yönteminin üstünlüğünü ve ayrıca güçlendirme levhalarının yük taşıma kapasitesini arttırmadaki etkinliğini göstermiştir. Bu çalışma ile dairesel boşluklu derin kirişlerin güçlendirilmesinde CFRP kompozit tabakanın kullanımını araştırmışlardır. Araştırdıkları parametreler fiberlerin konfigürasyonu (dikey, etrafına sarılmış, eğimli), kullanılan güçlendirme tekniği (EBR ve EBROG) ve boşlukların konumlandırılmasıdır (simetrik ve simetrik olmayan) [31].

Mansur M. A. vd. (1984), eğilme ve burulma etkisinde betonarme kirişin dayanım hesabı için bir metodu önermişlerdir. Analiz skew-bending model üzerine hesap oluşturmuşlardır. Boşluğun bulunduğu çevrede donatılandırma yapılması gereğiyle 3 farklı göçme modu için dayanım denklemi oluşturmuşlardır. Elde edilen bu denklemler ile 10 adet dairesel boşluk bulunduran betonarme kirişlerin deney sonuçları ile karşılaştırmışlar ve uyum yakaladıklarını görmüşlerdir. Deney sonuçlarının karşılaştırması ile kirişin burulma dayanımı ve rijitliğinin boşluk boyutunun artışıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. Küçük değerlerdeki eğilme momentinin kirişin burulma kapasitesini artırdığını saptamışlardır. Boşluğun çevresinde bulunan diyagonal donatılar ile yükleme sırasında çatlakları kontrol altına almışlardır. Bu sebeple gerçek değerler elde edilene kadar diyagonal donatıların fazla konulması gerektiği değerlendirmesinde bulunmuşlardır. Küçük boşlukları bulunan kirişler için kullanılabildiği ve büyük boşlukları bulunan kirişler için uygun olmadığını belirlemişlerdir [32].

Mohammed A.R. vd. (2014), çalışmalarında, boşluklu ve boşluksuz betonarme derin kirişlerin davranışını incelemek için sonlu eleman yöntemi kullanılmışlardır. Ayrıca, donatı dağılımının kiriş toplam kapasitesi üzerindeki etkisini incelenmişlerdir. Analiz için hasarlı plastisite modeli kullanılmıştır. Üç ve dört noktalı yüklemeler altında basit mesnetle desteklenen derin kirişlerin modelleri ve boşlukları olan ve olmayan sürekli derin kirişlerin modellerini analiz etmişlerdir. Bu çalışmaya dayanarak, betonarme derin kirişlerin kesin analizinin karmaşık bir problem olduğu ve boşlukların varlığının performansı azalttığını kabul etmişlerdir. Boşluk derinliğinin, kirişin toplam kapasitesinin belirlenmesinde en önemli parametre olduğu kanısına varmışlardır. Bu

nedenle, kirişin kapasitesinde, boşluk olmadan kiriş kapasitesinin % 10'unu aşmayan genel bir azalma için, boşluğun derinliği, kiriş toplam derinliğinin (0.2d) % 20'sini geçmemelidir değerlendirmesinde bulunmuşlardır [33].

Tan K.H. vd. (1996), yaptıkları çalışmada, geniş boşluk bulunduran kirişte boşluğun konumu ile ilgili olarak genel kriterler kapsayan basit bir tasarım kılavuzu önermişlerdir. Kirişlerdeki boşluğun üst ve alt bölgelerinde donatıyı saracak yeterince beton olması gerektiğini ve boşluk üzerindeki bölgenin kesme donatısını karşılayabilmesi için yeterince derin olması gerektiğini ifade etmişlerdir. İlâveten boşluk boyutunun kiriş yüksekliğinin %50'sinden fazla olmaması gerektiğini, boşluk uzunluğunun alt ve üst bölgelerin dayanımına göre hesaplanıp belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Uzun bir boşluk yerine kısa ve birden fazla boşluk olmasının ve iki boşluk arasındaki mesafenin en az kiriş yüksekliğinin yarısı kadar olması gerektiğini vurgulamışlardır [34].

Aykac B. vd. (2013), çalışmalarında, bir betonarme kirişin uzunluğu boyunca çoklu boşlukların kiriş davranışı üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlayan bir çalışma sunmuşlardır. Toplam dokuz dikdörtgen kirişi test etmişlerdir. Boşluklar etrafındaki diyagonal takviye, moment-normal kuvvet etkileşim diyagramlarına göre beklenen hasar modu olan vierdedeel hareketi nedeniyle bazı numunelerin erken göçmesini etkili bir şekilde önlediğini test etmişlerdir. Boyuna donatılar ve boşluklara bitişik derinlikteki çekme donatıları ve kirişlerdeki kısa donatılar, kiriş tipi ve çerçeve tipi kesme çatlaklarını önlemişlerdir. Plastik mafsallı uzunluğu, tek bir boşluğa sahip kirişlere göre çoklu boşlukların varlığında artmış olduğu tespitinde bulunmuşlardır [35].

Elçi H. (2005), yapmış olduğu çalışmada orta bölgesinde boşluk bulunduran kirişlerle alakalı statik tasarımın gerekliliğini vurgulamıştır. Geniş boşluğa (kiriş yüksekliğinin yarısından daha büyük olan boşluk) sahip kirişlerin öncelikle yüklerden oluşacak kesit tesirlerinin hesaplanmasının gerekliliğini belirtmiştir. Gerilme yığılmalarının boşluk bölgesi etrafında meydana gelmesinden dolayı bu bölgede donatı yerleşiminin yapılmasını ve servis yüklerinden meydana gelecek kesit tesirlerine göre de boyutlandırılma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır [36].

Shaaban I. G. vd. (2020), on üç numuneyi, hafif boşluklu (LWC), orta boşluklu ve derin boşluklu (NWC) kirişler olarak sınıflandırarak kesme davranışını incelemek için

monotonik yük altında deneysel olarak test etmişlerdir. Bu araştırmada, LWC terimi, hafif agrega içeren betonu değil, agreganın kısmen polistiren köpük topları ile değiştirilmesiyle elde edilen betonu ifade etmektedir. Çalıştıkları değişkenler boşlukların boyutları ve yerleri, enine donatı oranı ve kesme açıklığı/derinlik oranı idi. Boşluk derinliğinin kiriş derinliğinin % 20'sinden % 40'ına çıkarılmasının, nihai yükte % 46.4'e kadar bir azalmaya yol açtığını saptamışlardır. Deney kirişlerine karşı sayısal sonuçların doğrulanması için, test kirişlerinin sonlu eleman modellemesini yapmışlar ve her ikisi içinde uyum yakalamışlardır [37].

Dündar B. (2008), düzenli boşluklara sahip betonarme kirişlerin davranışını ve dayanımını araştırmak amacıyla 4 adet kare, 4 adet dairesel ve 2 adet referans kirişi yayılı yük altında deneye tabi tutmuştur. Deney parametreleri olarak, boyuna donatı oranını, boşluk geometrisini, çapraz donatı kullanımını ve boşluklar arasında bulunan bölgede boyuna donatı bulunmasını ele almıştır. Deney sonucunda, kare boşluklu ve dikmelerinde etriye bulunmayan kirişler referans kirişlerle aynı dayanım ve davranış göstermişlerdir. Düzenli boşluklara sahip kirişler eğilme hakim davranış göstermişlerdir. Dairesel boşluklu kirişler kare boşluklu kirişlere göre daha sünek ve daha rijit davranış göstermişlerdir. Çapraz donatıların ileri deplasman aşamalarında gerildiği ve başlıklar arasında yük aktarımını gerçekleştirdiğini gözlemlemiştir. [38].

Herrera L. vd. (2017), T-şekilli, moment dirençli çerçevede (MRF) boşlukları olan kirişlerin döngüsel davranışını araştırmak için büyük ölçekli deneysel bir çalışma yapmışlardır. Numuneleri yarı statik sistemde tersinir yükleme altında yapısal göçme oluşuncaya kadar test etmişlerdir. Tüm kirişlerin döngüsel performansı, hasarın ilerlemesi ve plastik mafsalları gelişimi, mukavemet ve rijitliğin düşmesi ve enerji tüketme kapasitesi açısından değerlendirmişlerdir. Ayrıca, kesme ve eğilme etkisi altında deformasyonlarının genel yer değiştirme talebine katkısını incelemişlerdir. Eksik ve başarılı test sonuçlarının tartışılmasının ve moment aktaran çerçeve kirişlerine açıklık getirilmesinin gerekliliğini vurgulamışlardır [39].

Yılmaz M. C. (2008), yapmış olduğu çalışmada, 3 adet üçgen, 3 adet dairesel ve 3 adet referans kirişin deneyini gerçekleştirmiştir. Deney parametresi olarak, boşluk geometrisini ve boyuna donatı oranını ele almıştır. Deney sonuçlarında, normal ve az donatılı kirişlerin sünek davranış gösterdiğini, maksimum donatı oranı kullanılan

kirişlerde iyi sonuçlar elde edilmediği, dairesel boşluklu kirişlerin üçgen boşluklu kirişlere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemiştir [40].

Hawileh R.A. vd. (2012), çalışmalarında, boşluklar içeren ve karbon takviyeli polimer (CFRP) kompozit levhalar ile makaslamada güçlendirilmiş betonarme (RC) derin kirişler için 3D doğrusal olmayan sonlu eleman (FE) modelleri geliştirmeyi amaçlamışlardır. Boşluklar, doğal yük aktarımını tamamen veya kısmen kesintiye uğratmıştır. FE sonuçları ve literatürde yayınlanan deneysel veriler arasında yaptıkları karşılaştırma ile hesaplanmış modellerin hem güçlendirilmemiş hem de CFRP ile güçlendirilmiş boşluklu derin kirişler için yapısal yanıtı yakalamadaki geçerliliğini göstermiştir. Sayısal ve deneysel yük sapma eğrileri arasında mükemmel korelasyon kaydetmişlerdir. FE analizinin sonuçları ile RC derin kirişlerdeki bir boşluk etrafında CFRP' nin kesme kuvveti yük kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğine dair deneysel bulguları doğrulamışlardır [41].

Acavalos K. W. vd. (1967), dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerde geniş bir boşluk konumlandırmanın, kiriş davranışı üzerinde nasıl etki oluşturacağını incelemek amacıyla deneysel çalışma yapmışlardır. Boşluğun alt ve üst bölgelerinin Vierendeel paneli gibi davrandığını varsaymışlardır. Kesme kuvvetinin boşluğun altı ve üst bölgelerindeki kesit alanlarıyla orantılı olduğunu belirlemişlerdir. Deney sonucunda ise, geniş boşluklu betonarme kirişin Vierendeel panel gibi davrandığını, yeteri kadar donatıya sahip kirişlerde boşluğun etkisiyle herhangi bir kapasite azalması meydana gelmediğini, ancak eğilme rijitliklerinde bir düşüş meydana geldiğini belirtmişlerdir [42].

Almusallam T. vd. (2018), bu çalışma ile eğilme bölgesinde büyük dikdörtgen boşluklar içeren elyaf takviyeli polimer (FRP) ile güçlendirilmiş betonarme (RC) kirişlerin davranışını araştırmayı amaçlamışlardır. İnceledikleri parametreler yükleme tipi, boşluk boyutu ve güçlendirme şemasıydı. İki farklı gruba ayırdıkları yedi RC kirişi test etmişlerdir. Birinci grupta, güçlendirilmemiş iki kirişi (biri boşluksuz ve biri eğilme bölgesinde büyük dikdörtgen boşluğa sahip) dört noktalı eğilme etkisi altında test etmişlerdir. İkinci grupta, beş kirişi merkez nokta yüklemesi altında test etmişlerdir. Eğilme bölgesinde boşluğu olan RC kirişler için, üst başlığın derinliği nihai durumda beton basınç bloğunun derinliğinden fazla veya ona eşitse, nihai kapasite boşluktan

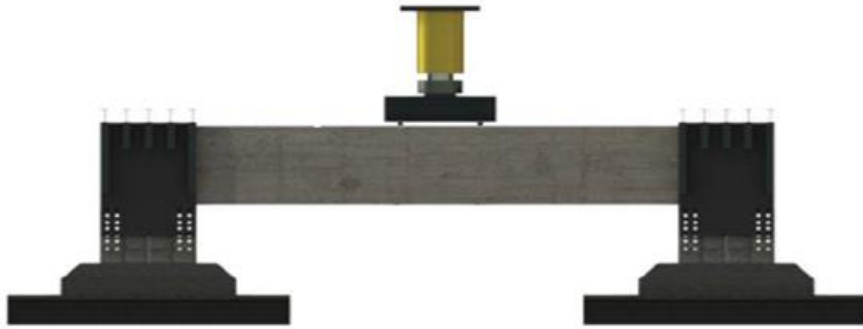
etkilenmez. Bu nedenle, bu gibi durumlar için güçlendirme gerekli değildir tespitinde bulunmuşlardır. Bununla birlikte, üst başlığın derinliğinin beton basınç bloğunun derinliğinden daha az olduğu durumlarda, kiriş direncini geri kazanmak için güçlendirilmesi gerektiği tespitinde bulunmuşlardır [43].



2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Literatürdeki mevcut çalışmalar taranarak kirişlerdeki boşluklar hakkında yapılan çalışmalar belirtilip, bu çalışmalarla yapılacak çalışmamız arasındaki farklılıklar ortaya koyularak mevcut çalışmalarda eksik görülen kısımlar saptanarak sorunlar giderilmeye çalışılacaktır. Öncelikle kiriş numuneleri 1/1 ölçekte imal edilecektir. Boşluklar eğilme bölgelerinde değişen çap yüzdelerine göre konumlandırılacaktır. Boşluksuz olarak referans numuneleri de üretilecektir. Tüm numunelerde donatıların döşenmesi aynı şekilde yapılacaktır. Diğer bir nokta, kirişler ankastre mesnet koşulunu sağlayacak şekilde deney düzeneğine yerleştirilip yükleme testine tabi tutulacaktır. Ankastre mesnet koşulunu sağlaması amacı ile destek ayakları kullanılacaktır. Kirişler çelik ankastre mesnetler yardımıyla yuva içerisine sıkıştırılacak ve bu sayede kiriş mesnet bölgelerinin dönmesi engellenmiş olacaktır. Deney numuneleri 1/1 ölçekte olup, payandalarla desteklenmiş ve hareketi engellenmiş çerçeve sisteme bağlı hidrolik kriko ile yukarıdan aşağıya doğru yük uygulanacaktır. Kirişler destek ayaklarının üstüne taşındıktan sonra üst başlıklar ile sıkıştırılacaktır. Üst başlıklar ile destek ayakları cıvatalar yardımıyla birbirine entegre edilerek sıkıştırılacaktır. Yükleme altında meydana gelecek deplasmanlar potansiyometrik cetveller ve elektronik deplasman ölçerler (LVDT) yardımıyla ölçülecektir. Yükleme monotonik yükleme olarak çift noktada gerçekleştirilecektir. Yükleme hidrolik kriko yardımıyla itme şeklinde yapılacaktır. Yük okuması hidrolik krikonun ucuna yerleştirilen yük hücresi aracılığıyla gerçekleştirilecektir. Hidrolik krikoya yağ basıncını sağlaması amacıyla elektrikli motor kullanılacaktır. Laboratuvar deneyleri Erciyes Üniversitesi Melikgazi Belediyesi Deprem Araştırma Laboratuvarında yapılacaktır. Şekil 2.1' de kiriş yükleme deney düzeneği gösterilmiştir.



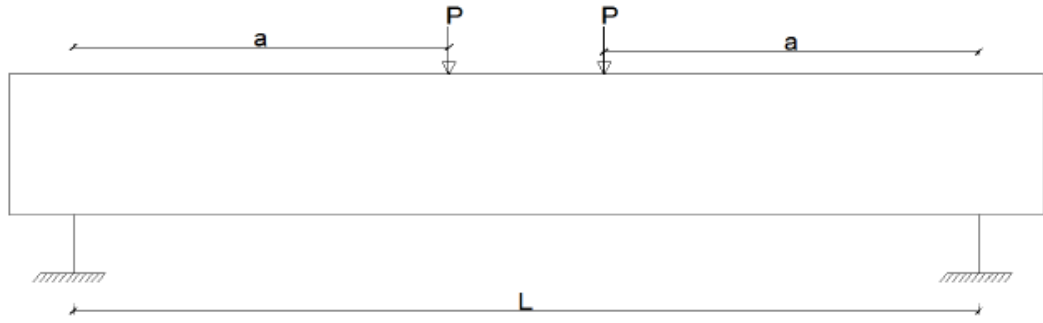
Şekil 2.1. Betonarme kiriş yükleme deney düzeneği

2.1. Deney Numuneleri

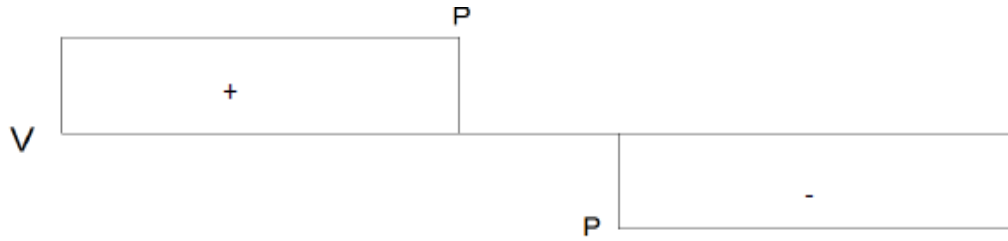
Çalışmada boşluksuz olarak diğer numunelerle mukayese ve teorik hesaplamalarda kıyaslama amacıyla 2 adet referans numunesi üretilmiştir. Kiriş yüksekliğinin %20, %40, %60 oranına sahip her tip numuneden 2 adet olmak üzere toplamda 8 adet numune 1/1 ölçeğinde üretilmiştir. Her numunede 2 adet boşluk simetrik olarak eğilme bölgesinde merkezleri arasında 50 cm olacak şekilde konumlandırılmıştır. Numunelerin isimlendirilmiş ve kodlanmış hali Tablo 1.1 de verilmiştir. Deneysel çalışmada, deney numuneleri hazırlanırken, T500-2000 ve TBDY2018 şartları dikkate alınarak tasarım ve üretim yapılmıştır. [44-45].

2.1.1. Boyut, Geometrik ve Diğer Parametrelerinin Belirlenmesi

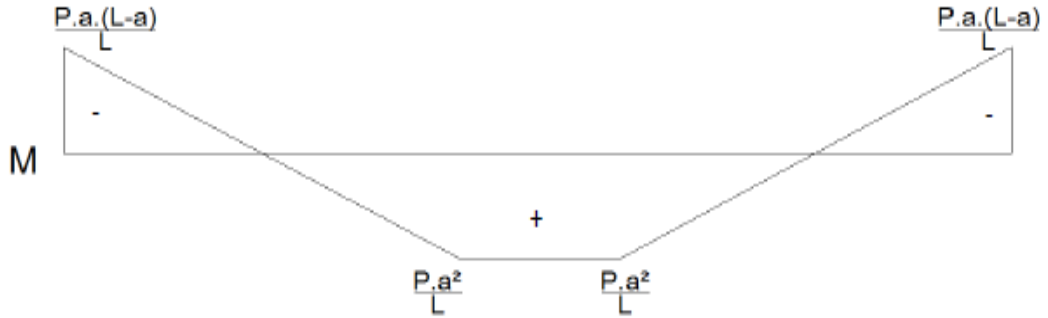
Boyut parametreleri yapı stoklarında ve mevcut literatür çalışmalarında daha sık kullanılan boyutlar ve parametreler dikkate alınarak belirlenmiştir. Mevcut yapıların taşıyıcı sistemi ağırlıklı olarak betonarme sistemden oluşmaktadır. Betonarme sistemin deprem yükleri altında sistematik olarak çalışması için taşıyıcı sistemde yapı elemanlarının yeterli rijitlikte ve süneklikte olması gerekir. Taşıyıcı sistemde kirişler, döşemelerden gelen yüklerin kolonlara aktarılmasında büyük rol oynar. Bu doğrultuda kirişlerin deprem yükleri altında performansını ve kapasitesini tam olarak yansıtmaları gerekir. Çalışmanın kapsamını da belirleyen kirişte oluşturulacak olan boşluk yüzdesi ve konumu kirişin kapasite momenti üzerinden hesaplanarak belirlenmiştir. Şekil 2.2’de kiriş yükleme durumu gösterilirken Şekil 2.3’ de oluşacak yükleme altındaki kesme kuvveti diyagramı Şekil 2.4’ de ise oluşacak moment diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Kiriş yükleme durumu



Şekil 2.3. Kiriş kesme kuvveti diyagramı



Şekil 2.4. Kiriş moment diyagramı

Kirişlerin yapılarıdaki davranışını gerçeğe yakın yansıtması açısından, kirişlerin mesnetlenme koşulu ankastre mesnet olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak ankastre mesnette açıklık ortası moment değerleri mesnet noktalarındaki moment değerlerinden daha düşük değerlerde olduğundan, boşluk konumu eğilme bölgesinde yani açıklık ortasında tasarlanmıştır. Boşluk yüzdesi olarak ta boşluksuz ve kiriş yüksekliğinin %20, %40 ve %60 oranında olacak şekilde boşluk boyutu belirlenmiştir. Kiriş numunelerine ait özellikler Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Kiriş numunelerinin adlandırılması ve boyut özellikleri

Kiriş Adı	Boyutları (mm)	Uzunluğu (mm)	Boşluk Yüzdesi (%)	Boşluk Çapı (mm)	Boşluk Adedi
R-1	250/600	4000	0	0	0
R-2	250/600	4000	0	0	0
K-1	250/600	4000	20	120	2
K-2	250/600	4000	20	120	2
K-3	250/600	4000	40	240	2
K-4	250/600	4000	40	240	2
K-5	250/600	4000	60	360	2
K-6	250/600	4000	60	360	2

Deney numunelerinin boyutları belirlenirken TBDY 2018 ve TS 500-2000 şartları baz alınarak belirleme yapılmıştır. Üretimi yapılan tüm numunelerin boyutları aynı ve değerleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Kiriş numune boyutları

Kiriş Adı	L_{top} (mm)	L_{net} (mm)	b_w (mm)	h (mm)
Tüm Kirişler	4000	3300	250	600

Tabloda gösterilen L_{top} kirişin toplam uzunluğunu, L_{net} kirişlerin mesnet bitiş noktalarından itibaren aradaki uzunluğunu, b_w kiriş genişliğini, h kiriş yüksekliğini ifade etmektedir. Yönetmelik ve standartların kriterlerine bakıldığında minimum kriterler dikkate alınır ;

$$b_w \geq 250 \text{ mm} \quad h \geq 300 \text{ mm}$$

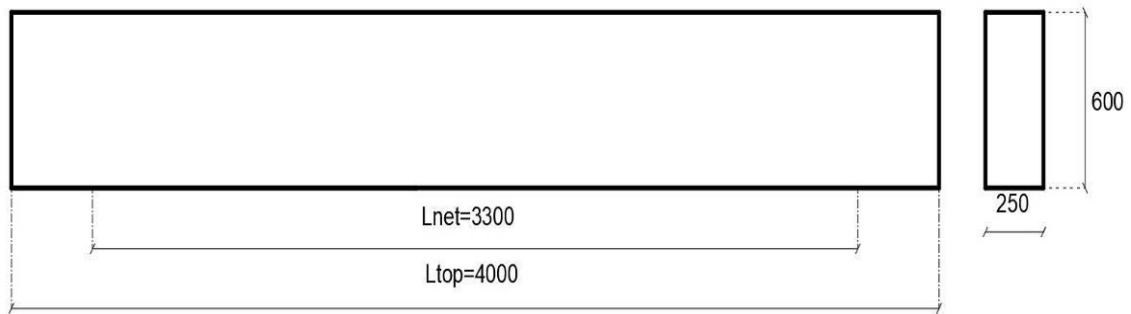
$$h \geq 3t \text{ (t döşeme kalınlığını ifade etmektedir.)}$$

$$h \leq 3.5b_w$$

koşullarını sağladığından seçilen boyutlar kriterlere uygundur.

2.1.1.1. Referans (Boşluksuz) Kirişler

Referans kirişler boşluksuz olarak tasarlanmış olup, boşluklu numunelerle mukayese yapılması amacıyla üretilmiş ve deneye tabii tutulmuştur. Referans numunelerinin boyutları Şekil 2.5’de gösterilmiştir. 2 adet üretilmiş olup R-1 ve R-2 kirişi olarak adlandırılmıştır.



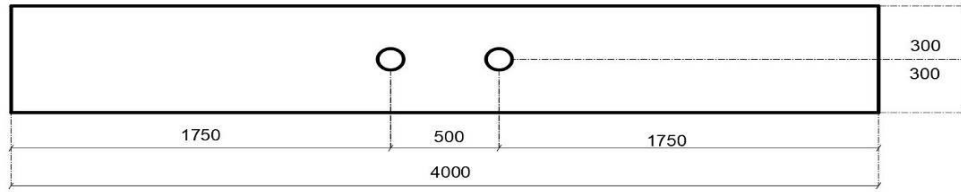
Şekil 2.5. Referans numunelerinin boyutları

2.1.1.2. Boşluklu Kirişler

Boşluklu kirişler kiriş yüksekliğinin %20, %40, %60 oranında 120 mm, 240 mm ve 360 mm çaplarda tasarlanarak üretilmiştir. Boşluk oranı ve boşluk çapı kiriş yüksekliği dikkate alınarak belirlenmiştir. Boşlukların konumu belirlenirken yükleme altında oluşacak moment diyagramı dikkate alınarak planlama yapılmıştır. Şekil 2.4’de belirtilen formüllerden hareketle iki ucu ankastre mesnetli kirişlerde moment değerleri açıklık ortasında daha az değerlerde oluşacağı için, boşluklar eğilme bölgesinde tasarlanmıştır. Boşluklar eğilme bölgesinde simetrik olarak merkezleri arasında 500 mm mesafe olacak şekilde konumlandırılmıştır.

2.1.1.3. 120 mm Çaplı % 20 Boşluk oranına Sahip Kirişler

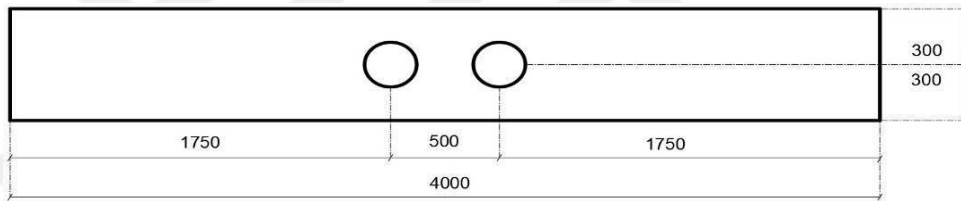
Boşluklar, kirişin tam orta noktasından boşluk merkezine 250 mm uzaklıklarda çift boşluk olacak şekilde simetrik olarak tasarlanmıştır. Kiriş yüksekliğinin %20 oranında 120 mm olacak şekilde eğilme bölgesinde tasarlama yapılmıştır. Boşlukların merkezleri arasındaki mesafe 500 mm’dir. K-1 ve K-2 kirişi olarak adlandırılmıştır. Numune tipinin boyutları Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. 120 mm çaplı % 20 boşluk oranına sahip numunelerin boyutları

2.1.1.4. 240 mm Çaplı % 40 Boşluk Oranına Sahip Kirişler

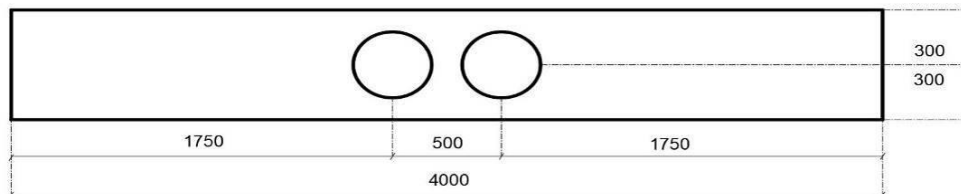
Boşluklar, kirişin tam orta noktasından boşluk merkezine 250 mm uzaklıklarda çift boşluk olacak şekilde simetrik olarak tasarlanmıştır. Kiriş yüksekliğinin %40 oranında 240 mm olacak şekilde eğilme bölgesinde tasarlama yapılmıştır. Boşlukların merkezleri arasındaki mesafe 500 mm'dir. K-3 ve K-4 kirişi olarak adlandırılmıştır. Numune tipinin boyutları Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. 240 mm çaplı % 40 boşluk oranına sahip numunelerin boyutları

2.1.1.5. 360 mm Çaplı % 60 Boşluk Oranına Sahip Kirişler

Boşluklar, kirişin tam orta noktasından boşluk merkezine 250 mm uzaklıklarda çift boşluk olacak şekilde simetrik olarak tasarlanmıştır. Kiriş yüksekliğinin %60 oranında 360 mm olacak şekilde eğilme bölgesinde tasarlama yapılmıştır. Boşlukların merkezleri arasındaki mesafe 500 mm'dir. K-5 ve K-6 kirişi olarak adlandırılmıştır. Numune tipinin boyutları Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. 360 mm çaplı % 60 boşluk oranına sahip numunelerin boyutları

2.1.2. Beton Sınıfı, Donatı Bilgileri ve Detayları

TBDY2018 beton dayanımı kriterine göre, betonarme yapılarda C25'ten düşük dayanımlı beton kullanılamaz. Bu kriter doğrultusunda beton sınıfı C25/30 olarak belirlenmiştir. TBDY2018beton dayanımı kriteri ve TS 708' de belirtilen şartlar dikkate alındığında “donatı sınıfı olarak B420C kullanılacak” ifadesine bağlı olarak donatı sınıfı da B420C olarak belirlenmiştir [46].

2.1.2.1. Boyuna Donatının Belirlenmesi ve Yönetmelik Kriterlerine Uygunluğu

Kirişlerde çekme donatısı olarak 3Ø14, basınç donatısı 2Ø12 ve enine donatı olarak ta sarılma bölgesi için Ø8/100 ve orta bölge için Ø8/200 belirlenmiştir. Seçilen parametrelerin mekanik özellikleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Seçilen beton ve donatı sınıfının mekanik özellikleri

Malzeme	f_{ck} (Mpa)	f_{cd} (Mpa)	f_{ctk} (Mpa)	f_{ctd} (Mpa)	E_c (Mpa)
C25	25	17	1.8	1.2	30000
Malzeme	f_{yk} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	E_s (Mpa)	f_{ywd} (Mpa)	
B420C	420	365	2100000	365	

TBDY2018 Kriterleri, giriş mesnetlerinde çekme donatılarının minimum oranı ;

$$\rho \geq 0.8 f_{ctd} / f_{yd} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'e göre ; $\rho_{\min} = 0.8 \times \frac{1.2}{365} = 0.00263$ elde edilir.

Maksimum boyuna donatı oranı 0.02 olup ρ_b (dengeli donatı oranı)

$$\rho_{\max} = 0.85 \rho_b \quad (2.2)$$

$$\rho_{\max} = 0.02 \quad (2.3)$$

$$\rho_b = 0.85 \times k_1 \times \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \times \left(\frac{600}{600 + f_{yd}} \right) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'den dengeli donatı oranı 0.00205 olarak bulunur. Denklem 2.2'den $\rho_{\max} = 0.00174$ elde edilir. Mevcut çekme donatısının 3014'ün kiriş en kesite oranı ρ ,

$$\frac{A_s}{b_w \times d} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'den 0.0032408 elde edilir. Dolayısıyla;

$\rho_{\min} = 0.00263 < \rho = 0.00324 < \rho_{\max} = 0.0205$ olarak elde edilir. Seçilen donatının oranı yönetmelik kriterleri doğrultusunda minimum donatı ile maksimum donatı arasındadır.

2.1.2.2. Kesme Donatısının Belirlenmesi ve Yönetmelik Kriterlerine Uygunluğu

Enine donatının belirlenmesinde TS-500-2000'de verilen kesme donatısı ifadesi kullanılmıştır. Çift kollu etriye ve 8'lik enine donatı değerleri dikkate alınır;

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq 0.3 \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} b_w \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'daki parametre değerleri yerine girilirse ;

Bu denklemden $s \leq 408$ mm olarak bulunur. Bulunan adım mesafesi s'nin yönetmelik şartları değerlendirildiğinde ;

Sarılma bölgesi kriterleri

$$s \leq 150$$

$$s \leq \frac{h_k}{4} = 600 / 4 = 150 \text{ mm}$$

$$s \leq 8\phi 14 = 8 \times 14 = 112$$

$$s \leq d / 4 = 540 / 4 = 112,5 \text{ mm}$$

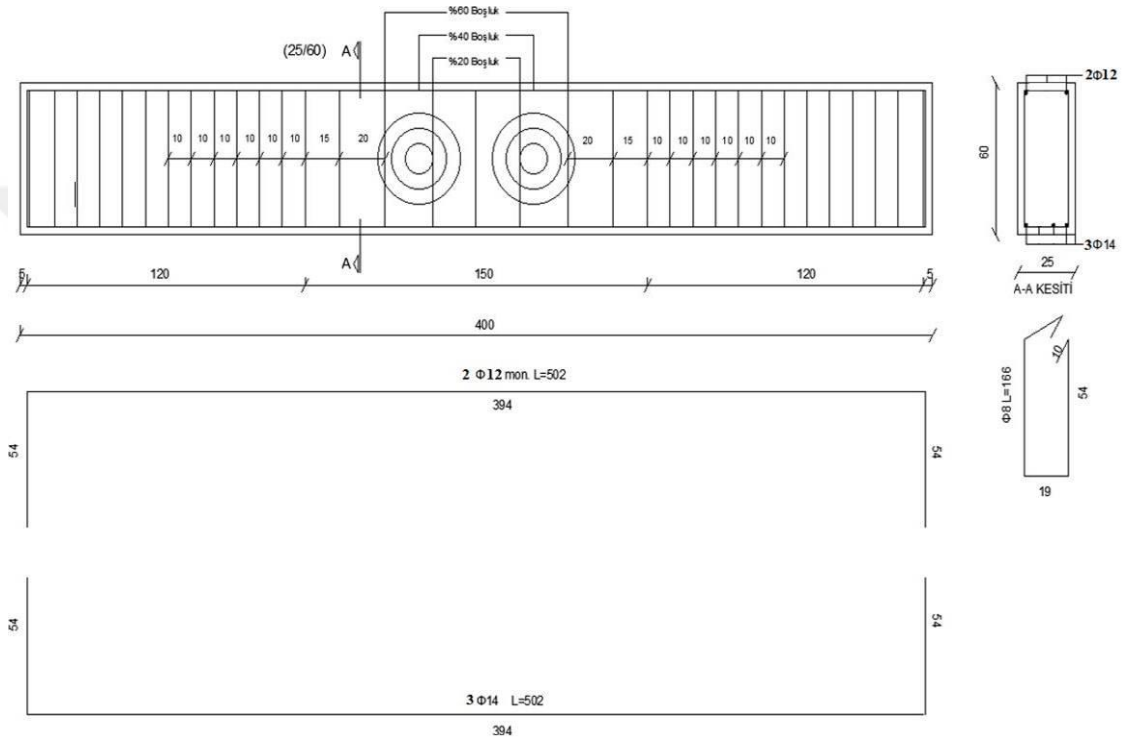
Orta bölge kriterleri

$$s \leq d / 2 = 570 / 2 = 285 \text{ mm}$$

Yönetmelik kriterleri doğrultusunda kiriş sarılma bölgesi için s adım mesafesi 100 mm, orta orta bölge için 200 mm olarak belirlenmiştir. Boşlukların denk geldiği bölgelere etriye konulmamıştır.

2.1.2.3. Numunelerin Donatı Şeması ve Bilgileri

Üretilen tüm numuneler aynı donatı şemasına ve düzenine sahiptir. Sadece boşlukların konumlandırıldığı bölgede eğer etriyelere denk gelmişse o konumdaki enine donatılar konulmamıştır. Donatı detayı ve şeması Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Her bir numuneye ait donatı bilgileri de Tablo 2.4’de gösterilmiştir.



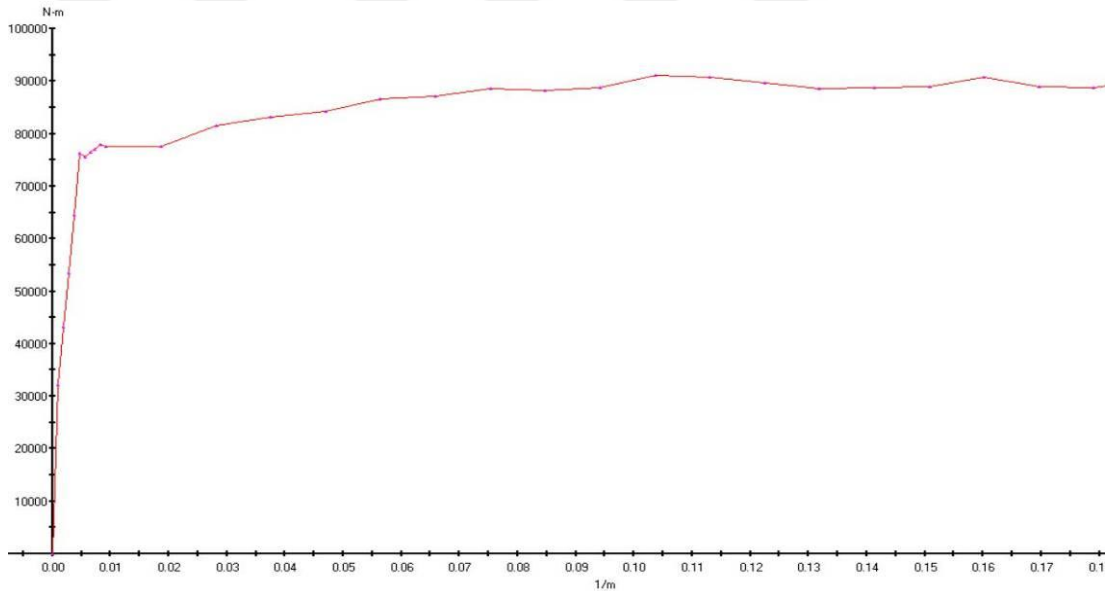
Şekil 2.9. Deney numunelerinin donatı şeması ve detayı

Tablo 2.4. Deney numunelerine ait donatı özellikleri

Numune No	Numune Adı	Enine Donatı		Basınç Donatısı	Çekme Donatısı
		Sarılma Bölgesi	Orta Bölge		
1	R1	Ø8/100	Ø8/200	2Ø12	3Ø14
2	R2	Ø8/100	Ø8/200	2Ø12	3Ø14
3	K1	Ø8/100	Ø8/200	2Ø12	3Ø14
4	K2	Ø8/100	Ø8/200	2Ø12	3Ø14
5	K3	Ø8/100	Ø8/200	2Ø12	3Ø14
6	K4	Ø8/100	Ø8/200	2Ø12	3Ø14
7	K5	Ø8/100	Ø8/200	2Ø12	3Ø14
8	K6	Ø8/100	Ø8/200	2Ø12	3Ø14

2.1.3. Ankastre Boşluksuz Kirişin Teorik Taşıma Gücü Hesabı

Numuneler ankastre mesnetli olarak deneye tabi tutulmuştur. Deney düzeneğinde ankastre mesnette kalacak kiriş uzunluğu her iki kenar içinde 350 mm olarak alınmıştır. Buna bağlı olarak net uzunluk 3300 mm'dir. Yükleme çift noktadan ve deney numunelerinin ortasından yapılmıştır. Yükleme noktaları arasındaki mesafe 600 mm'dir. Şekil 2.2'deki moment diyagramı formülleri doğrultusunda değişken P yükleri altında kesitin uç bölgesinde ve orta bölgesinde oluşacak olan moment değerleri hesaplanmıştır. Şekil 2.10'da XTRACT programında oluşturulan referans kiriş için moment-eğrilik diyagramı gösterilmiştir. Tablo 2.5'de farklı yüklemeler altında uç ve eğilme bölgesinde oluşacak moment değerleri belirtilmiştir.



Şekil 2.10. XTRACT programında oluşturulan kiriş moment-eğrilik diyagramı

Tablo 2.5. Değişken yükler altında referans kirişte oluşacak olan moment değerleri

P (kN)	Uç Moment(kNm)	Eğilme Bölgesi (kNm)
100	-39,89	27,6
150	-59,83	41,4
200	-79,77	55,2
250	-99,72	69
300	-119,66	82,8
500	-199,43	138

Yüklemelere bağlı olarak Tablo 5’den de görüleceği üzere ankastre mesnetli kirişlerde, mesnet momentleri eğilme bölgesi yani açıklık ortası moment değerlerinden büyüktür. Kesitin kapasite moment hesabı Tablo 2.6’daki standart malzeme bilgilerine göre yapılacaktır;

Tablo 2.6. Moment hesabı için gerekli malzeme bilgileri

Malzeme	f_{ck} (Mpa)	f_{cd} (Mpa)	f_{ctk} (Mpa)	f_{ctd} (Mpa)	E_c (Mpa)
C25	25	17	1.8	1.2	30000
Malzeme	f_{yk} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	E_s (Mpa)	f_{ywd} (Mpa)	f_{ywd} (Mpa)
B420C	420	365	2100000	365	365
Diğer Bilgiler	A_s (mm)	A_s' (mm ²)	d (mm)	k_1	d' (mm)
	461,81	226,19	570	0.82	30

Akma Kontrolü denklem 2.7’ye göre hesaplanacak olursa;

$$\rho - \rho' \geq 0,85.k_1 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{600}{600 - f_{yd}} \cdot \frac{d'}{d} \quad (2.7)$$

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d} = \frac{461,81}{250 \times 570} = 0,00324$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b_w \cdot d} = \frac{226,19}{250 \times 570} = 0,00159$$

olarak elde edilir. Elde edilen değerler yerine yazılıp hesaplanırsa $0,00165 < 0,00443$ olduğu için donatı akmamıştır. Denge denklemi Denklem 2.8’ göre yazılırsa;

$$0,85.f_{cd} \times b_w \cdot k_1 \cdot c + A_s' \cdot \sigma_s' = A_s \cdot f_{yd} \quad (2.8)$$

$$\sigma_s' = 600 \cdot \left(\frac{c - d'}{c} \right) \quad (2.9)$$

Denklem 2.9’ dan elde edilen değer, Denklem 2.8’de yerine konulursa ve 2. Dereceden denklem çözülürse c değeri 42.63 mm olarak elde edilir. Tarafsız eksene uzaklık (c) değeri Denklem 2.10’ da yerine konulursa;

$$M_r = (A_s \cdot f_{yd} - A_s' \cdot \sigma_s') \cdot \left(d - \frac{k_1 \cdot c}{2} \right) + A_s' \cdot \sigma_s' \cdot (d - d') \quad (2.10)$$

$M_r = 92.748 \text{ kNm}$ olarak taşıma gücü momenti hesaplanır. Kesitin kesme hesabı yapıldığında bulunan moment değerine göre Denklem 2.11'den elde edilen kesme kuvveti değeri ;

$$M = \frac{P \cdot a^2}{2L} \quad (2.11)$$

$$92,748 \times 10^6 = \frac{P \cdot 1350^2}{2 \cdot 3300} \quad P = 335.88 \text{ kN} \quad \text{olarak hesaplanmıştır.}$$

Kesme kuvveti için hesap, denklem 2.12'ye göre yapılırsa V_w elde edilir. Sonra Denklem 2.13' den V_{cr} değeri elde edilir. Son olarak Denklem 2.14 ve Denklem 2.15'den yararlanılarak Kesme değeri hesaplanır [47].

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yk} \cdot d \quad (2.12)$$

$$V_w = \frac{100,53}{100} \cdot 420.570 \cdot 10^{-3} = 240.67 \text{ kN}$$

$$V_{cr} = 0.65 \cdot f_{ctk} \cdot b_w \cdot d \quad (2.13)$$

$$V_{cr} = 0.65 \cdot 1.8 \cdot 250 \cdot 570 \cdot 10^{-3}$$

$$V_c = 0.8 \cdot V_{cr} \quad (2.14)$$

$$V_c = 0.8 \cdot 166.725 = 133.38 \text{ kN}$$

$$V_r = V_c + V_w \quad (2.15)$$

$$V_r = 240.67 + 133.38 = 374.05 \text{ kN}$$

$V = P/2$ olarak etki etki ettirildiğinden bulunan kesme kuvveti değeri 748.1 kN olarak elde edilir. Moment için elde edilen kesme kuvveti değeri 335.88 kN , kesme kuvveti değerinden küçük olduğundan ($748.1 \text{ kN} > 335.88 \text{ kN}$) kirişin teorik yük değeri 335.88 kN olup kirişin davranışında eğilme davranışı hakimdir.

2.2. Numunelerin Üretimi

Numune üretimleri Erciyes Üniversitesi Melikgazi Belediyesi Deprem Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Düz bir zemin üzerine kalıp altına gelecek şekilde naylonlar konularak betonun zemine yapışmasını engellemek amacıyla ince bir tabaka oluşturulmuştur. Sonrasında su ve neme karşı dayanıklı playwoodlarla 4000 mm uzunluğunda, 600 mm yüksekliğinde, 250 mm genişliğinde 8 adet kiriş kalıpları hazırlanmıştır. Kalıpların hazırlanması Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Deney numunelerinin kalıp imalatı

Kalıp imalatının sonrasında Şekil 2.13’de gösterilen kirişlerin donatı döşenmesi aşamasına geçilmiştir. Tüm kirişlerde ortak olarak çekme donatısı $3\phi/14$ ve basınç donatısı $2\phi/12$ olacak şekilde boyuna donatılar yerleştirilmiştir. Enine donatı ise 30 mm pas payı bırakılacak şekilde kirişin sarılma bölgesinde $\phi 8/100$ ve orta bölgesinde $\phi 8/200$ olarak yerleştirilmiştir. 360 mm ve 240 mm çap uzunluğunda boşluğa sahip numunelerde boşluk kısmının oluşturulması için sanayide özel olarak üretilen ve Şekil 2.12’de gösterilen sac malzeme kullanılırken, 120 mm boşluğa sahip numunelerde Şekil 2.12’ de gösterilen boşluk kısmının oluşturulması için 120 mm çapında plastik boru kullanılmıştır. Boşlukların denk geldiği enine donatılar çıkarılmıştır. Pas payı

tabakasının oluşması için 25 mm boyutlarında plastik pas payları gerek kirişin yan taraflarında kiriş boyunca gerekse kirişin alt kısımlarında kiriş boyunca yerleştirilmiştir.



Şekil 2.12. Boşluklar için kullanılan sac ve boru malzemeler



Şekil 2.13. Donatıların ve boşlukların hazırlanması ve yerleşimi

Beton dökümü öncesinde Şekil 2.14’de gösterilen kalıplar desteklenerek döküme hazır hale getirilmiştir. Betondan numune almak amacıyla 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde silindir numuneler Şekil 2.14’de gösterildiği gibi alınmıştır. 3 adet numune 7 günlük kür işlemi sonrası ve 3 adet numunede 28 günlük kür işlemi sonrası deneye tabi tutulmuştur. 7 ve 28 günlük numunelerden 2 tanesi basınç ve 1 tanesi çekme testi için kullanılmıştır.



Şekil 2.14. Kalıpların desteklenmesi ve silindir numunelerin hazırlanması

Beton dökümü için santralden C25/30 standardında beton sipariş edilmiştir. Şekil 2.16'da gösterildiği gibi beton dökümü esnasında betonun tam yerleşmesini sağlamak ve segregasyonu engellemek amacıyla vibratör kullanılmıştır. Şekil 2.15'de gösterilen silindir numuneler için alınan betonun silindir kalıplara yerleşmesinden önce kalıplar yağlanmıştır. Silindir numunelere beton dökümü ise aşamalı olarak gerekli şişleme işlemleri gerçekleştirilerek yapılmıştır.



Şekil 2.15. Silindir numunelere beton dökümü



Şekil 2.16. Kiriş numunelerine beton dökümü

Betonun daha iyi yerleşebilmesi amacıyla brüt beton kullanılmıştır. Numunelerin laboratuvara kolay taşınabilmesi amacıyla, kirişlerin iki uçlarına kanca şeklinde donatı yerleştirilmiştir. Kalıplar 2 gün sonra sökülmüş kür işlemine ise priz aldıktan sonra başlanmış ve 28 gün boyunca düzenli olarak her gün kür işlemi Şekil 2.17’de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.

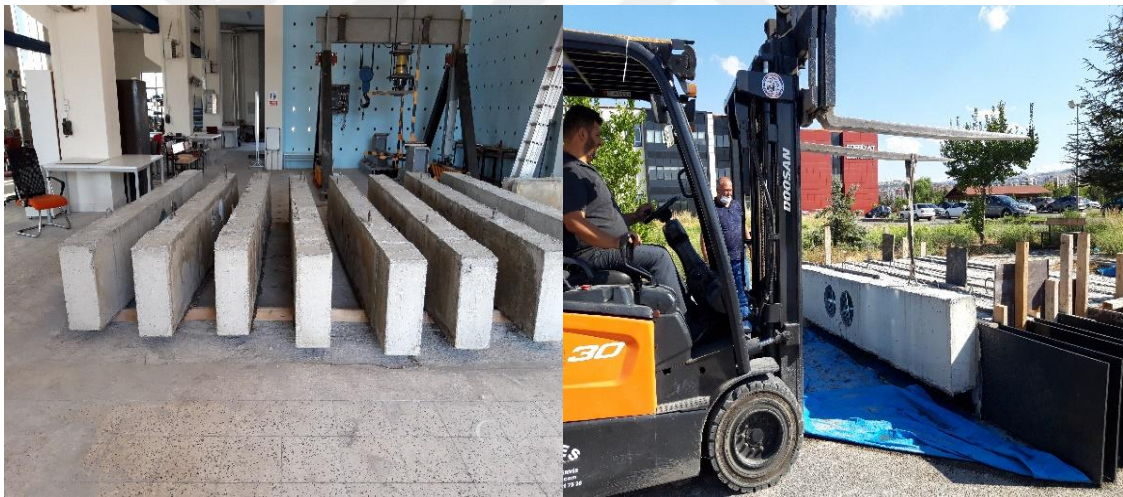


Şekil 2.17. Deney numunelerinin kür işlemi

Silindir numune kalıpları da 1 gün sonra çıkarılarak kür havuzuna konulmuştur. 3 adet numune 7 gün kür havuzunda bekletilirken 3 adet numune ise 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. Kür havuzuna konulmadan önce 1 gün kalıpta bekletilen numuneler Şekil 2.18’de gösterildiği üzere havuza konulmuştur. Şekil 2.19’ da deney numunelerinin laboratuvara taşınmasına yönelik görseller verilmiştir.



Şekil 2.18. Silindir numunelerin kür havuzuna konulması



Şekil 2.19. Deney numunelerinin laboratuvara taşınması

2.2.1. Deney Numunelerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Kiriş numunelerinin üretiminde beton sınıfı olarak C25/30 sınıfı brüt beton kullanılırken donatı olarak ta B420C standardında **Ø8, Ø12, Ø14** çaplarında donatı kullanılmıştır. Donatıların ise T8 708 standardına göre çelik çekme deneyleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Çekme deneyleri ve basınç deneyleri için de ayrı ayrı yük-deplasman eğrileri elde edilmiş ve bu eğrilerden yararlanılarak gerilme-deformasyon grafikleri çıkarılmıştır. Çelik numuneler için ayrıca gerilme-kopma uzaması grafikleri elde edilmiştir.

2.2.1.1. Beton Basınç ve Çekme Deneyleri

Kiriş elemanları betonundan alınan silindir numuneler Erciyes Üniversitesi Melikgazi Belediyesi Deprem Araştırma Laboratuvarında bulunan beton basınç dayanım cihazında test edilmiştir. Numune üstlerindeki pürüzlülüğü en aza indirmek ve yükün homojen dağılımını sağlamak amacıyla Şekil 2.21’ de gösterildiği gibi numunelere kükürt başlık yapılmıştır. Numunelerin elastisite modülleri, birim boy kısaltmaları ve gerilme deformasyon grafiklerini elde edebilmek amacıyla Şekil 2.20’de gösterilen deplasman ölçer saat kullanılmıştır. Şekil 2.22’ de basınç testine ait görseller verilmiştir. Numuneler TS EN 12390-3’e göre basınç dayanım testine tabi tutulmuştur [48]. Tablo 2.7’de numunelere ait sonuçlar verilmiştir.



Şekil 2.20. Deplasman ölçer saat ve basınç test cihazı



Şekil 2.21. Silindir numunelere kükürt başlık yapma işlemi



Şekil 2.22. Basınç testi deneyleri

Tablo 2.7. 7 ve 28 Günlük kür yapılan beton basınç testi sonuçları

Numune No	Yük (kN)	Kesit Alanı (cm ²)	Silindir Dayanımı (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)	Ortalama Dayanım (Mpa)
1	273	176.71	15.474	10258	17.522
2	345.2	176.71	19.57	11378	
3	481.5	176.71	27.29	16290	
4	528	176.71	29.91	22873	30.517
5	606	176.71	34.35	35051	

Tabloda 1 ve 2 numaralı numuneler 7 gün kür yapılan basınç testi sonuçlarını ifade ederken 3,4 ve 5 numaralı numuneler ise 28 gün kür yapılan basınç testi sonuçlarını ifade etmektedir. Silindir numuneler yatay olarak test cihazına yerleştirilerek uzunluğu boyutunda ahşap malzemeler yardımıyla sıkıştırılarak yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Düşey doğrultuda verilen yük etkisi altında silindir numunede çatlaklar ve kesitte yarma işlemi gerçekleşinceye kadar yükleme yapılmıştır. Çekme dayanımı TS EN 12390-6'da belirtilen ifadeye göre hesap edilmiştir [49].

$$f_{ct} = \frac{2xF}{\pi xLxd} \quad (2.16)$$

ifade de;

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı, Mpa (N/mm²)

F : Maksimum yük, N

L : Numunenin yükleme levhasına temas çizgisi uzunluğu, mm

d : Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm

Şekil 2.23’de yarmada çekme testi deneylerine ait resimler gösterilmiştir. Denklem 2.16’daki ifade doğrultusunda yarma için kullanılan silindir numune için çekme değeri $f_{ctk} = 2.065 \text{ Mpa}$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.23. Yarmada çekme testi deneyleri

TS 500-2000’de belirtilen Denklem 2.17’e göre elastisite modülü hesaplanırsa ;

$$E = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \text{ (Mpa)} \quad (2.17)$$

Tablo 2.8'deki silindir numunelerin basınç testlerinden elde edilen dayanımlarından hareketle elastisite modülleri, basınç testinden elde edilen dayanım değerlerine göre TS 500 (2000) standardına göre hesaplanmıştır.

Tablo 2.8. TS 500 (2000)'e göre elastisite modülü değerleri

Numune No	Silindir Dayanımı (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)
1	15.474	26784
2	19.57	28377
3	27.29	30977
4	29.912	31774
5	34.35	33047

2.2.1.2. Donatı Numuneleri Çekme Deneyleri

Kiriş numunelerinin üretiminde kullanılan B420C donatı kalitesindeki 8 mm, 12 mm ve 14 mm çaplarındaki donatılardan alınan ikişer adet örnekler Erciyes Üniversitesi Melikgazi Belediyesi Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan çelik çekme cihazında test edilmiştir. TS 708 ve TS EN 6892-1 standartlarına göre donatılarda çekme deneyleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Şekil 2.24'de çekme deneylerine ait görseller verilmiştir. Tablo 2.9' da çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Donatı numuneleri çekme deneyleri

Tablo 2.9. Donatı numunelerine ait mekanik özellikler

Çap (mm)	Akma Muk. (Mpa)	Çekme Muk. (Mpa)	Çekme/ Akma Oranı	Deneysel Akma/ Karakteristik Akma	Kopma Uzaması %
8	508	593	1,17	1,21	23
8	481	580	1,21	1,15	29
12	460	569	1,24	1,1	34
12	464	570	1,23	1,1	34
14	469	590	1,26	1,12	36
14	471	592	1,26	1,12	36

2.3. Betonarme Kiriş Deneyleri

2.3.1. Deney Düzeneği ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney düzeneğinin tasarlanması ve kurulması, betonarme kirişlerin deneye hazır hale getirilmesi, deneylerin sorunsuz bir şekilde ilerlemesi açısından önem arz etmektedir. Deney düzeneği için Erciyes Üniversitesi Melikgazi Belediyesi Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan ekipmanlar ve malzemeler kullanılmıştır. Deney düzeneği kirişin her iki ucundan ankastre mesnet koşulunu sağlayacak ve 1/1 ölçeğinde kirişin yerleşebileceği şekilde üstten yüklemeye uygun olarak hazırlanmıştır. Ankastre mesnetlerin aralarındaki net açıklık 3300 mm dir. Kiriş numunelerinin ebatları 250/600 mm dir.

2.3.1.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Erciyes Üniversitesi Melikgazi Belediyesi Deprem Araştırma Laboratuvarına taşınan kiriş numunelerinde öncelikli olarak boşlukları oluşturmak amacıyla beton içerisinde bırakılan dairesel sac ve plastik elemanlar çıkarılmıştır. Şekil 2.25' de çalışma aşaması verilmiştir.



Şekil 2.25. Numunelerin boyanması ve pürüzlerinin giderilmesi

2.3.1.2. Deney Düzenəğinin Kurulması

Deneyler iki ucu ankastre mesnet koşulunu sağlayacak şekilde düzenek oluşturularak yapılmıştır. Ankastre mesnet şartını sağlamak amacıyla deney düzenėğinde Şekil 2.26’ da gösterilen çelik mesnet ayakları kullanılmıştır.



Şekil 2.26. Deney düzenėğinde kullanılan ankastre mesnet ayağı

Ankastre mesnet ayaklarının deney esnasında her ayakta 6 adet mil olacak şekilde somun, pul ve levhalarla temel zeminine sabitlenerek hareket etmemeleri sağlanmıştır.

Ankastre mesnet ayağı yükleme noktasına simetrik olacak şekilde zemine sabitlenmiştir (Şekil 2.27).



Şekil 2.27. Ankastre mesnet ayaklarının deney platformundaki konumları

Kiriş numunelerine yükleme üstten yapılacağı için çerçeve sistem kullanılmıştır. Kullanılan çerçeve sistemin yatayda hareketini engellemek amacıyla çerçeve sistemin ayakları deney numunesine paralel olacak şekilde payandalarla Şekil 2.28’ de gösterildiği üzere desteklenerek sabitlenmiştir.



Şekil 2.28. Çerçeve sistemi destekleyen payandalar



Şekil 2.29. Yükleme düzeneğinin bağlanması ve sabitlenmesi

Yüklemelerde 100 ton kapasiteli ve 230 mm deplasman yapabilen hidrolik piston ile hidrolik piston ucuna entegre edilmiş veri alınmasını sağlayan yük hücresi kullanılmıştır (Şekil 2.29).



Şekil 2.30. Yükleme aparatının bağlanması

Yük hücresinin ucuna 200 mm genişlik 180 mm yüksekliğinde çelik profil ucuna dairesel mil kaynaklı olarak, yük hücresinin içine geçebilecek şekilde delik çapı açılmış ve torna işleminden geçirilerek yük hücresi aparatına entegre edilmiştir (Şekil 2.30). Yükleme kirişi olarak 900 mm uzunluğunda 300 mm yüksekliğinde IPE 300 çelik kiriş

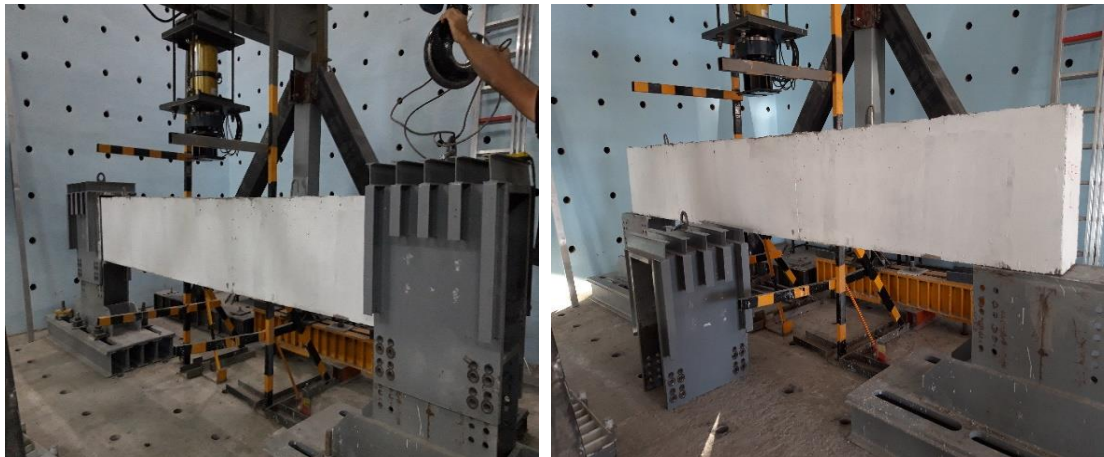
kullanılmıştır. Çelik kirişte rijitliği artırmak amacıyla çelik berkitmeler kaynatılmıştır. Yükleme esnasında kiriş yüzeyine temas ederek yükü iletecek olan dairesel miller yükleme kirişine simetrik olarak kaynatılmıştır (Şekil 2.31).



Şekil 2.31. Yükleme kirişinin hazırlanması

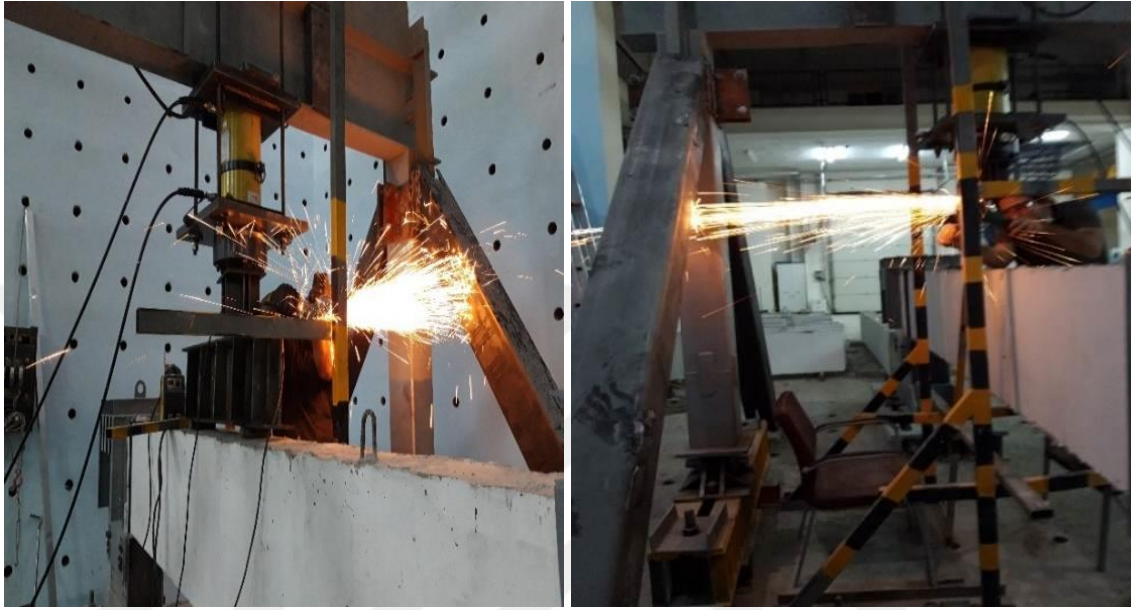
2.3.1.3. Deney Numunesinin Düzeneğine Yerleştirilmesi

Referans 1 numunesi tavan vinç yardımıyla halatlarla bağlanarak düzeneğe yerleştirilmiştir (Şekil 2.32). Ankastre mesnetler düzeneğe yerleştirilip cıvatalar ile mesnet altlarına sabitlenmiştir. Her bir mesnet ayağını iki taraflı sıkıştırmak ve düzeneğe yerleştirmek amacı ile altışar toplamda düzenekte 24 adet cıvata kullanılmıştır.



Şekil 2.32. Deney numunesinin düzeneğe yerleştirilmesi

Deplasman ölçen aletlerin numunenin üzerinde konumlanmasını ve sabitlenmesini sağlayacak kutu profillerden imal edilen iki adet düzenek kullanılmıştır. Düzenekler deplasman ölçerlerin gelecekleri konuma göre dizayn edilmiş ve gerekli kaynak işlemlerinden sonra hareketin engellenmesi için zemine sabitlenmiştir (Şekil 2.33).



Şekil 2.33. Deplasman ölçerlerin bağlanacağı düzeneklerin imalatı

Yükleme noktaları arasında 600 mm mesafe bulunmaktadır. Silindirik miller bu mesafeyi sağlayacak şekilde yüklemeye kirişine kaynakla tutturulmuştur (Şekil 2.34).



Şekil 2.34. Yüklemeye kirişi

2.3.1.4. Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Ekipmanlar

Deney düzeneğinde yükleme işleminin gerçekleşmesini sağlayacak 100 ton kapasiteli hidrolik piston ile yükün bilgisayara veri aktarımını sağlayacak 100 ton kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Hidrolik pistonun yükleme işlemi için elektrikli motor kullanılmıştır. Şekil 2.35’ de bu iki ekipmanın entegre biçimi gösterilmiştir.



Şekil 2.35. Hidrolik piston ve yük hücresi

Yük hücresine yağ basıncı uygulayarak yükleme hızını ve itme-çekme işlemini gerçekleştirmesi amacıyla elektrikli motor kullanılmıştır. Yük hücresi ve deplasman ölçerlerden (IVDT ve potansiyometrik cetvel) alınan verilerin bilgisayara aktarımını sağlaması açısından veri toplama cihazı (datalogger) kullanılmıştır. Tüm deneyler boyunca 2 adet veri toplama cihazı kullanılmıştır. Kullanılan yük hücresi ve deplasman ölçerler kalibre edilip veri toplama cihazına bağlanmıştır. Bu ekipmanlar Şekil 2.36’da gösterilmiştir.



Şekil 2.36. Elektrikli motor ve veri toplama cihazı

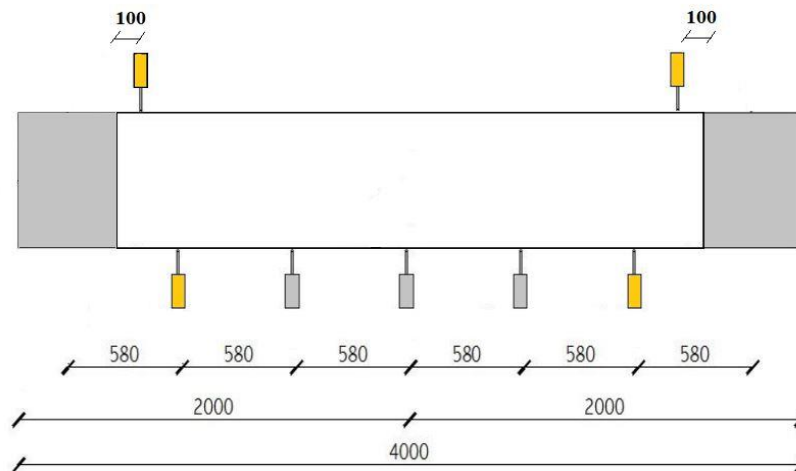
Yükleme altında kiriş üzerinde belirlenen bölgelerde anlık yer değiştirmeleri ölçmek amacıyla Şekil 2.37. de gösterilen deplasman ölçerler kullanılmıştır.



Şekil 2.37. Deplasman ölçerler (LVDT ve Potansiyometrik Cetvel)

2.3.1.5. Deplasman Ölçerlerin Bağlanması

Yükleme esnasında kirişin belli lokasyonlarında yer değiştirmeleri ölçmek amacıyla düzeneğe deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Yer değiştirmenin fazla olacağı öngörülen kiriş orta noktasına ve orta noktaya yakın simetrik iki noktaya 300 mm deplasman kapasiteli potansiyometrik cetveller yerleştirilmiştir. Mesnet Bölgesine yakın alt ve üst noktalara ise 100 mm ve 200 mm deplasman kapasiteli LVDT ekipmanları yerleştirilmiştir (Şekil 2.39). Deplasman ölçerlerin düzenek üzerindeki konumları Şekil 2.38’ de gösterilmiştir. Tüm deplasman ölçerlerin kalibrasyonları yapılarak doğru ölçüm alıp almadıklarının kontrolü yapılmıştır.



Şekil 2.38. Deplasman ölçerlerin deney düzeneğindeki konumları



Şekil 2.39. Deplasman ölçerlerin bağlanması

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Deneyler

Bu bölümde deney numunelerinin sonuçları, deney sonuçlarına bağlı olarak elden edilen grafikler ve veriler her deney numunesi için ayrı ayrı gösterilerek irdelenmiştir. Deneylerde yükleme çift noktadan monotonik olarak yapılmıştır. Yükleme yük kontrollü olarak başlanmış ve akma sonrası bölgeden itibaren deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinde belirgin deplasman gözlemlenip göçme yüküne ulaşıncaya kadar deneyler sürdürülmüştür. Toplamda 8 adet deney numunesi deneye tabi tutulmuştur. Deney esnasında yükleme gerçekleşirken çatlak kontrolü yapılarak oluşan çatlaklar not edilmiş ve görsellenmiştir. Deney sonrasında çatlaklar numune üzerinde numaralandırılarak genişlikleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve raporlanmıştır. Yük artışı esnasında yüke bağlı olarak oluşan çatlaklarında hangi yük değerinde oluştukları da raporlanarak kesme ve eğilme çatlakları belirlenmiş ve raporlanmıştır. Deney numunelerinin birbiri ile karşılaştırılması amacıyla her deney numunesinde tüm yükleme sürecinde çatlak gelişimleri, yük durumları raporlanmış ve fotoğrafları çekilerek görsel olarak kaydedilmiştir.

3.1.1. Deney Numunelerine Ait Sonuçlardan Elde Edilecek Veriler ve Grafikler

Her deney numunesinde 7 adet deplasman ölçer kullanılmıştır. Yükleme üstten yapıldığı için deplasman ölçerlerin beşi kiriş altında konumlanırken ikisi ise kiriş üstünde mesnet noktalarına yakın mesafelerde konumlandırılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen veriler yardımıyla oluşturulan grafikler aşağıda verilmiştir ;

- Yük- Orta Nokta Deplasman Grafiği (Pot Orta),
- Süneklik Değeri,

- Rijitlik Grafiği,
- Eğim Açısı Grafiği,
- Tüketilen Enerji Miktarının Hesaplanması
- Moment Eğrilik Grafiği
- Deplasman Eğrileri

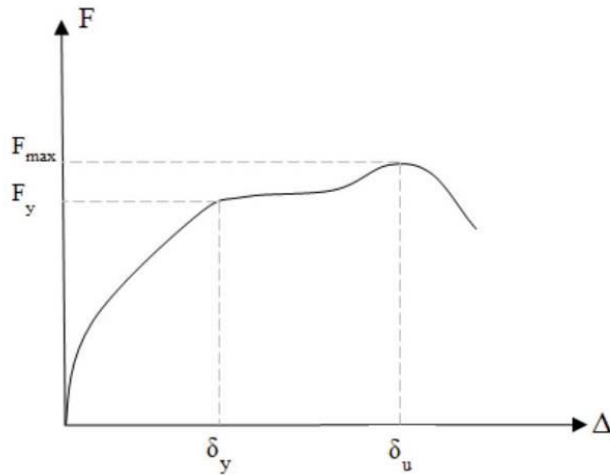
3.1.1.1 Yük-Deplasman Grafiklerinin Elde Edilmesi

Yük hücresinden elde edilen verilerden faydalanılmıştır. Kalibre edilen yük hücresi, yük değerini (kN) ve kalibre edilen deplasman ölçerler, deplasman değerini (mm) cinsinden veri olarak aktarmaktadır. Düşey eksen yük değerini (P) ifade ederken, yatay eksen ise deplasman değerini (mm) ifade etmektedir.

3.1.1.2 Süneklik Değerinin Elde Edilmesi

Süneklik değerinin elde edilmesinde yük-orta nokta deplasman grafiğinden faydalanılmıştır. Grafikte maksimum yük göçme yükünü ifade ederken maksimum yüke karşılık gelen deplasman değeri ise göçme anı deplasmanı olarak nitelendirilir. Göçme anı deplasman değerinin akma anı deplasman değerine oranı süneklik değerini vermektedir (Şekil 3.1). Süneklik değeri Denklem 3.1' e göre belirlenmektedir.

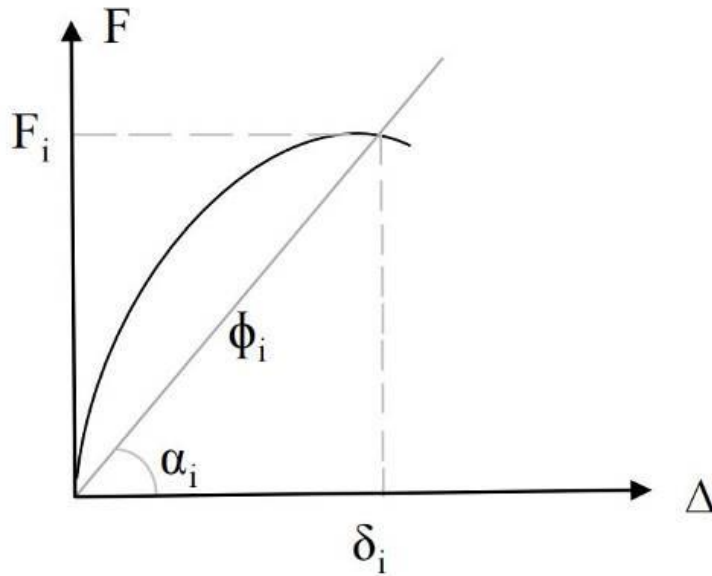
$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1. Süneklik değerinin elde edilmesi

3.1.1.3. Rijitlik Grafiklerinin Çizilmesi

Her bir numunenin rijitlik değeri deney esnasında yüklemeye bağlı olarak giderek azalacaktır. Bu azalım grafiğini gösteren $\Phi_j / \Phi_{ilk} (K_j / K_{ilk})$ grafikleri çizilmiştir. Azalım grafiklerindeki rijitlik değeri yük-deplasman eğrilerindeki eğimlerden elde edilerek belirlenir. Rijitlik grafiğinde düşey eksen rijitlik değerini yani $\Phi_j / \Phi_{ilk} (K_j / K_{ilk})$ değerini gösterirken, yatay eksen ise deplasmanın en fazla olduğu orta nokta deplasman değerini göstermektedir. Şekil 3.2’ de verilen grafiğe göre Denklem 3.2’deki formül kullanılarak her yük değerinin o yük anındaki deplasman değerine bölünmesi ile o yükleme değeri için rijitlik değeri elde edilir.



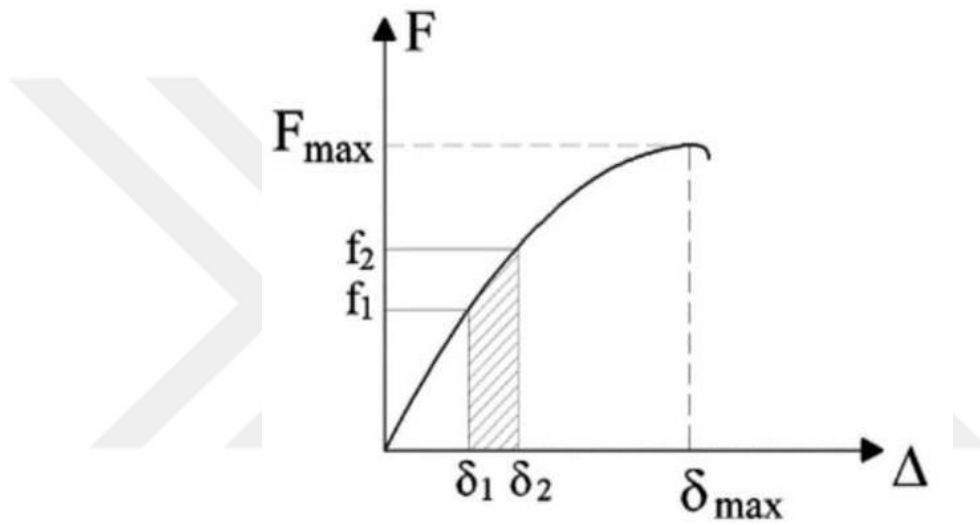
Şekil 3.2. Rijitlik değerlerinin Elde Edilmesi

$$\text{Rijitlik } (\Phi) = F_i / \delta_i \quad (3.2)$$

Bu oran başlangıçta 1 olacakken sonrasında yükleme artışıyla birlikte azalmaya başlayacaktır. Eğim açısı başlangıçta 90 dereceye yakın bir değerde iken yüklemenin artışı ile birlikte giderek azalmaktadır. Eğim açısı grafikleri Şekil 3.2’de gösterilen α_i değerinin yüklemeye bağlı azalması ile oluşan grafiklerdir. Her bir yükleme anı numaralandırılarak yükleme anındaki açı değeri belirlenir. Bu grafikte düşey eksen açı değerini ifade ederken yatay eksen ise yükleme için belirlenen numarayı ifade eder.

3.1.1.3. Tüketilen Enerji Miktarlarının Hesaplanması

Her bir deney numunesinin tükettiği enerji miktarı hesaplanırken yük-orta nokta deplasman eğrileri kullanılır. Bu eğrinin altında kalan alan tüketilen enerji miktarını ifade etmektedir. Şekil 3.3’ de gösterildiği gibi her bir yükleme anı için birim alan elde edilmiş ve hesaplanmıştır. Bu eğrinin altında kalan tüm birim alanların toplamı ile o numuneye ait enerji tüketme değeri elde edilir. Elde edilen bu birim alanlar trapez bir geometriye sahip olarak düşünülmüş ve denklem 3.3’e göre hesaplanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Tüketilen enerji miktarının hesaplanması

$$dA = (\delta_2 - \delta_1) \frac{(f_1 + f_2)}{2} \quad (3.3)$$

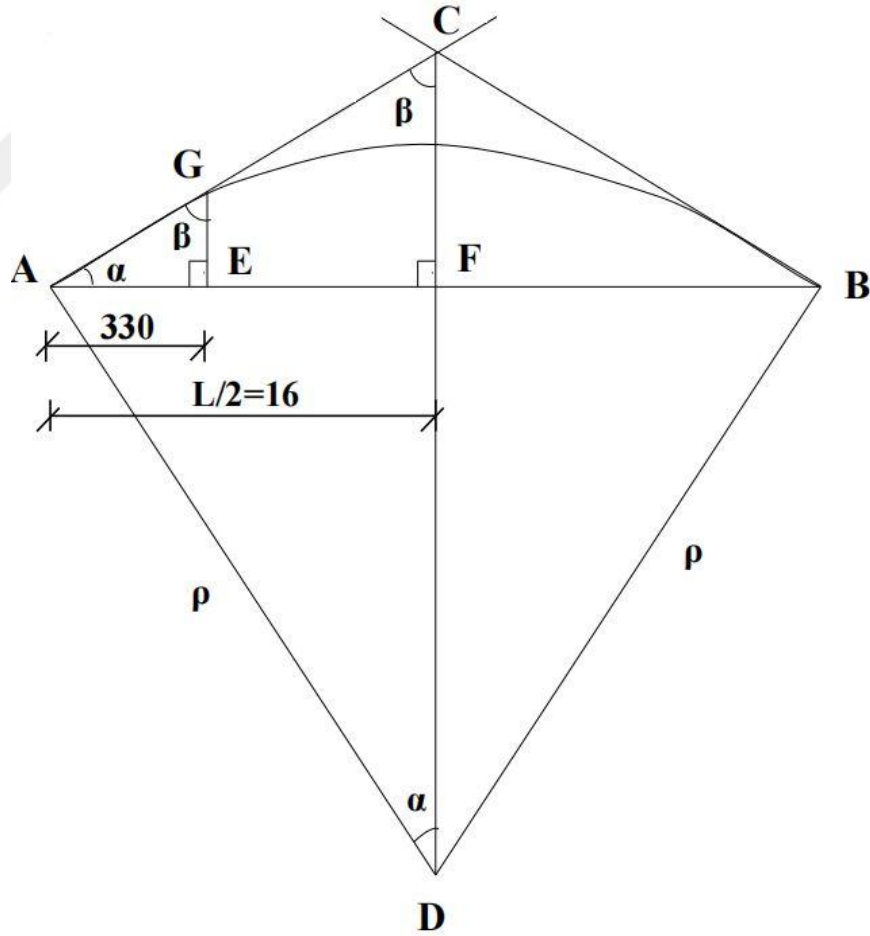
3.1.1.4. Moment Eğrilik Grafiklerinin Çizilmesi

Şekil 2.4’deki moment diyagramından hareketle kiriş numuneleri için moment değeri açıklık ortası moment formülü olan denklem 3.4’e göre hesaplanmaktadır. Bu denklemde ifade edilen P değeri kirişe uygulanan toplam yük miktarını ifade etmektedir.

$$M = \frac{P \cdot a^2}{2 \cdot L} \quad (3.4)$$

Kiriş numuneleri için moment değerleri belirlendikten sonra Şekil 3.4. yardımıyla eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Burada AB doğrusu kirişin eğilmeden önceki kiriş

açıklığını, AB yayı eğilmeden sonraki açıklığını, AE doğrusu mesnet ile kiriş arasındaki ilk ölçüm alınan nokta arasını, AF doğrusu kiriş mesneti ile kiriş orta noktası arasındaki mesafeyi ve AD doğrusu eğrilik yarıçapını (ρ) göstermektedir. Eğrilik ise $(1/\rho)$ 'dur. Geometrik olarak eğrilik yarıçapının bulunması gereklidir. İlk olarak kirişe uygulanan yük ile kiriş düzleminde ötelenme meydana gelecektir. A ve B noktasından eğilmiş kirişe teğet çizilirse AC ve BC doğruları meydana gelecektir. AGE üçgeni, AFC üçgeni ve ADC üçgeni benzer üçgenlerdir. AGE ve AFC üçgenlerinin benzerliklerinden faydalanılarak CF uzunluğu bulunmuştur. Bulunan bu uzunlukların ardından AFC ve ADC üçgenlerinin benzerlikleri kullanılarak AD uzunluğu yani eğrilik yarıçapı bulunmuştur. Böylece eğrilik değeri de bulunmuş olacaktır. Bulunan değerler neticesinde moment-eğrilik grafiklerinde düşey eksen moment değerini, yatay eksen ise o momente karşılık gelen eğrilik değerini göstermektedir [50].



Şekil 3.4. Kiriş numunelerinin eğriliklerinin belirlenmesi (Ünal A., 2016)

3.2. Deney Sonuçları

Deney sonuçları kapsamında bu bölümde numunelere ve deneylere ait görseller, grafikler (yük-orta nokta deplasman, toplam tüketilen enerji, moment-eğrilik ilişkisi, rijitlik ve süneklik) yer almaktadır. Her numune ayrı ayrı değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Ayrıca numunelere ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve grafikleri gösterilmiştir.

3.2.1. Referans-1 Deney Numunesi

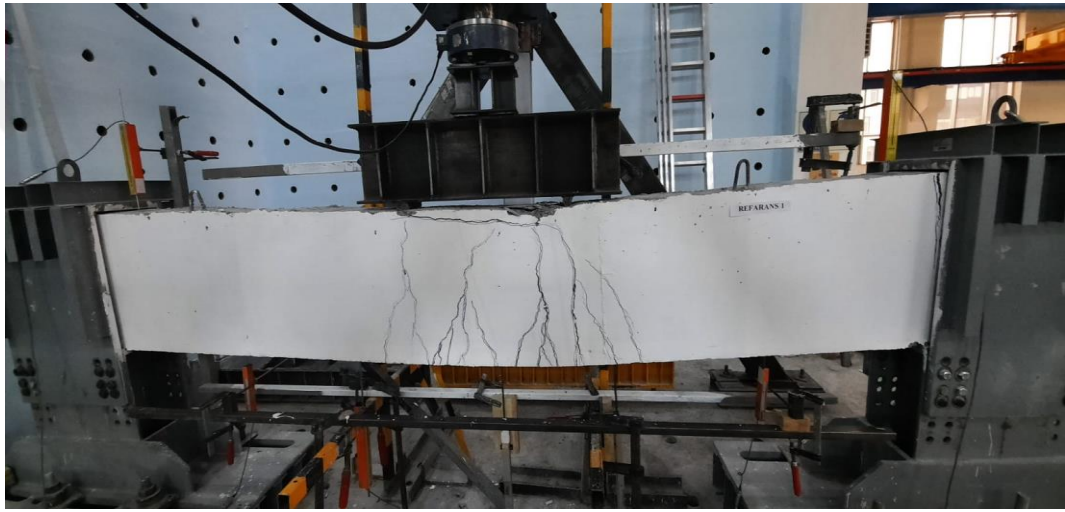
Kiriş deneylerinde ilk olarak deneye tabi tutulan numune boşluğun olmadığı ve boşluklu numunelerle karşılaştırma amacıyla üretilen referans-1 numunesidir. Referans numunesinde boşluk bulunmazken donatı dizaynı ise tüm numunelerde olduğu gibi çekme donatısı 3Ø14, basınç donatısı 2Ø12 ve kesme donatısı da Ø8/200/100 şeklindedir. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 3.5’ de gösterilmiştir.



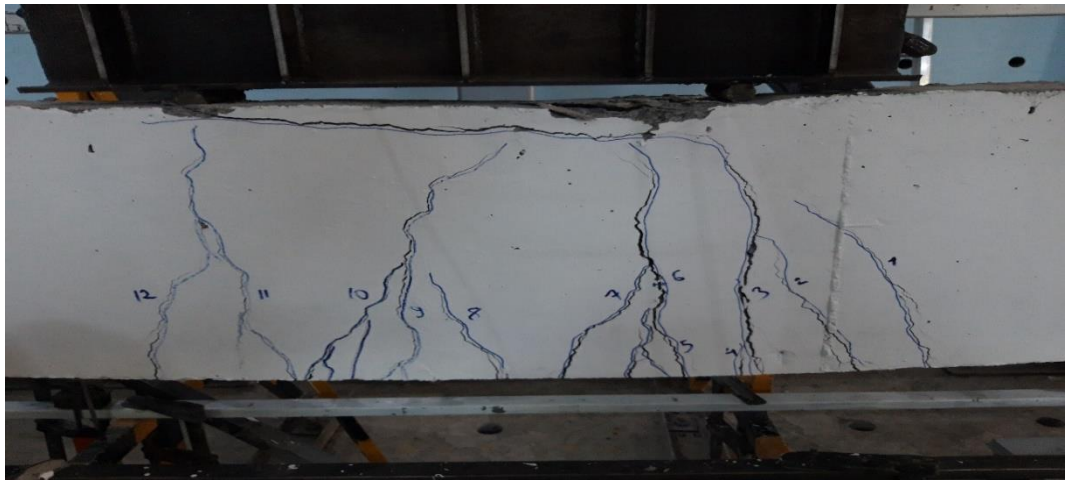
Şekil 3.5. R-1 numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlağı şeklinde görülmüştür. İlk çatlak 130 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeye bağlı olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. İkinci, üçüncü ve dördüncü çatlaklar 145 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Kiriş numunesinde akma değerine 277 kN seviye bölgesinde ulaşılmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 7,2 mm’dir. İlk geniş çatlak 210 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak ise 230 kN değerinde görülmüştür. Deney numunesinin yükleme

altında ulaştığı maksimum yük değeri 389,59 kN'dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 52,83 mm'dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü Şekil 3.6.'da gösterilmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

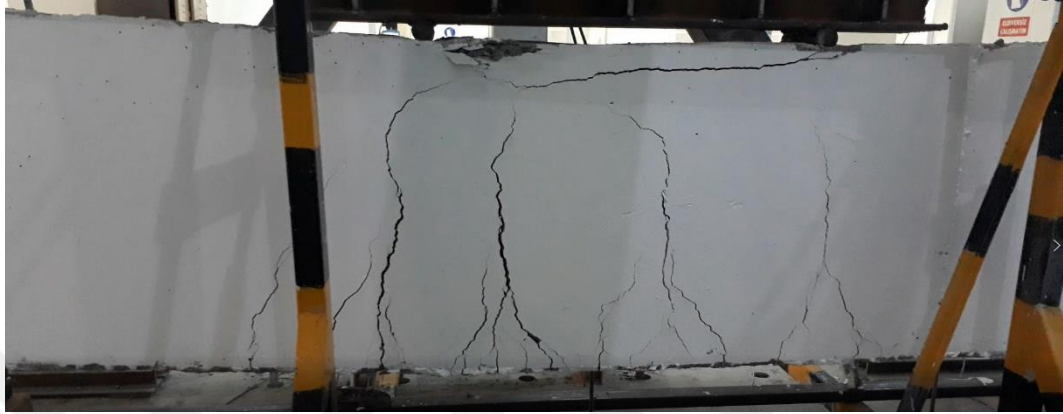


Şekil 3.6. R-1 numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 3.7. R-1 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi Şekil 3.8’ de gösterilmiştir. Çatlakların dağılımının simetrik bir dağılım olduğu gözlemlenmiştir.



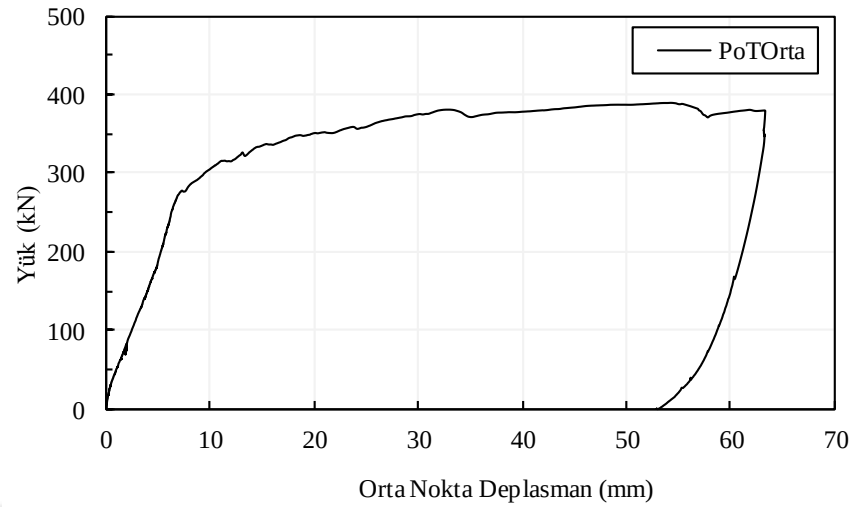
Şekil 3.8. R-1 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

Mesnet bölgesinde yükleme altında meydana gelen 45 derecelik kesme çatlakları Şekil 3.9’ da gösterilmiştir. Çatlak genişlikleri tüm kiriş boyunca maksimum 5 mm boyutlarına ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde kirişin alt noktalarında ve kesme bölgesinde kiriş üst noktalarında çatlak genişlikleri 5 mm değerlerindedir.



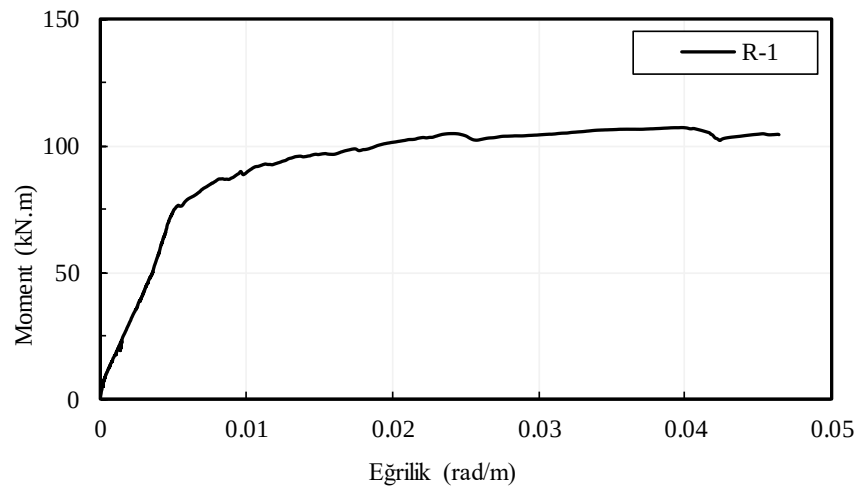
Şekil 3.9. Mesnet bölgesi kesme çatlakları

Kirişin yükleme yapılan basınç bölgesinde yüke bağlı olarak ezilme meydana gelmiş ve betonda dökülmeler gözlemlenmiştir. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan verilere göre elde edilen yük-orta nokta deplasman grafiği Şekil 3.10’ da gösterilmiştir. Diğer yük-deplasman grafikleri de Şekil 3.11’ da gösterilmiştir.

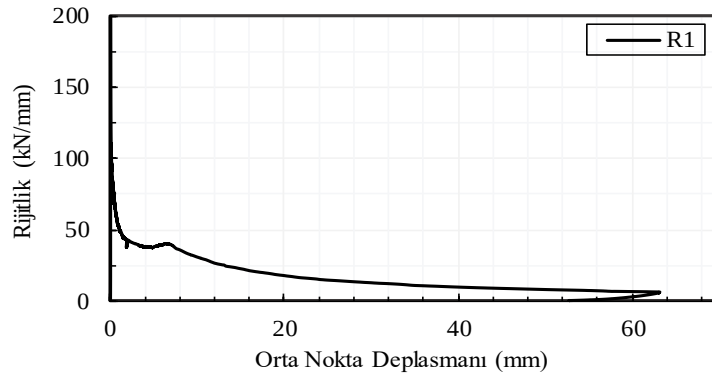


Şekil 3.10. R-1 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği

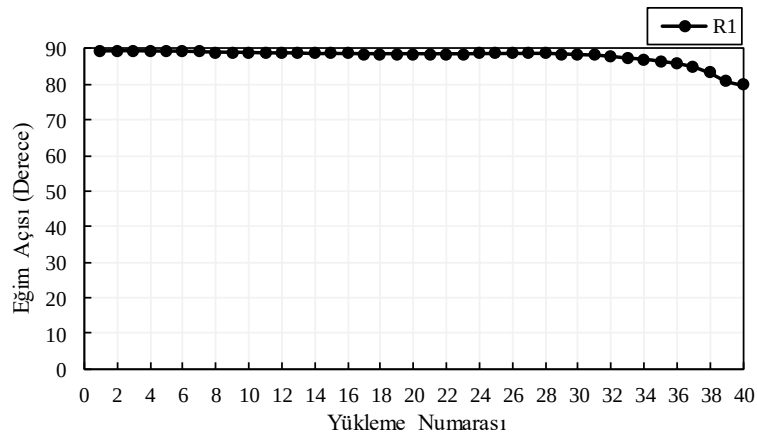
Yük-orta nokta deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak tüketilmiş enerji 23012.95 kNmm bulundu. Yük-orta deplasman grafiği değerlerinden elde edilen veriler doğrultusunda moment-eğrilik grafiği oluşturulmuş Şekil 3.11’ de gösterilmiştir. Yük-orta nokta grafiğindeki her bir yük değerinin o değere karşılık gelen deplasman değerine bölünerek elde edilen değerlerle oluşturulan rijitlik grafiği ise Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Rijitlik grafiğindeki rijitlik değerlerinden elde edilen ve yük-deplasman eğrisinin açısını ifade eden ve zamanla azalan eğim açısı grafiği Şekil 3.13’de gösterilmiştir. Momentin akma bölgesinden sonra sabit kalması grafiklerde ankastre mesnetlerin bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.11. R-1 numunesi moment-eğrilik grafiği

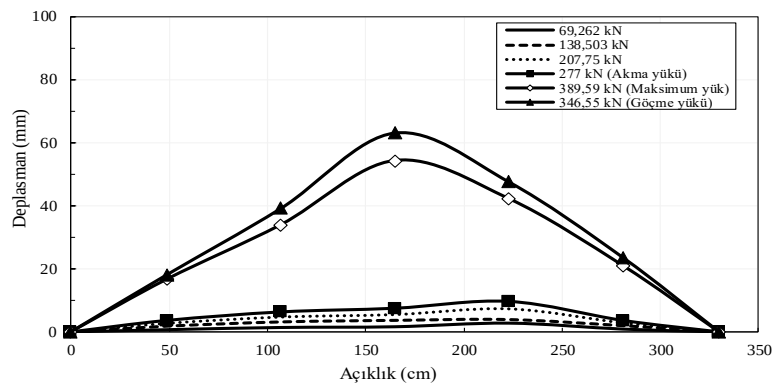


Şekil 3.12. R-1 numunesi rijitlik grafiği



Şekil 3.13. R-1 numunesi eğim açısı grafiği

Akma yüküne kadar dörtte bir oranda artarak ve akma yükünden sonra maksimum yük ve göçme yükü altında oluşan 7 deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrileri Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. R-1 numunesi deplasman eğrileri

3.2.2. Referans-2 Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde ikinci olarak deneye tabi tutulan numune, boşluğun olmadığı ve boşluklu numunelerle karşılaştırma amacıyla üretilen referans-2 numunesidir. R-2 numunesinde boşluk bulunmazken donatı dizaynı ise tüm numunelerde olduğu gibi aynıdır. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 3.15’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. R-2 numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlağı şeklinde görülmüştür. İlk çatlak 95 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeye bağlı olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. İkinci çatlak 108 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. 3. çatlak değeri 112 kN yük değerinde 4. Çatlak 121 kN değerinde görülmüştür. Bu çatlakların tamamı eğilme çatlaklarıdır. Kiriş numunesinde akma değerine 203 kN seviye bölgesinde ulaşılmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 17,3 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 184 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak ise 195 kN değerinde belirmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 352,41 kN’dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 157,5 mm’dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde meydana gelmiş ve çatlakların büyük çoğunluğunun simetrik bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Yükün uygulandığı basınç bölgesinde ezilmeler meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Deney numunesinin

maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü Şekil 3.16.'da gösterilmiştir. Çatlaklar belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali Şekil 3.17'de gösterilirken Şekil 3.18' de çatlakların ölçülmesi gösterilmektedir.



Şekil 3.16. R-2 numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 3.17. R-2 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları



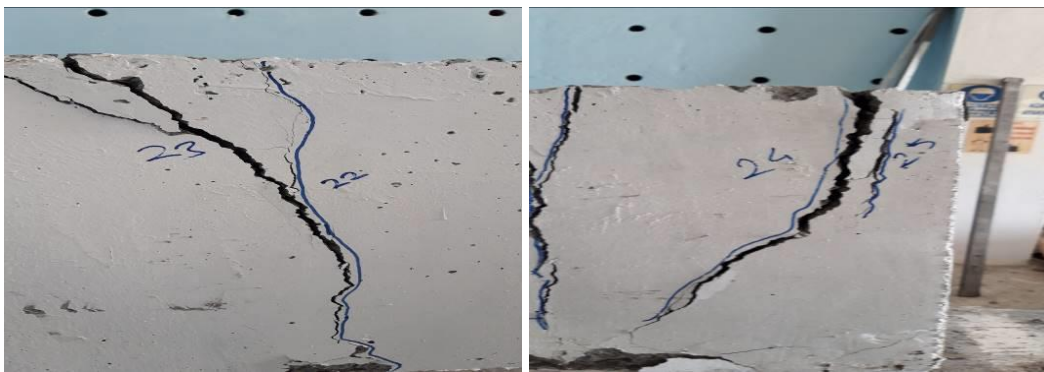
Şekil 3.18. R-2 numunesinin çatlaklarının ölçülmesi

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi Şekil 3.19’ da gösterilmiştir. Çatlakların dağılımının tam simetrik bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir.



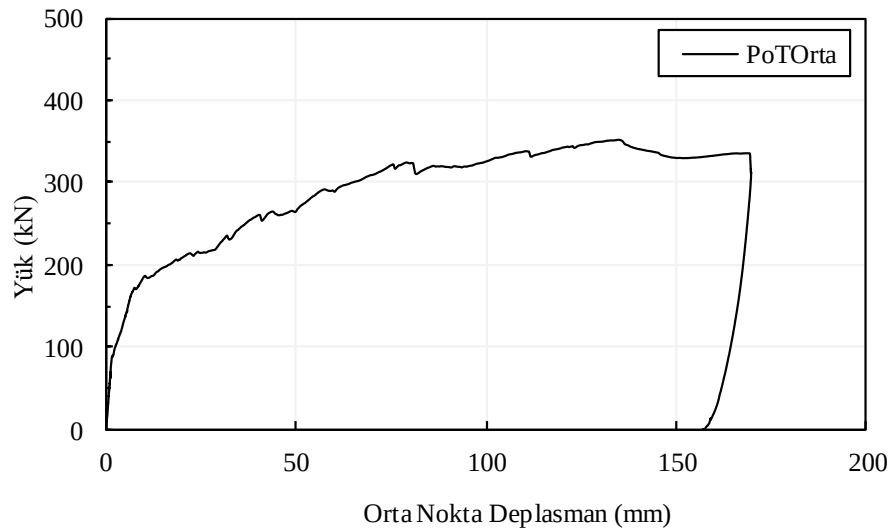
Şekil 3.19. R-2 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

Mesnet bölgesinde yükleme altında meydana gelen 45 derecelik kesme çatlakları Şekil 3.20’ de gösterilmiştir. Çatlak genişlikleri tüm kiriş boyunca maksimum 10 mm boyutlarına ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde kirişin alt noktalarında çatlak kalınlıkları 10 mm seviyelerindedir. Mesnet bölgesinde oluşan kesme çatlakları da 10 mm kalınlıklara ulaşmıştır (Şekil 3.22).



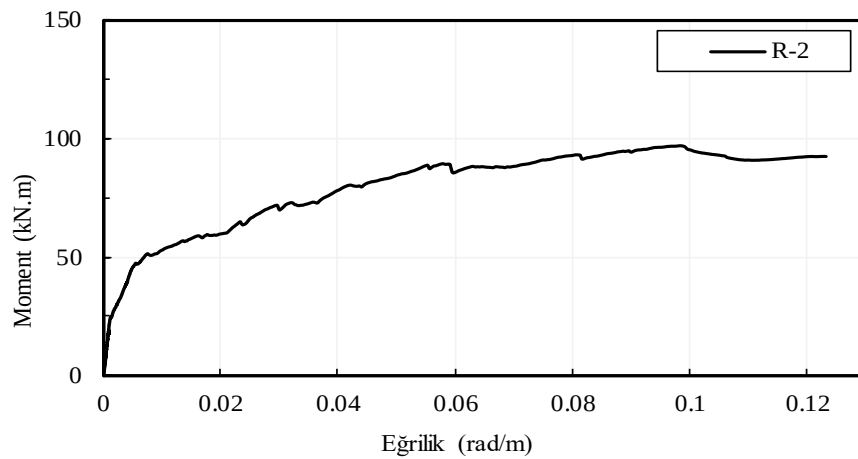
Şekil 3.20. Mesnet bölgesi kesme çatlakları

Kirişin yükleme yapılan basınç bölgesinde yüke bağlı olarak ezilme meydana gelmiş ve betonda dökülmeler gözlemlenmiştir. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan verilere göre elde edilen yük-orta nokta deplasman grafiği Şekil 3.21’ de gösterilmiştir.

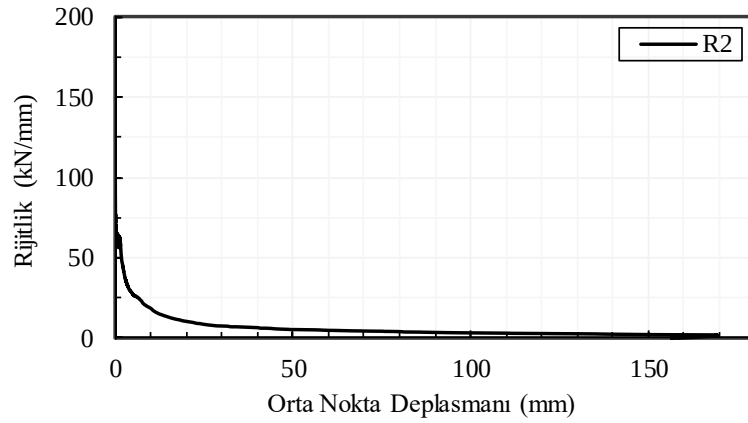


Şekil 3.21. R-2 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği

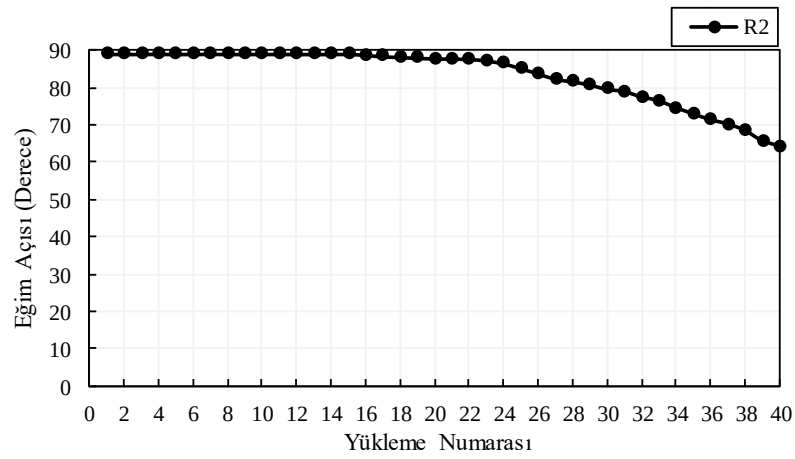
Yük-orta deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak tüketilmiş enerji 50834.34 kNmm bulundu. Yük-orta nokta deplasman grafiği değerlerinden elde edilen veriler doğrultusunda moment-eğrilik grafiği oluşturulmuş Şekil 3.22’ de gösterilmiştir. Yük-orta nokta grafiğindeki her bir yük değerinin o değere karşılık gelen deplasman değerine bölünerek elde edilen değerlerle oluşturulan rijitlik grafiği ise Şekil 3.23’da gösterilmiştir. Rijitlik grafiğindeki rijitlik değerlerinden elde edilen ve yük-deplasman eğrisinin açısını ifade eden ve zamanla azalan eğim açısı grafiği Şekil 3.24’de gösterilmiştir. Momentin akma bölgesinden sonra sabit kalması grafiklerde ankastre mesnetlerin bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.22. R-2 numunesi moment-eğrilik grafiği

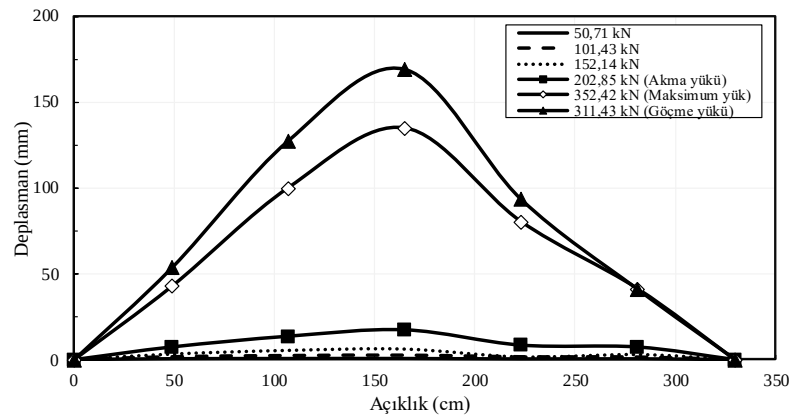


Şekil 3.23. R-2 numunesi rijitlik grafiği



Şekil 3.24. R-2 numunesi eğim açısı grafiği

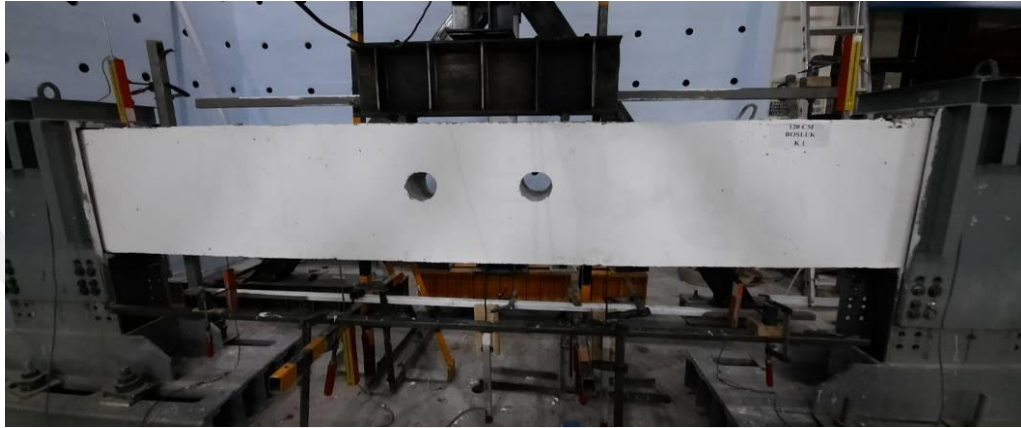
Akma yüküne kadar dörtte bir oranda yük artarak ve akma yükünden sonra maksimum yük ve göçme yükü altında oluşan 7 deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrileri Şekil 3.25’de gösterilmiştir.



Şekil 3.25. R-2 numunesi deplasman eğrileri

3.2.3. K1 Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 3. olarak deneye tabi tutulan numune boşluğun kiriş yüksekliğinin %20 oranında olduğu 120 mm çapındaki K-1 numunesidir. Boşluklu K-1 numunesinde donatı dizaynı ise tüm numunelerde olduğu gibi benzerdir. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü Şekil 3.26’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.26. K-1 numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlağı şeklinde görülmüştür. İlk çatlak 135 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeye bağlı olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde yoğunlaşan çatlaklar sağ boşluk çevresinden basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. 2. çatlak 142 kN yük değerinde 3. çatlak 146 kN değerinde gözlemlenmiştir. 4, 5 ve 6. Çatlak değerinde 170 kN seviyelerinde gözlemlenmiştir. Kiriş numunesinde akma değeri 221,4 kN seviye değerlerinde ulaşmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 12,16 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 225 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak ise 250 kN değerinde belirmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 412,8 kN’dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 110,17 mm’dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde sağ boşluk çevrelerinde meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü Şekil 3.27.’de gösterilmiştir. Çatlaklar belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Basınç

bölgesinde betonda ciddi ezilmeler meydana gelirken çekme bölgesinde çatlaklar kesitin zayıf olduğu boşluğa doğru yönelmişlerdir. Çatlakların numaralandırılmış hali Şekil 3.28’de gösterilirken hasar dağılımı da Şekil 3.29’da gösterilmiştir.



Şekil 3.27. K-1 numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 3.28. K-1 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları



Şekil 3.29. K-1 numunesinin hasar dağılımı

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi Şekil 3.30’ da gösterilmiştir. Çatlakların dağılımının görüntüden de görüleceği gibi asimetrik olarak sol boşluğun çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.



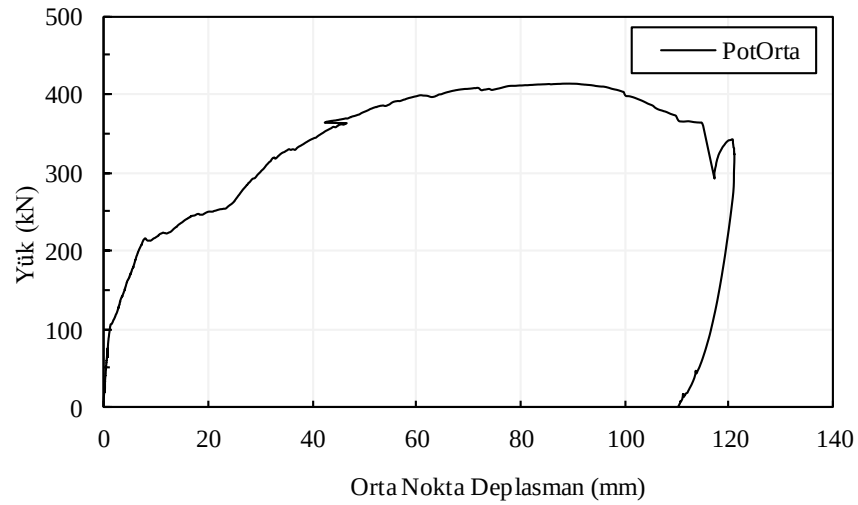
Şekil 3.30. K-1 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

Mesnet bölgesinde yükleme altında meydana gelen 45 derecelik kesme çatlakları Şekil 3.31’ de gösterilmiştir. Çatlak genişlikleri tüm kiriş boyunca maksimum 12-13 mm boyutlarına ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde kirişin alt noktalarında 10-12 mm kalınlığında çatlaklar oluşurken mesnet bölgesinde oluşan kesme çatlakları 15 mm’yi bulmuştur ve mesnet alt bölgelerinde betonda dökülmeler ve ayrılmalar meydana gelmiştir.



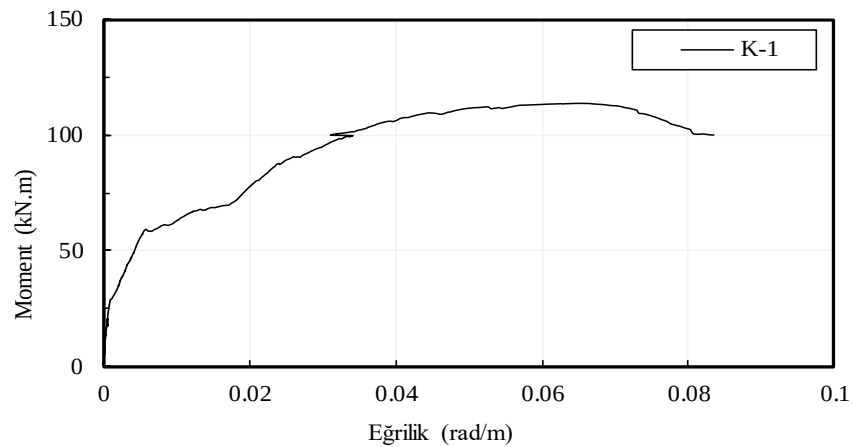
Şekil 3.31. Mesnet bölgesi kesme çatlakları

Kirişin yükleme yapılan basınç bölgesinde yüke bağlı olarak ezilme meydana gelmiş ve betonda dökülmeler gözlemlenmiştir. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan verilere göre elde edilen yük-orta nokta deplasman grafiği Şekil 3.32’ de gösterilmiştir.

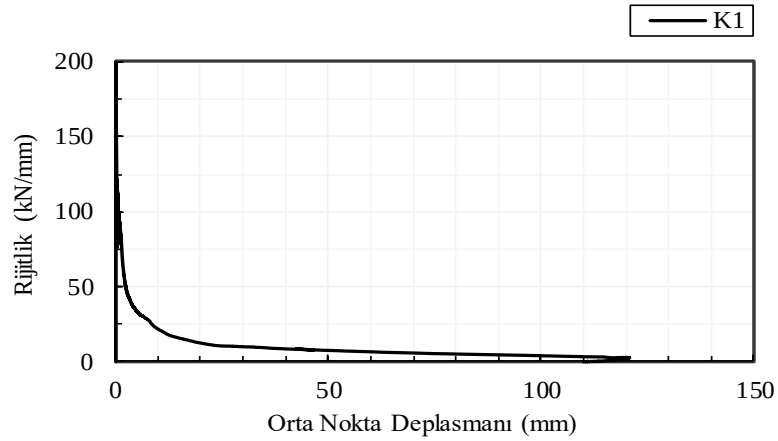


Şekil 3.32. K-1 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği

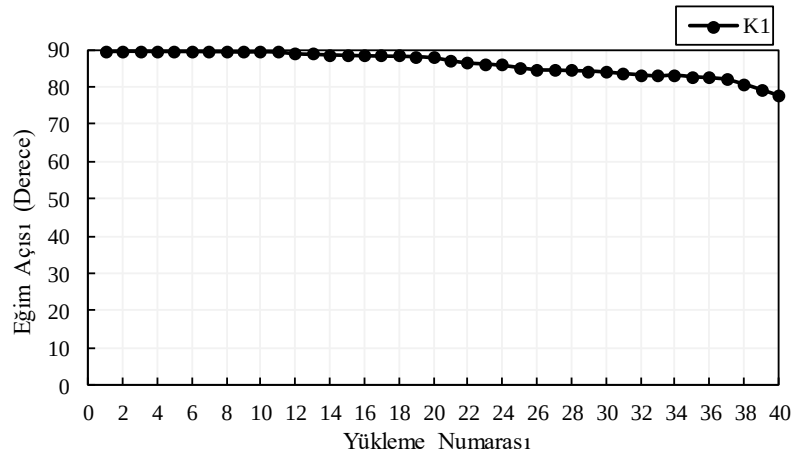
Yük-orta nokta deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak tüketilmiş enerji 45462.28 kNmm bulundu. Yük-orta nokta deplasman grafiği değerlerinden elde edilen veriler doğrultusunda moment-eğrilik grafiği oluşturulmuş Şekil 3.33' de gösterilmiştir. Yük-orta nokta deplasman grafiğindeki her bir yük değerinin o değere karşılık gelen deplasman değerine bölünerek elde edilen değerlerle oluşturulan rijitlik grafiği ise Şekil 3.34'de gösterilmiştir. Rijitlik grafiğindeki rijitlik değerlerinden elde edilen ve yük-deplasman eğrisinin açısını ifade eden ve zamanla azalan eğim açısı grafiği Şekil 3.35'de gösterilmiştir. Momentin akma bölgesinden sonra sabit kalması grafiklerde ankastre mesnetlerin bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.33. K-1 numunesi moment-eğrilik grafiği

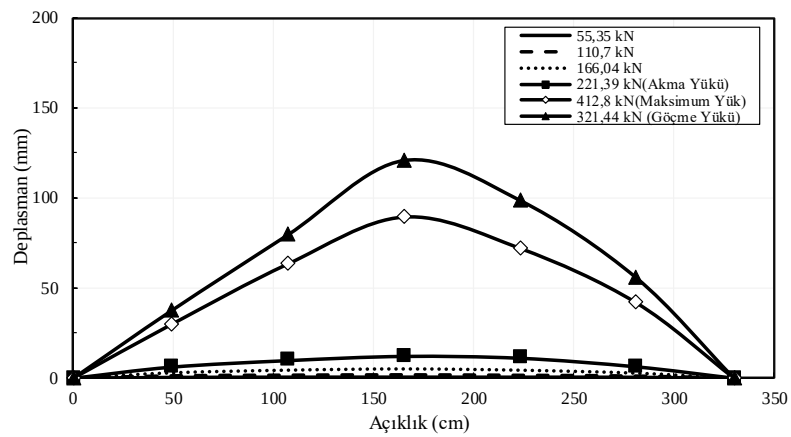


Şekil 3.34. K-1 numunesi rijitlik grafiği



Şekil 3.35. K-1 numunesi eğim açısı grafiği

Akma yüküne kadar dörtte bir oranda artarak ve akma yükünden sonra maksimum yük ve göçme yükü altında oluşan 7 deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrileri Şekil 3.36’da gösterilmiştir.



Şekil 3.36. K-1 numunesi deplasman eğrileri

3.2.4. K2 Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 4. olarak deneye tabi tutulan numune boşluğun kiriş yüksekliğinin %20 oranında olduğu 120 mm çapındaki K-2 numunesidir. Boşluklu K-2 numunesinde donatı dizaynı ise tüm numunelerde olduğu gibi benzerdir. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 3.37’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.37. K-2 numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde görülmüştür. İlk çatlak 135 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeye bağlı olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. İkinci ve üçüncü çatlaklar 138 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Kiriş numunesinde akma değeri 223 kN seviye değerinde ulaşmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 7,11 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 245 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak ise 300 kN değerinde belirmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 402,1 kN’dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 127,57 mm’dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde sağ boşluk çevresinde meydana gelmiştir. Sağ boşluğun üst kısmında basınç bölgesinde betonda ezilme ve kopmalar meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde 45 derecelik kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Çatlaklar asimetrik olarak sağ boşluğun bulunduğu bölgede yoğunlaşmıştır. Sağ boşluğun alt kısmında çatlakların çok fazla genişlemesiyle betonda kopma ve

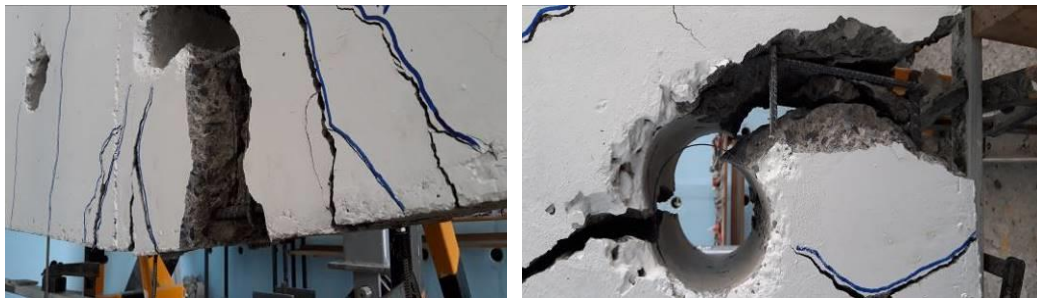
ayrılmalar meydana gelmiştir. Basınç bölgesinde betonda ciddi ezilmeler meydana gelirken çekme bölgesinde çatlaklar kesitin zayıf olduğu boşluğa doğru yönelmişlerdir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü Şekil 3.38.'de gösterilmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali Şekil 3.39'da gösterilirken hasar dağılımı da Şekil 3.40'da gösterilmiştir.



Şekil 3.38. K-2 numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 3.39. K-2 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları



Şekil 3.40. K-2 numunesinin hasar dağılımı

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi Şekil 3.41’de gösterilmiştir. Çatlakların dağılımının asimetrik bir dağılım olduğu ve tek boşluğun çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.



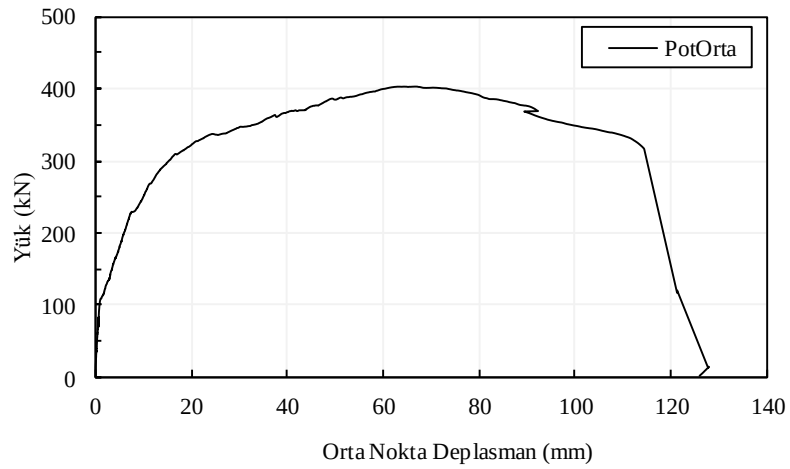
Şekil 3.41. K-2 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

Mesnet bölgesinde yükleme altında meydana gelen 45 derecelik kesme çatlakları Şekil 3.42’ de gösterilmiştir. Çatlak genişlikleri tüm kiriş boyunca maksimum 10-12 mm boyutlarına ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde kirişin alt noktalarında çatlak genişlikleri 10-12 mm değerlerine ulaşırken ve kesme bölgesinde kiriş üst noktalarında 45 derecelik çatlak genişlikleri 10 mm değerlerindedir.



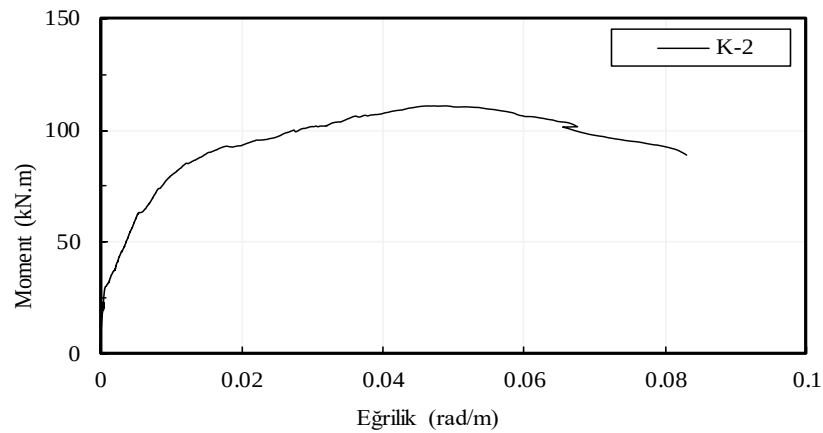
Şekil 3.42. Mesnet bölgesi kesme çatlakları

Kirişin yükleme yapılan basınç bölgesinde yüke bağlı olarak ezilme meydana gelmiş ve betonda dökülmeler gözlemlenmiştir. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan verilere göre elde edilen yük-orta nokta deplasman grafiği Şekil 3.43’de gösterilmiştir.

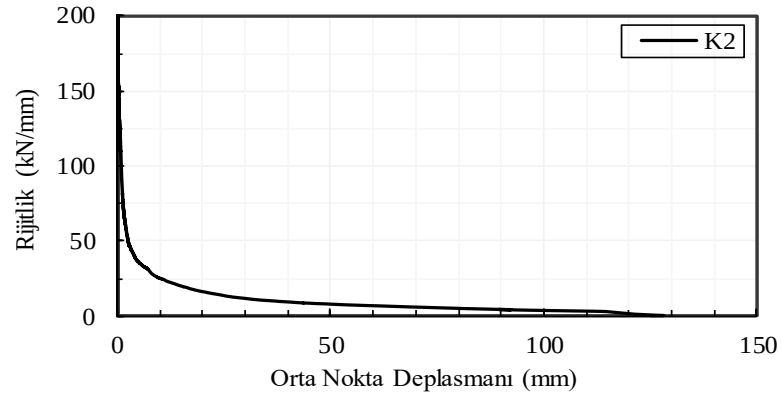


Şekil 3.43. K-2 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği

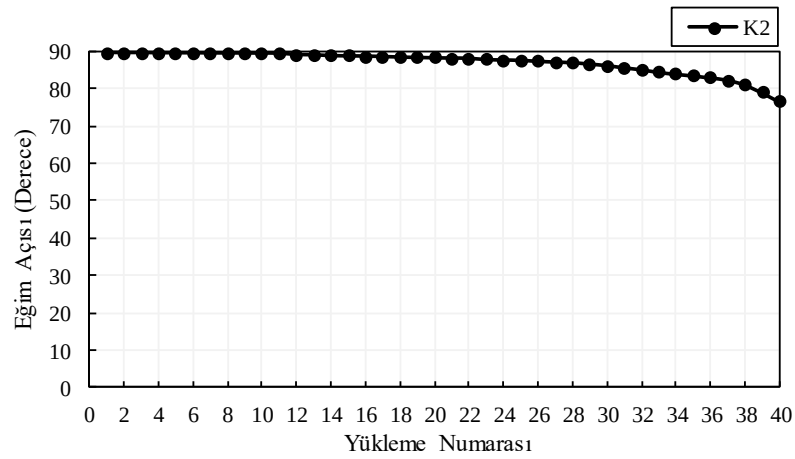
Yük-orta deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak tüketilmiş enerji 43695.5 kNmm bulundu. Yük-orta nokta deplasman değerlerinden elde edilen veriler doğrultusunda moment-eğrilik grafiği oluşturulmuş Şekil 3.44’ de gösterilmiştir. Yük-orta nokta deplasman grafiğindeki her bir yük değerinin o değere karşılık gelen deplasman değerine bölünerek elde edilen değerlerle oluşturulan rijitlik grafiği ise Şekil 3.45’de gösterilmiştir. Rijitlik grafiğindeki rijitlik değerlerinden elde edilen ve yük-deplasman eğrisinin açısını ifade eden ve zamanla azalan eğim açısı grafiği Şekil 3.46’da gösterilmiştir. Momentin akma bölgesinden sonra sabit kalması grafiklerde ankastre mesnetlerin bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.44. K-2 numunesi moment-eğrilik grafiği

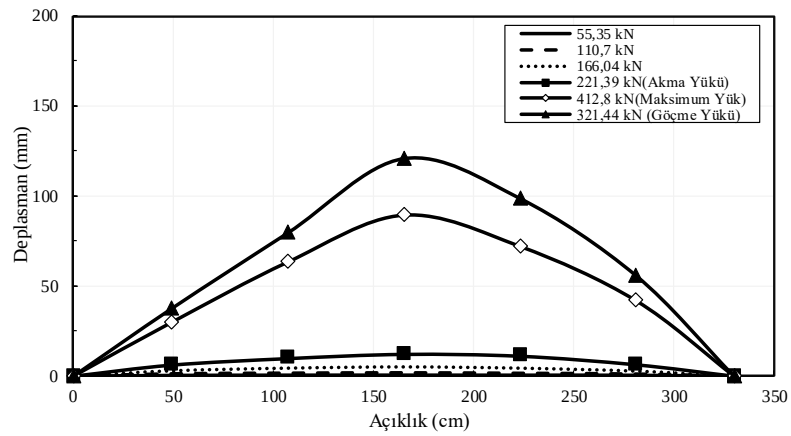


Şekil 3.45. K-2 numunesi rijitlik grafiği



Şekil 3.46. K-2 numunesi eğim açısı grafiği

Akma yüküne kadar dörtte bir oranda artarak ve akma yükünden sonra maksimum yük ve göçme yükü altında oluşan 7 deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrileri Şekil 3.47’de gösterilmiştir.



Şekil 3.47. K-2 numunesi deplasman eğrileri

3.2.5. K3 Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 5. olarak deneye tabi tutulan numune boşluğun kiriş yüksekliğinin %40 oranında olduğu 240 mm çapındaki K-3 numunesidir. Boşluklu K-3 numunesinde donatı dizaynı ise tüm numunelerde olduğu gibi benzerdir. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 3.48’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.48. K-3 Numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlağı şeklinde görülmüştür. İlk çatlak 133 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeyle ilgili olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. İkinci, üçüncü ve dördüncü çatlaklar 155 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Kiriş numunesinde akma değeri 203 kN seviye bölgesinde ulaşmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 7,62 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 224 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci ve üçüncü geniş çatlak ise 248 kN değerinde belirmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 405,2 kN’dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 132,6 mm’dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde nispeten sağ boşluk bölgesinde daha yoğun olarak meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde 45 derecelik kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü Şekil 3.49.’da gösterilmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not

edilmiştir. Basınç bölgesinde betonda ciddi ezilmeler meydana gelirken çekme bölgesi etrafında çatlaklar kesitin zayıf olduğu boşluğa doğru yönelmişlerdir. Basınç bölgesinde burkulma meydana gelmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali Şekil 3.50’de gösterilirken hasar dağılımı da Şekil 3.51’de gösterilmiştir.



Şekil 3.49. K-3 Numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 3.50. K-3 Numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları



Şekil 3.51. K-3 Numunesinin hasar dağılımı

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi Şekil 3.52’ de gösterilmiştir. Çatlakların dağılımının asimetrik bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir.



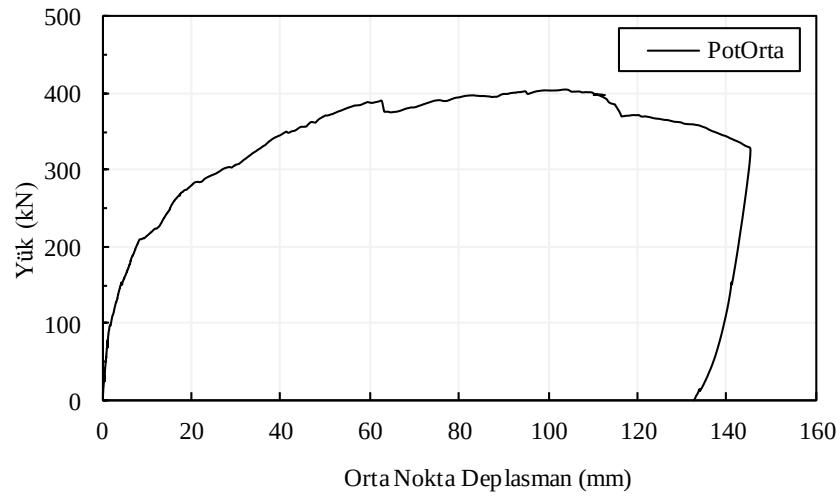
Şekil 3.52. K-3 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

Mesnet bölgesinde yükleme altında meydana gelen 45 derecelik kesme çatlakları Şekil 3.53’ de gösterilmiştir. Çatlak genişlikleri tüm kiriş boyunca maksimum 12-13 mm boyutlarına ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde kirişin alt noktalarında 12-13 mm iken kesme bölgesinde kiriş üst noktalarında 45 derecelik çatlak genişlikleri 4 mm değerlerindedir.



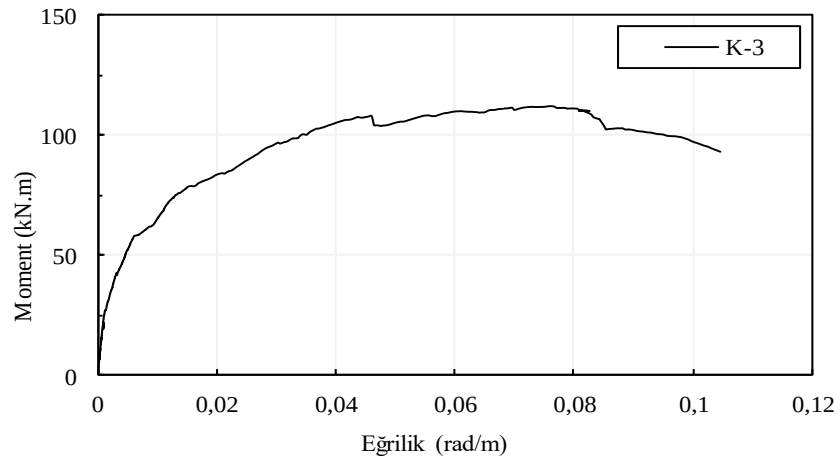
Şekil 3.53. Mesnet bölgesi kesme çatlakları

Kirişin yükleme yapılan basınç bölgesinde yüke bağlı olarak ezilme meydana gelmiş ve betonda dökülmeler gözlemlenmiştir. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan verilere göre elde edilen yük-orta nokta deplasman grafiği Şekil 3.54’ de gösterilmiştir.

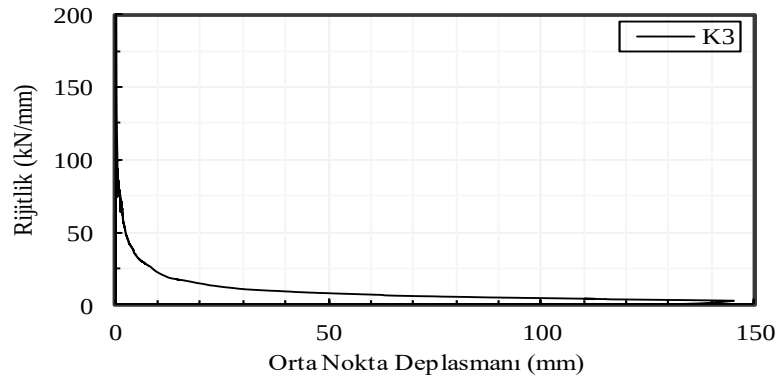


Şekil 3.54. K-3 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği

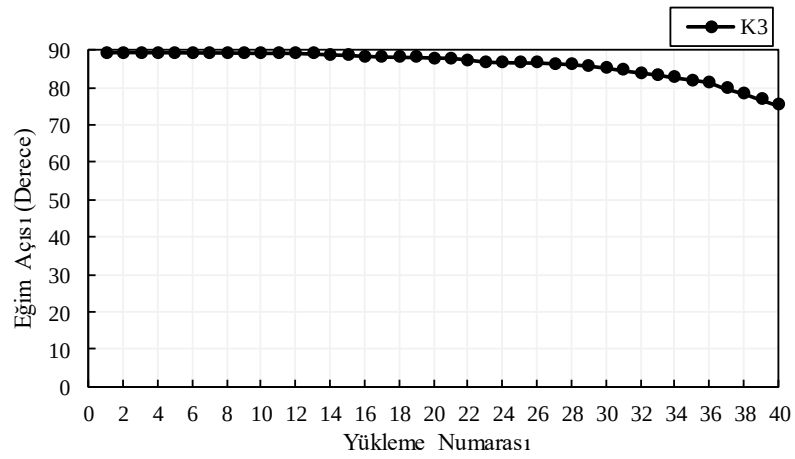
Yük-orta deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak tüketilmiş enerji 53658.57 kNmm bulundu. Yük-orta deplasman değerlerinden elde edilen veriler doğrultusunda moment-eğrilik grafiği oluşturulmuş Şekil 3.55’ de gösterilmiştir. Yük-orta nokta grafiğindeki her bir yük değerinin o değere karşılık gelen deplasman değerine bölünerek elde edilen değerlerle oluşturulan rijitlik grafiği ise Şekil 3.56’da gösterilmiştir. Rijitlik grafiğindeki rijitlik değerlerinden elde edilen ve yük-deplasman eğrisinin açısını ifade eden ve zamanla azalan eğim açısı grafiği Şekil 3.57’de gösterilmiştir. Momentin akma bölgesinden sonra sabit kalması grafiklerde ankastre mesnetlerin bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.55. K-3 numunesi moment-eğrilik grafiği

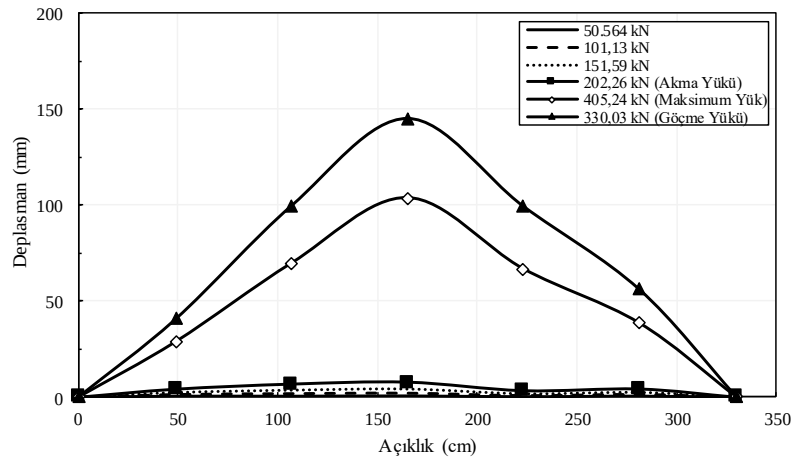


Şekil 3.56. K-3 numunesi rijitlik grafiği



Şekil 3.57. K-3 numunesi eğim açısı grafiği

Akma yüküne kadar dörtte bir oranda artarak ve akma yükünden sonra maksimum yük ve göçme yükü altında oluşan 7 deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrileri Şekil 3.58’de gösterilmiştir.



Şekil 3.58. K-3 numunesi deplasman eğrileri

3.2.6. K4 Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 6. olarak deneye tabi tutulan numune boşluğun kiriş yüksekliğinin %40 oranında olduğu 240 mm çapındaki K-4 numunesidir. Boşluklu K-4 numunesinde donatı dizaynı ise tüm numunelerde olduğu gibi benzerdir. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 3.59’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.59. K-4 numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlağı şeklinde görülmüştür. İlk çatlak 130 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeye bağlı olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. İkinci, üçüncü ve dördüncü çatlaklar 143 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Kiriş numunesinde akma değeri 261 kN seviye bölgesinde ulaşmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 8,67 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 280 kN yük değerinde gözlemlenirken 2,3,4, 5. geniş çatlaklar ise 300 kN değerlerinde belirleşmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 435,8 kN’dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 92,5 mm’dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde simetrik olarak meydana gelmiştir. Yüklemenin yapıldığı basınç bölgesinde betonda ezilmeler meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü Şekil 3.60.’da gösterilmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Mesnetlerde mekanizma meydana

gelmemiştir. Basınç bölgesinde betonda ciddi ezilmeler meydana gelirken çekme bölgesinde çatlaklar kesitin zayıf olduğu boşluğa doğru yönelmişlerdir. Çatlakların numaralandırılmış hali Şekil 3.61’de gösterilirken hasar dağılımı da Şekil 3.62’de gösterilmiştir.



Şekil 3.60. K-4 numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 3.61. K-4 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları



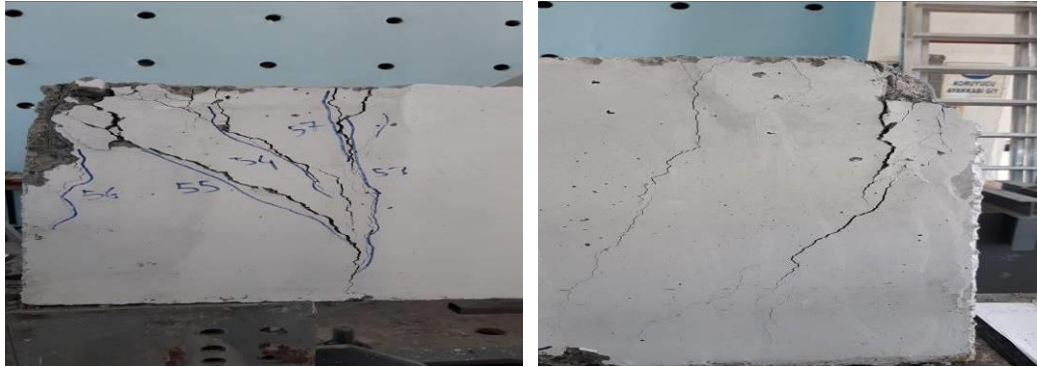
Şekil 3.62. K-4 numunesinin hasar dağılımı

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi Şekil 3.63’ de gösterilmiştir. Çatlakların dağılımının simetrik bir dağılım olduğu gözlemlenmiştir.



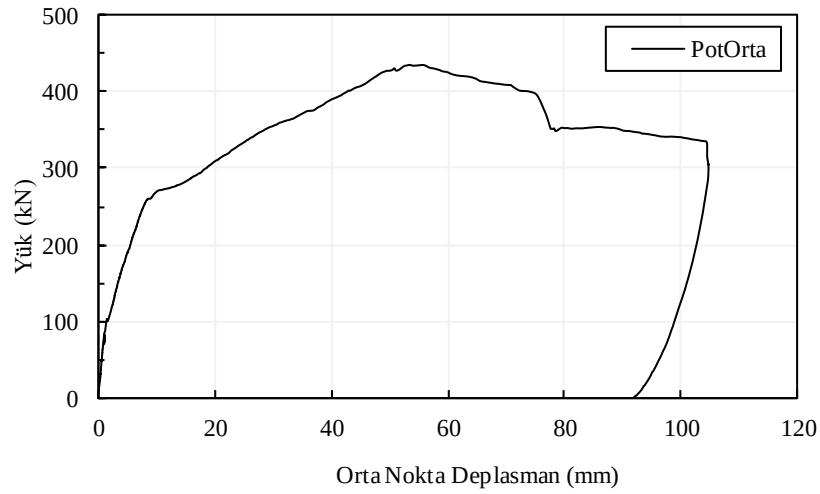
Şekil 3.63. K-4 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

Mesnet bölgesinde yükleme altında meydana gelen 45 derecelik kesme çatlakları Şekil 3.64’ de gösterilmiştir. Çatlak genişlikleri tüm kiriş boyunca maksimum 5 mm boyutlarına ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde kirişin alt noktalarında çatlak genişliği 5 mm değerlerinde iken mesnet bölgesinde kiriş üst noktalarında oluşan kesme çatlak genişlikleri maksimum 3 mm değerlerindedir.



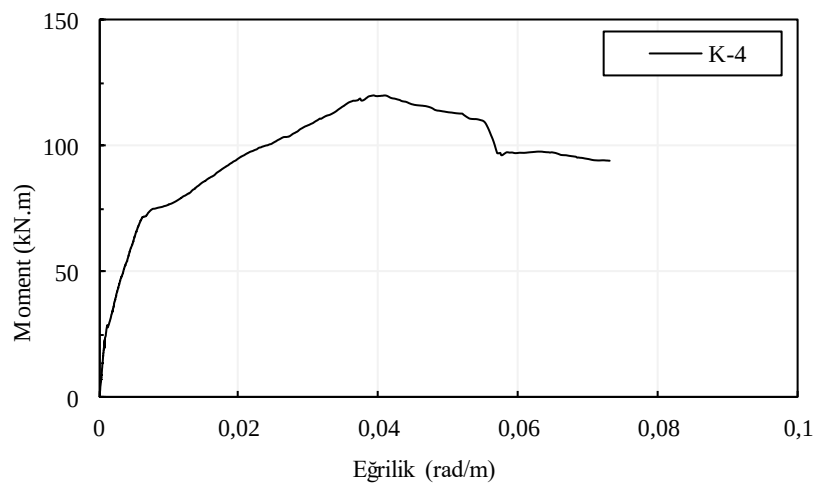
Şekil 3.64. Mesnet bölgesi kesme çatlakları

Kirişin yükleme yapılan basınç bölgesinde yüke bağlı olarak ezilme meydana gelmiş ve betonda dökülmeler gözlemlenmiştir. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan verilere göre elde edilen yük-orta nokta deplasman grafiği Şekil 3.65’ de gösterilmiştir.

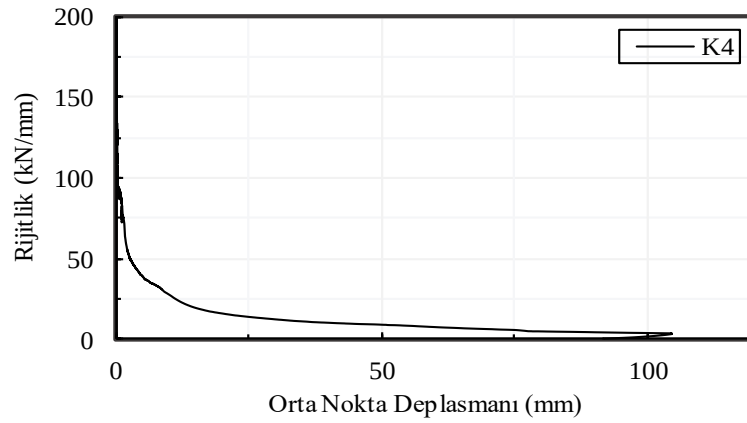


Şekil 3.65. K-4 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği

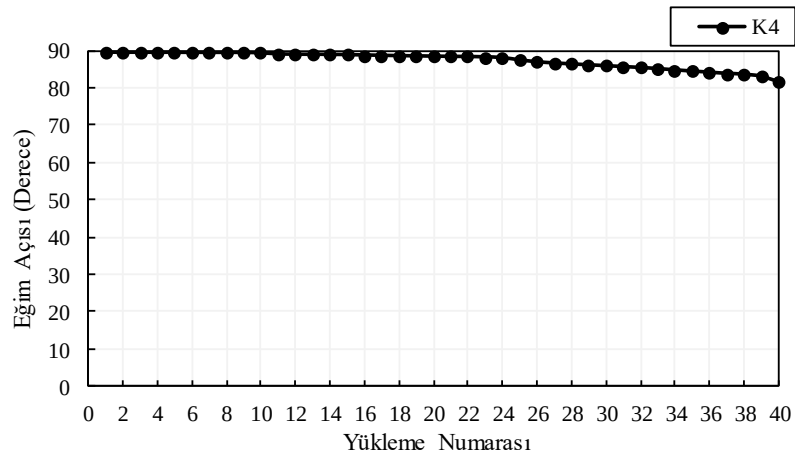
Yük-orta nokta eğrisinin altında kalan hesaplanarak tüketilmiş enerji 38149,80 kNmm bulundu. Yük-orta nokta deplasman değerlerinden elde edilen veriler doğrultusunda moment-eğrilik grafiği oluşturulmuş Şekil 3.66’ da gösterilmiştir. Yük-orta nokta deplasman grafiğindeki her bir yük değerinin o değere karşılık gelen deplasman değerine bölünerek elde edilen değerlerle oluşturulan rijitlik grafiği ise Şekil 3.67’de gösterilmiştir. Rijitlik grafiğindeki rijitlik değerlerinden elde edilen ve yük-deplasman eğrisinin açısını ifade eden ve zamanla azalan eğim açısı grafiği Şekil 3.68’de gösterilmiştir. Momentin akma bölgesinden sonra sabit kalması grafiklerde ankastre mesnetlerin bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.66. K-4 numunesi moment-eğrilik grafiği

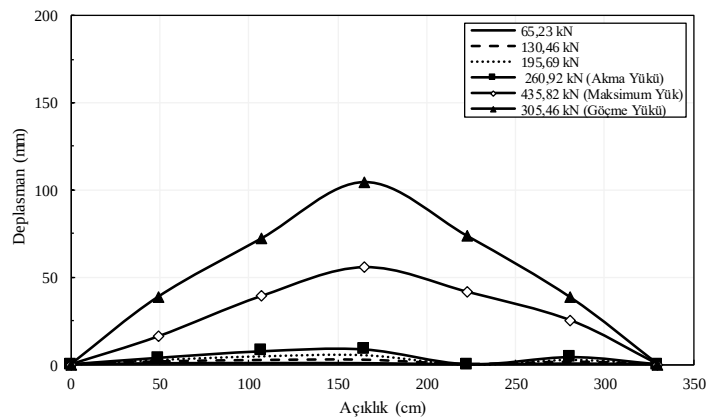


Şekil 3.67. K-4 numunesi rijitlik grafiği



Şekil 3.68. K-4 numunesi eğim açısı grafiği

Akma yüküne kadar dörtte bir oranda artarak ve akma yükünden sonra maksimum yük ve göçme yükü altında oluşan 7 deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrileri Şekil 3.69’da gösterilmiştir.



Şekil 3.69. K-4 numunesi deplasman eğrileri

3.2.7. K5 Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 7. olarak deneye tabi tutulan numune boşluğun kiriş yüksekliğinin %60 oranında olduğu 360 mm çapındaki K-5 numunesidir. Boşluklu K-5 numunesinde donatı dizaynı ise tüm numunelerde olduğu gibi benzerdir. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 3.70’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.70. K-5 numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde görülmüştür. İlk çatlak 130 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeye bağlı olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. İkinci, üçüncü çatlaklar 157 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Kiriş numunesinde akma değeri 223,7 kN seviye bölgesinde ulaşmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 8 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 230 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak ise 242 kN değerinde belirmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 369,16 kN’dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 83,22 mm’dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde asimetrik olarak meydana gelmiştir. Yüklemin yapıldığı basınç bölgesinde betonda ezilme ve dökülmeler meydana gelirken basınç donatısında da burkulma meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü Şekil 3.71.’de gösterilmiştir. Basınç bölgesinde ciddi

ezilmeler meydana gelirken çekme bölgesinde çatlakları kesitin zayıf olduğu boşluğa doğru yönelmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali Şekil 3.72’de gösterilirken hasar dağılımı da Şekil 3.73’de gösterilmiştir.



Şekil 3.71. K-5 numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 3.72. K-5 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları



Şekil 3.73. K-5 numunesinin hasar dağılımı, donatı burkulması

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi Şekil 3.74’ de gösterilmiştir. Çatlakların dağılımının asimetrik bir dağılım olduğu gözlemlenmiştir.



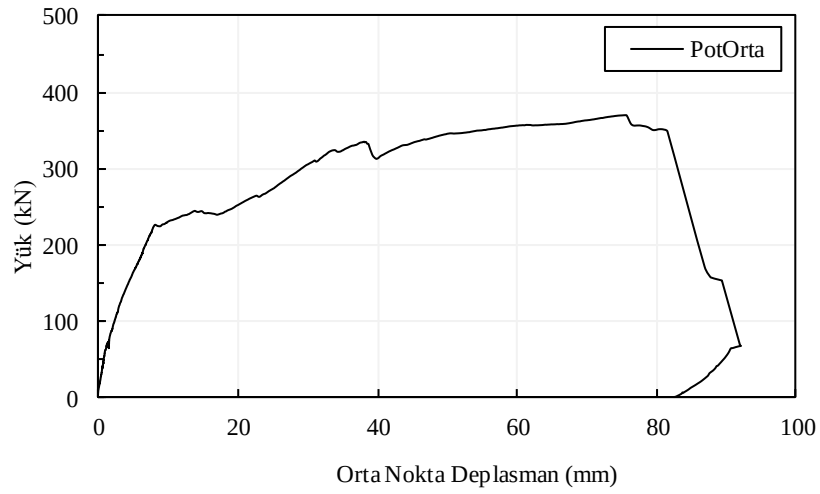
Şekil 3.74. K-5 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

Mesnet bölgesinde yükleme altında meydana gelen 45 derecelik kesme çatlakları Şekil 3.87’ de gösterilmiştir. Çatlak genişlikleri tüm kiriş boyunca maksimum 5-6 mm boyutlarına ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde kirişin alt noktalarında çatlak genişliği maksimum 4-5 mm iken mesnet bölgesinde kiriş üst noktalarında kesme çatlak genişlikleri maksimum 5 mm değerlerindedir.



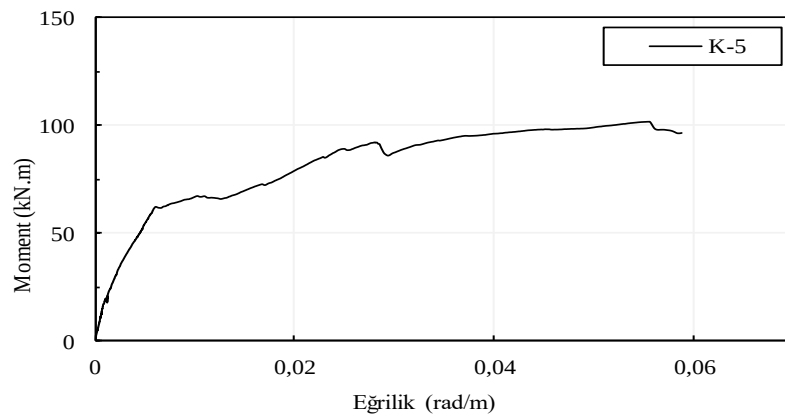
Şekil 3.75. Mesnet bölgesi kesme çatlakları

Kirişin yükleme yapılan basınç bölgesinde yüke bağlı olarak ezilme meydana gelmiş ve betonda dökülmeler gözlemlenmiştir. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan verilere göre elde edilen yük-orta nokta deplasman grafiği Şekil 3.76’ da gösterilmiştir.

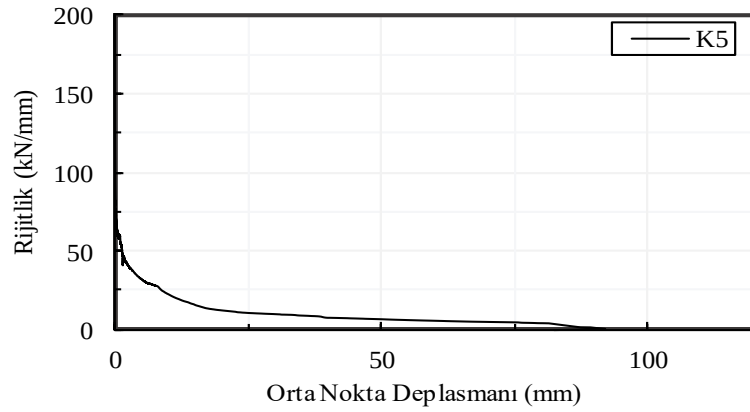


Şekil 3.76. K-5 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği

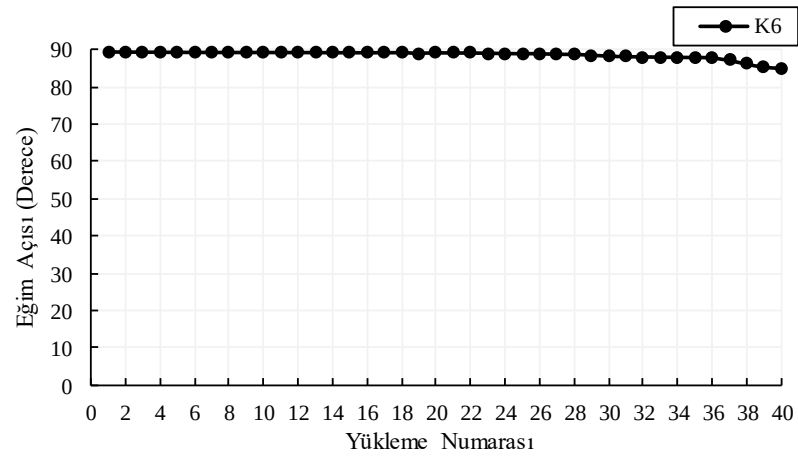
Yük-orta nokta deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak tüketilmiş enerji 26898.17 kNmm bulundu. Yük- orta nokta deplasman değerlerinden elde edilen veriler doğrultusunda moment-eğrilik grafiği oluşturulmuş Şekil 3.77’ de gösterilmiştir. Yük-orta nokta deplasman grafiğindeki her bir yük değerinin o değere karşılık gelen deplasman değerine bölünerek elde edilen değerlerle oluşturulan rijitlik grafiği ise Şekil 3.78’de gösterilmiştir. Rijitlik grafiğindeki rijitlik değerlerinden elde edilen ve yük-deplasman eğrisinin açısını ifade eden ve zamanla azalan eğim açısı grafiği Şekil 3.79’da gösterilmiştir. Momentin akma bölgesinden sonra sabit kalması grafiklerde ankastre mesnetlerin bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.77. K-5 numunesi moment-eğrilik grafiği

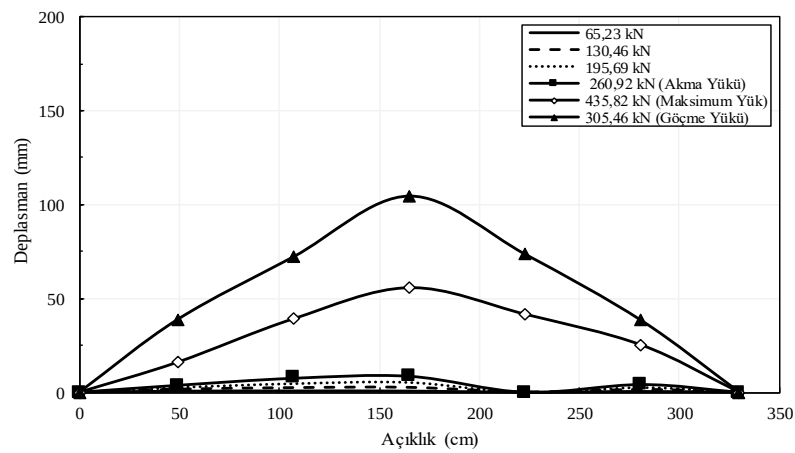


Şekil 3.78. K-5 numunesi rijitlik grafiği



Şekil 3.79. K-5 numunesi eğim açısı grafiği

Akma yüküne kadar dörtte bir oranda artarak ve akma yükünden sonra maksimum yük ve göçme yükü altında oluşan 7 deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrileri Şekil 3.80’de gösterilmiştir.



Şekil 3.80. K-5 numunesi deplasman eğrileri

3.2.8. K6 Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 8. olarak deneye tabi tutulan numune boşluğun kiriş yüksekliğinin %60 oranında olduğu 360 mm çapındaki K-6 numunesidir. Boşluklu K-6 numunesinde donatı dizaynı ise tüm numunelerde olduğu gibi benzerdir. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü Şekil 3.81’ de gösterilmiştir.



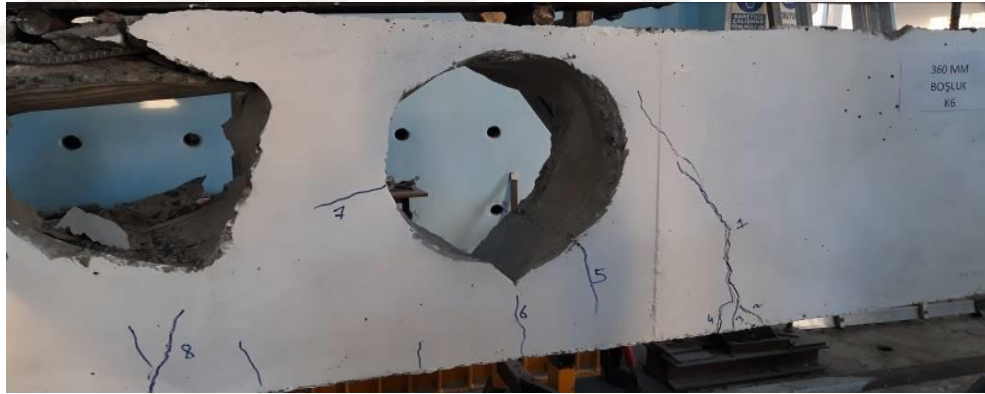
Şekil 3.81. K-6 numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde görülmüştür. İlk ve ikinci çatlak 111 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeye bağlı olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. 3, 4 ve 5. çatlaklar 140 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Kiriş numunesi akma değerine 140 kN seviyelerinde ulaşmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 4,1 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 210 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak ise 212 kN değerinde belirmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 244 kN’dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 24,32 mm’dir. Deney numunesinde sol taraftaki boşluğun basınç bölgesine çok yakın olması sebebiyle et kalınlığının yetersiz kalmasından ötürü numune nihai yük değerine ulaşmıştır. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde küçük genişliklerde meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde zorlanma olmadığı için kesme çatlakları oluşmamıştır. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü Şekil 3.82.’de gösterilmiştir. Yüklemenin olduğu basınç bölgesinde sol

boşluk üstünde betonda ezilmeler ve dökülmelerin yanı sıra basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir. Çatlaklar belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali Şekil 3.83’de gösterilirken hasar dağılımı da Şekil 3.84’de gösterilmiştir.



Şekil 3.82. K-6 numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 3.83. K-6 numunesinin deney sonrası eğilme çatlak detayları



Şekil 3.84. K-6 numunesinin hasar dağılımı

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi Şekil 3.85’ de gösterilmiştir. Çatlakların dağılımının asimetrik bir dağılım olduğu gözlemlenmiştir.



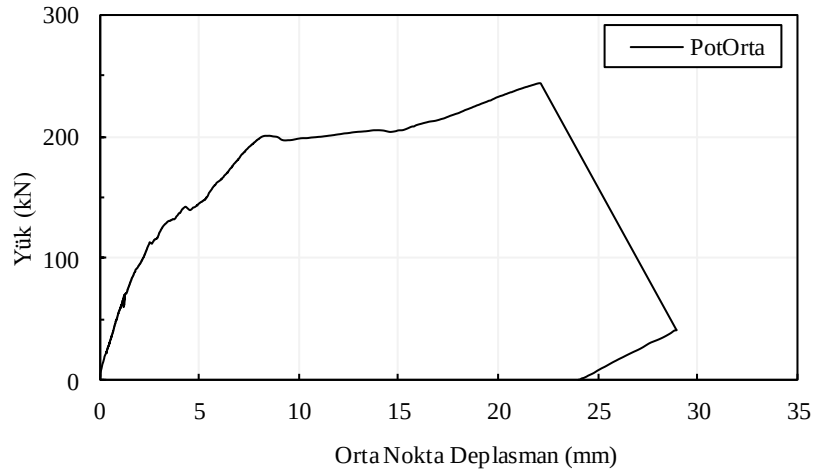
Şekil 3.85. K-6 numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

Mesnet bölgesinde kiriş alt bölgesinde yükleme altında meydana gelen betondaki çatlak ve ezilme Şekil 3.86’ da gösterilmiştir. Çatlak genişlikleri tüm kiriş boyunca maksimum 2-3 mm boyutlarına ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde kirişin alt noktalarında çatlak genişliği maksimum 2-3 mm iken mesnet bölgesinde kiriş üst noktalarında kesme çatlakları maksimum 0.5 mm değerlerindedir.



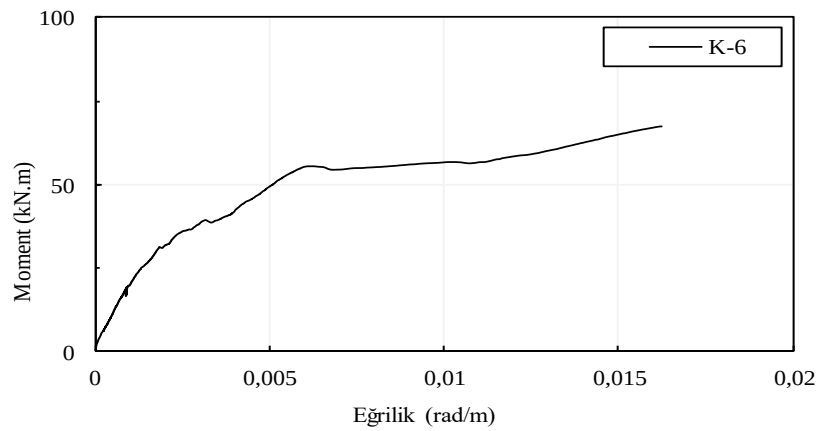
Şekil 3.86. Mesnet bölgesi ezilme ve çatlakların görünümü

Kirişin yükleme yapılan basınç bölgesinde yüke bağlı olarak ezilme meydana gelmiş ve betonda dökülmeler gözlemlenmiştir. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan verilere göre elde edilen yük-orta nokta deplasman grafiği Şekil 3.87’ de gösterilmiştir.

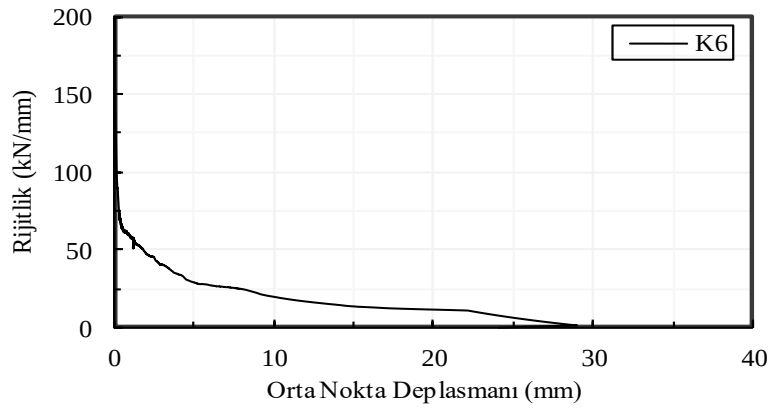


Şekil 3.87. K-6 numunesi yük-orta nokta deplasman grafiği

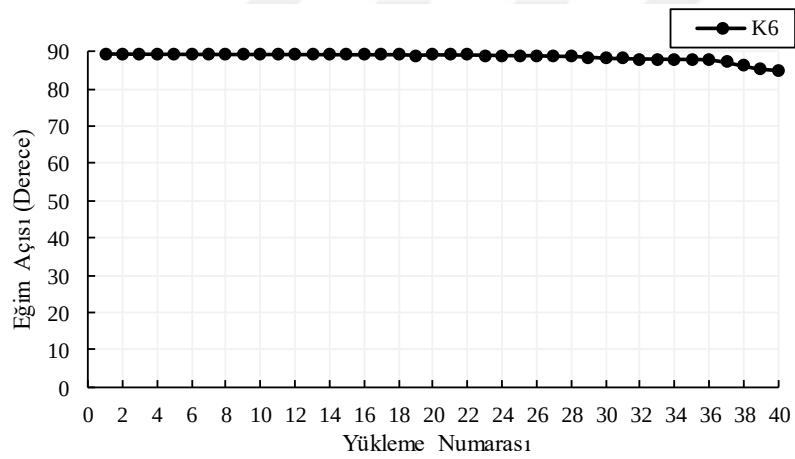
Yük-orta nokta deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak tüketilmiş enerji 5150.07 kNmm bulundu. Yük- orta nokta deplasman değerlerinden elde edilen veriler doğrultusunda moment-eğrilik grafiği oluşturulmuş Şekil 3.88’ de gösterilmiştir. Yük-orta nokta grafiğindeki her bir yük değerinin o değere karşılık gelen deplasman değerine bölünerek elde edilen değerlerle oluşturulan rijitlik grafiği ise Şekil 3.89’da gösterilmiştir. Rijitlik grafiğindeki rijitlik değerlerinden elde edilen ve yük-deplasman eğrisinin açısını ifade eden ve zamanla azalan eğim açısı grafiği Şekil 3.90’da gösterilmiştir. Momentin akma bölgesinden sonra sabit kalması grafiklerde ankastre mesnetlerin bir etkisi olarak değerlendirilmiştir



Şekil 3.88. K-6 numunesi moment-eğrilik grafiği

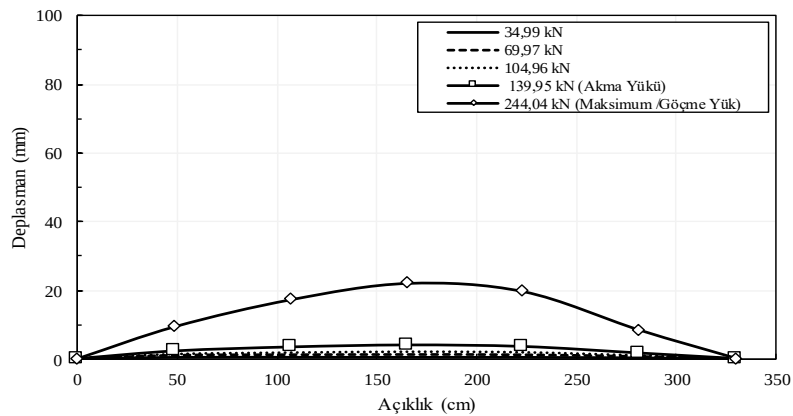


Şekil 3.89. K-6 numunesi rijitlik grafiği



Şekil 3.90. K-6 numunesi eğim açısı grafiği

Akma yüküne kadar dörtte bir oranda artarak ve akma yükünden sonra maksimum yük ve göçme yükü altında oluşan 7 deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrileri Şekil 3.91’de gösterilmiştir.



Şekil 3.91. K-6 numunesi deplasman eğrileri

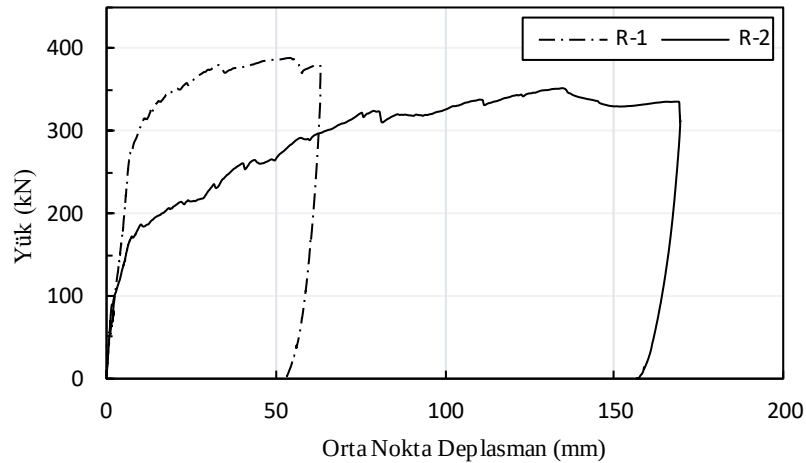
3.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde 8 adet betonarme kiriş numunelerinin deney sonuçlarının karşılaştırılmasına yönelik veriler, grafikler ve değerlendirilmeler verilmiştir. Karşılaştırma yapılacak grafikler aşağıda belirtildiği gibidir ;

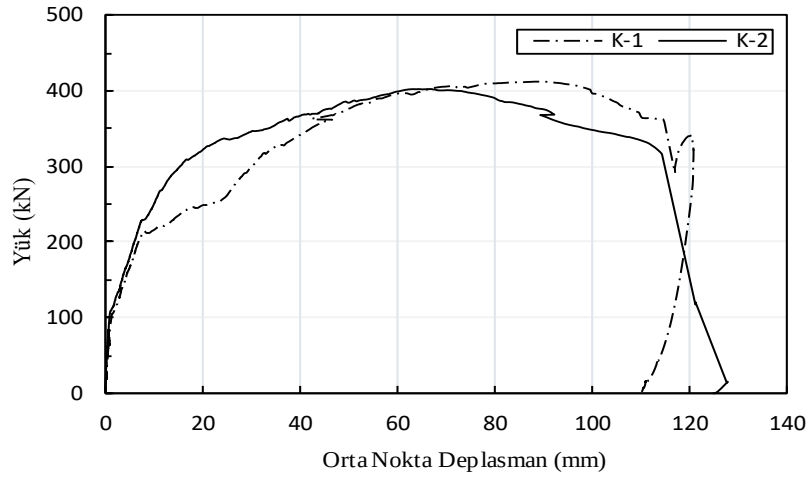
- Yük-Orta Nokta Deplasman Grafikleri
- Moment-Eğrilik Grafikleri
- Rijitlik Grafikleri
- Eğim Açısı Grafikleri
- Deplasman Eğrileri
- Toplam Tüketilen Enerji Miktarı
- Süneklik Değerleri

3.3.1. Yük-Orta Nokta Deplasman Grafiklerinin Karşılaştırılması

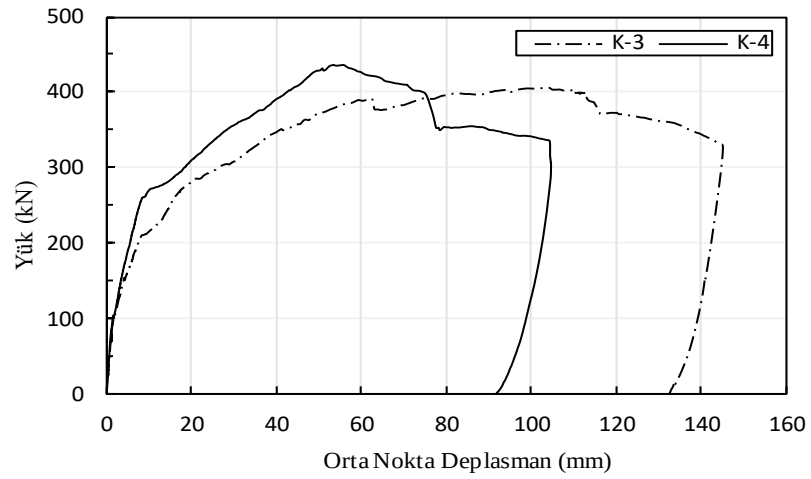
8 adet betonarme kiriş numunelerinin yük-orta nokta deplasman grafikleri değerlendirilmiştir. Aynı tipe ait numuneler kendi içinde karşılaştırılmıştır. Genel karşılaştırmada tüm numunelere ait grafikler gösterilmiştir. Grafiklere ait ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 3.92-3.95 arası şekillerde tip numunelere ait karşılaştırmalar gösterilirken Şekil 3.96'da tüm numunelere ait karşılaştırma gösterilmiştir. Tablo 3.1'de tüm numuneler için yük-deplasman karşılaştırması yapılmıştır.



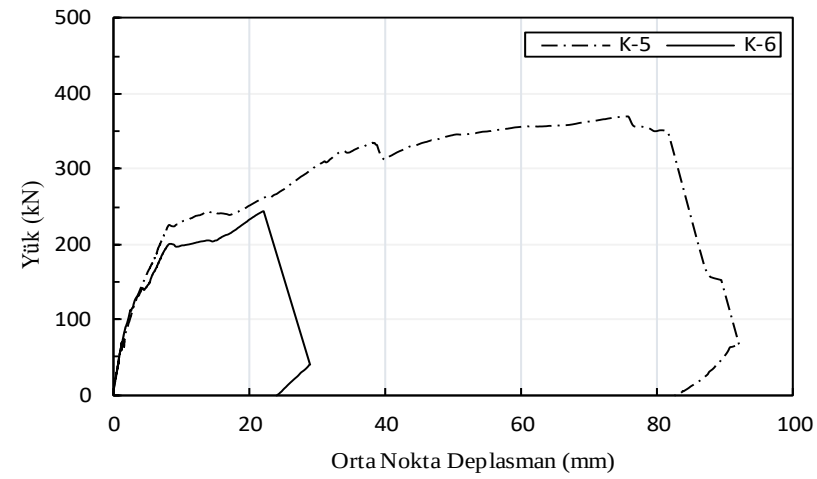
Şekil 3.92. R1-R2 numunelerinin yük-orta nokta deplasman eğrileri



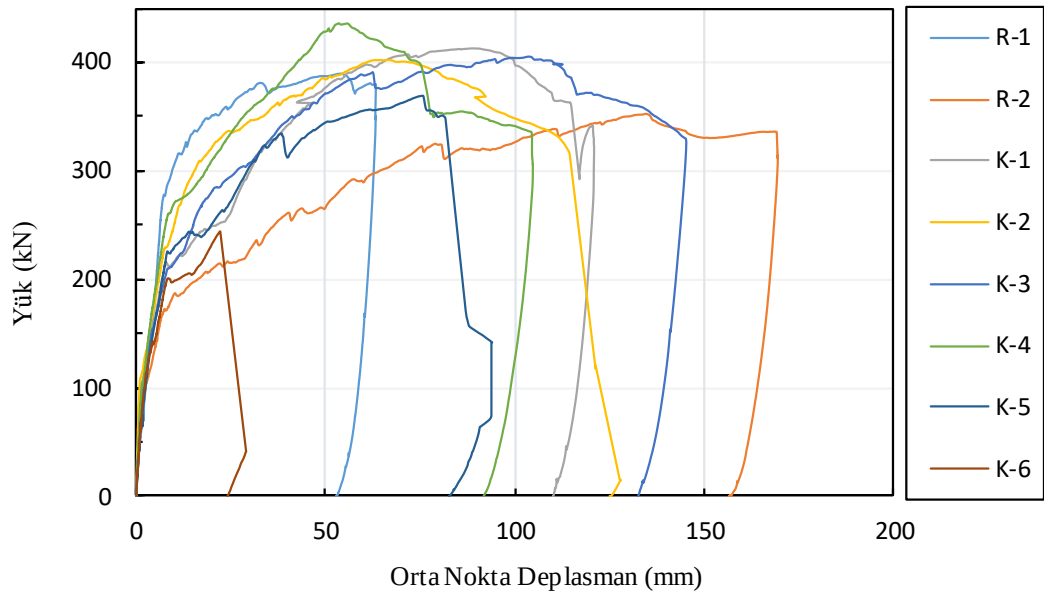
Şekil 3.93. K1-K2 numunelerinin yük-orta nokta deplasman eğrileri



Şekil 3.94. K3-K4 numunelerinin yük-orta nokta deplasman eğrileri



Şekil 3.95. K5-K6 numunelerinin yük-orta nokta deplasman eğrileri



Şekil 3.96. Tüm numunelerin yük-orta nokta deplasman eğrileri

Tablo 3.1. Tüm numuneler için yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması

Num . Adı	İlk Çatlak Noktasında		Akma Noktasında		Maksimum Yükte		Göçme Noktasında		Yük	
	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Yük (kN)	Dep. (mm)	Kalıcı D. (mm)	Kırılma Türü
R-1	130	3.39	277	7.58	389.6	54.3	346.55	63.18	52.83	Eğilme
R-2	95	2.05	202.85	17.28	352.4	134.72	311.43	169.42	157.5	Eğilme
K-1	135	3.21	221.39	12,16	412.8	89.32	321.44	120.89	110.17	Eğilme
K-2	135	2.77	223.81	7.11	402.1	63.48	317.59	114.23	127.57	Eğilme
K-3	133	3.26	202.25	7.62	405.2	103.75	330.03	144.92	132.6	Eğilme
K-4	130	2.72	260.92	8.67	435,8	55.7	305.46	104.71	92.5	Eğilme
K-5	130	3.48	223.68	8	369.2	75.6	349.76	81.41	83.22	Eğilme +
K-6	111	2.46	139.94	4.1	244.0	22.12	244.04	22.12	24.32	Yetersiz Kesit

Tablo 3.1’den incelenip değerlendirme yapıldığında tüm numuneler arasında maksimum deplasmanın referans-2 numunesinde ve 157,5 mm olduğu görülmektedir. Referans numuneleri arasında deplasman farkının 100 mm civarında olduğu görülmektedir. Referans numunelerinin yük boşaltıldıktan altındaki kalıcı deplasman değerlerinin ortalaması 105 mm’dir. Referans numunelerinin ulaştığı maksimum yük değerleri 389.6 ve 352.4 kN’dur. R-1 Numunesinin yük taşıma kapasitesi R-2 Numunesinin yük

taşıma kapasitesinden %10.6 fazladır. Referans numune için bölüm 2’de teorik yük taşıma kapasitesi 335.88 kN olarak hesaplanmıştı. R-1 numunesinin kapasitesi teorikte hesaplanan yük taşıma kapasitesinden %16 fazla iken R-2 numunesi ise % 4.9 oranında fazladır. Referans numunelerinde eğilme davranışı hakimdir.

120 mm boşluğa sahip K-1 ve K2 numuneleri sırasıyla 110.17 mm ve 127.57 mm kalıcı deplasman yapmışlardır. K-2 numunesi K-1 numunesine göre %15.8 oranında daha fazla deplasman yapmıştır. K-1 numunesi K-2 numunesine göre % 2.67 oranında daha fazla maksimum yüke ulaşmıştır. Ulaştıkları maksimum yükler referans numunesinin teorik yük kapasitesi ile karşılaştırıldığında K-1 numunesi %22.9, K-2 numunesi ise %19.71 oranında daha fazla yüke ulaşmıştır. K-1 ve K-2 numunesi diğer tip numunelere göre sonuçları en fazla yakınlık gösteren tip numunelerdir. K-1 ve K-2 numunelerinde tüm deney boyunca eğilme davranışı hakimdir.

240 mm boşluğa sahip K-3 ve K4 numuneleri sırasıyla 132.6 mm ve 92.5 mm kalıcı deplasman yapmışlardır. K-3 numunesi K-4 numunesine göre %43.3 oranında daha fazla deplasman yapmıştır. K-4 numunesi K-3 numunesine göre %7.55 oranında daha fazla yüke ulaşmıştır. K-4 numunesi ulaştığı 435.8 kN maksimum yük kapasitesi ile tüm numuneler arasında en fazla kapasiteye ulaşan numunedir. K-3 numunesi referans numuneyle oranla %17.1 oranında K-4 numunesi ise %29.75 oranında daha fazla yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. K-3 ve K-4 numunelerinde tüm deney boyunca eğilme davranışı hakimdir.

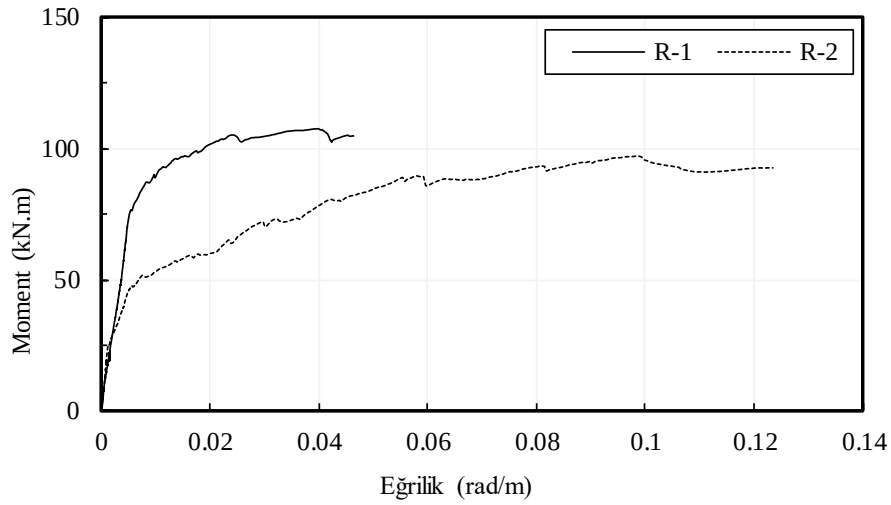
360 mm boşluğa sahip K-5 ve K-6 numuneleri sırasıyla 83.22 mm ve 24.32 mm kalıcı deplasmanlar yapmışlardır. K5 numunesi K-6 numunesine göre yaklaşık 60 mm daha fazla deplasman yapmıştır. K-5 numunesi K-6 numunesine göre %51.3 oranında daha fazla yük taşımıştır. K-5 numunesi referans numuneyle oranla %10 oranında daha fazla yük taşıırken K-6 numunesi ise %37.6 oranında daha az yük kapasitesine ulaşmıştır.

K-5 numunesinde deney boyunca kesme ve eğilme hakimdir. Mesnetler mekanizma durumuna ulaşmamıştır. K-6 numunesi tüm numuneler arasında en az deplasman değerine ulaşan numunedir. Bunun sebebi boşlukların asimetrik bir konumlama ve basınç bölgesine çok yakın olmasından ötürüdür. Yükleme altında et kalınlığının yetersiz kalması sebebiyle numune eğilme davranışı gösteremediği için deplasmanda bulunamamıştır.

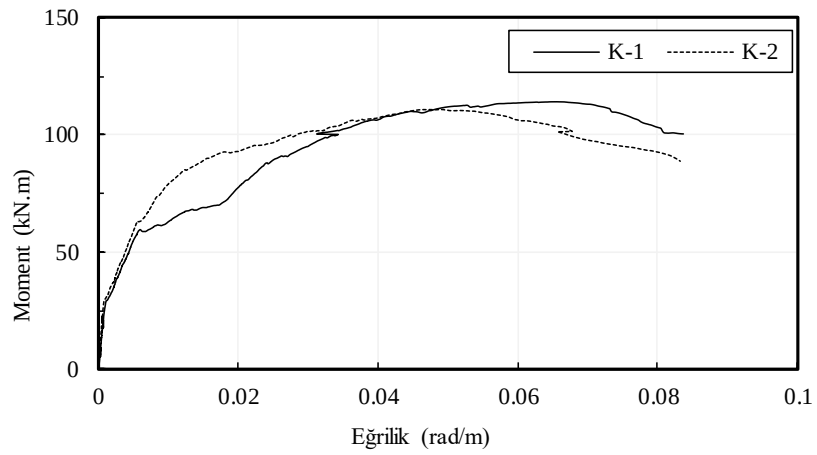
Tüm numuneler Tablo 5'e göre incelendiğinde ilk çatlağın 100-140 kN yük aralığında gözlemlenmiştir. İlk çatlak oluştuğunda ise tüm numuneler için orta nokta deplasman değeri 2-3.5 mm aralığındadır. Akma bölgesi K-6 numunesi hariç 200-270 kN aralığındadır. Referans numuneleri, 120 mm ve 240 mm sahip numunelere deney boyunca eğilme davranışı hakimken 360 mm boşluğa sahip K-5 numunesine kesme ve eğilme birlikte hakimdir. K-6 numunesi kesit yetersizliğinden nihai yüke ulaşmıştır.

3.3.2. Moment Eğrilik Grafiklerinin Karşılaştırılması

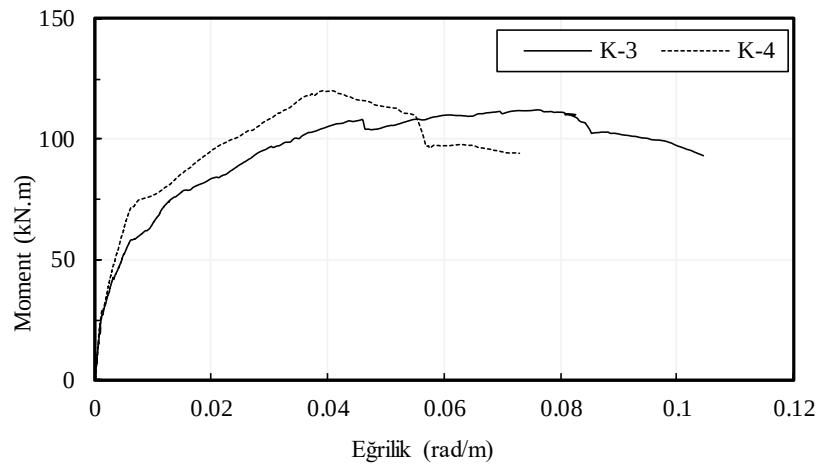
8 adet betonarme kiriş numunelerinin moment-eğrilik grafikleri değerlendirilmiştir. Aynı tipe ait numuneler kendi içinde karşılaştırılmıştır. Genel karşılaştırmada tüm numunelere ait grafikler gösterilmiştir. Grafiklere ait ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 3.97-3.100 arası şekillerde tip numunelerine ait karşılaştırmalar gösterilirken Şekil 3.101'de tüm numunelere ait karşılaştırma gösterilmiştir. Tablo 3.2'de tüm numuneler için moment eğrilik karşılaştırılması yapılmıştır.



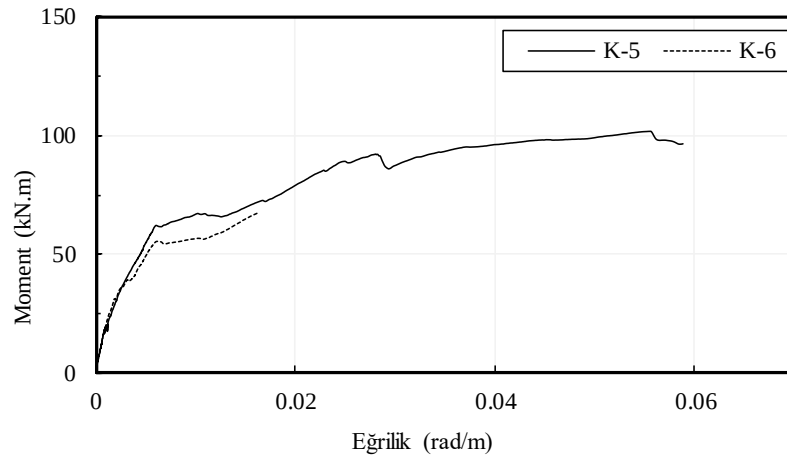
Şekil 3.97. R1-R2 numunelerinin moment-eğrilik grafikleri



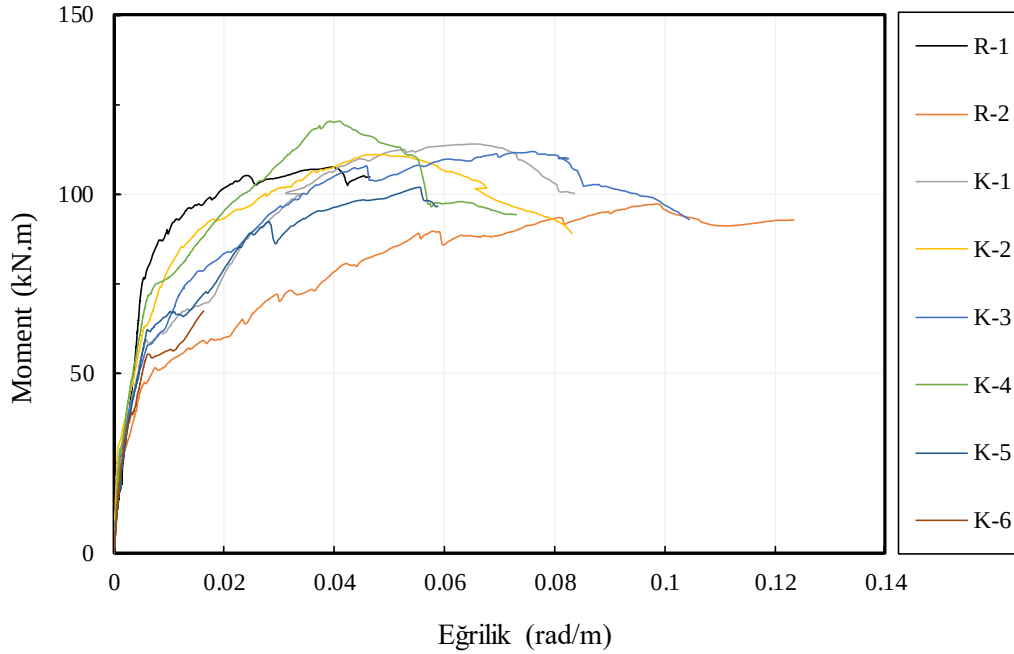
Şekil 3.98. K1-K2 numunelerinin moment-eğrilik grafikleri



Şekil 3.99. K3-K4 numunelerinin moment-eğrilik grafikleri



Şekil 3.100. K5-K6 numunelerinin moment-eğrilik grafikleri



Şekil 3.101. Tüm numunelerin moment-eğrilik grafikleri

Tablo 3.2. Tüm numuneler için moment-eğrilik karşılaştırmaları

Numune Adı	Akma Noktasında		Maksimum Yük	
	Moment (kNm)	Eğrilik (rad/m)	Moment (kNm)	Eğrilik (rad/m)
R-1	38.29	0.00263	107.57	0.03971
R-2	56,01	0.01269	97,30	0.09864
K-1	61.12	0.00815	113.97	0.06552
K-2	61.79	0.00522	111.02	0.04853
K-3	55.84	0.00559	111.89	0.07607
K-4	72.04	0.00649	120.33	0.04089
K-5	61.74	0.00588	101.93	0.0555
K-6	38.63	0.0035	67.38	0.01625

Tablo 12’den incelenip değerlendirme yapıldığında tüm numuneler arasında maksimum eğrilğin referans-2 numunesinde ve 0.09864 rad/m olduğu görülmektedir. Referans numunelerinin ulaştıkları maksimum eğrilik değeri sırasıyla R-1 ve R-2 için 0.03971 rad/m ve 0.09864 rad/m’dir. Bölüm 2’ de referans numune için açıklık ortasında oluşacak maksimum moment formülü olan denklem 3.4. doğrultusunda hesaplanan

moment değeri 92.75 kNm'dir. R-1 numunesi referans numunesi için hesaplanan teorik moment değerine göre %16 oranında R-2 numunesi ise %4.91 oranında daha fazla moment kapasitesine ulaşmıştır. R-2 numunesi R-1 numunesine göre %148 oranında daha fazla eğrilik göstermiştir. R-1 numunesi R-2 numunesine göre %10.6 oranında daha fazla moment kapasitesine ulaşmıştır.

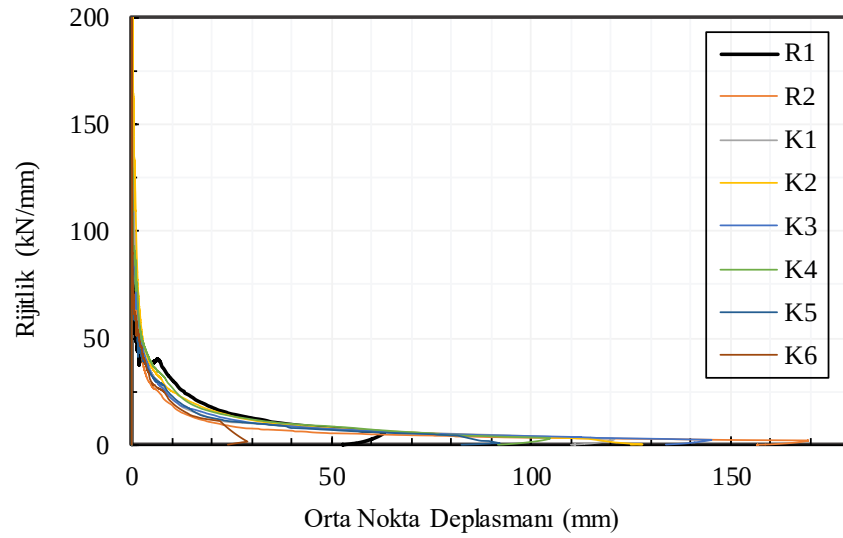
120 mm boşluğa sahip K-1 ve K2 numuneleri sırasıyla 0.06552 rad/m ve 0.04853 rad/m eğrilik göstermişlerdir. K-1 numunesi K-2 numunesine göre %35 oranında daha fazla eğrilik yapmıştır. K-1 numunesi K-2 numunesine göre % 2.66 oranında daha fazla momente ulaşmıştır. Ulaştıkları maksimum momentler referans numunesinin teorik moment kapasitesi ile karşılaştırıldığında K-1 numunesi %22.9 K-2 numunesi ise %19.71 oranında daha fazla momente ulaşmıştır.

240 mm boşluğa sahip K-3 ve K4 numuneleri için sırasıyla 0.07607 mm ve 0.04089 rad/ m eğrilik hesaplanmıştır. K-3 numunesi için K-4 numunesine göre %86 oranında daha fazla eğrilik hesaplanmıştır. K-4 numunesi K-3 numunesine göre %7.55 oranında daha fazla yüke ulaşmıştır. K-4 numunesi ulaştığı 120.33 kNm maksimum moment ile tüm numuneler arasında en fazla kapasiteye ulaşan numunedir. K-3 numunesi referans numuneyle oranla % 20.64 oranında K-4 numunesi ise %29.74 oranında daha fazla moment kapasitesine ulaşmıştır.

360 mm boşluğa sahip K-5 ve K-6 numuneleri sırasıyla 0.0555 rad/m ve 0.01625 rad/m eğrilik yapmışlardır. K5 numunesi için K-6 numunesine göre çok daha fazla eğrilik hesaplanmıştır. K-5 numunesi K-6 numunesine göre %51.3 oranında daha fazla moment taşımıştır. K-5 numunesi referans numuneyle oranla %10 oranında daha fazla moment taşıırken K-6 numunesi ise %37.6 oranında daha az moment kapasitesine ulaşmıştır. K-6 numunesi tüm numuneler arasında en az eğriliğe ulaşan numunedir.

3.3.3. Rijitlik Grafiklerinin Karşılaştırılması

8 adet betonarme kiriş numunelerinin rijitlik grafikleri karşılaştırılmıştır. Grafiklere ait ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 3.102'de tüm numunelere ait rijitlik grafikleri verilmiştir. Tablo 3.3'de tüm numunelere ait rijitlik karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 3.102. Tüm numunelerin rijitlik grafikleri

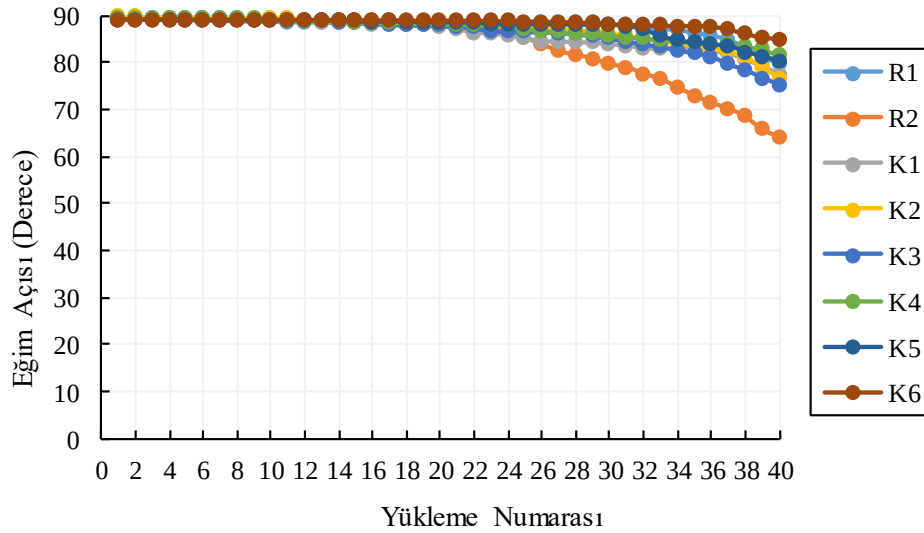
Tablo 3.3. Tüm numuneler için rijitlik değerlerinin karşılaştırmaları

Numune Adı	İlk Rijitlik (kN/mm)	Maksimum Yükte Rijitlik (kN/mm)
R-1	139.7	7.17
R-2	236.42	2.62
K-1	513.13	4.63
K-2	753.58	6.35
K-3	593.72	3.91
K-4	424.47	7.83
K-5	338.5	4.88
K-6	373.43	11.03

Tüm numuneler için ilk rijitlik yani maximum rijitlik değerleri 250 kN/mm ile 750 kN/mm arasındadır. Maksimum yük altındaki rijitlik değerleri 3 ile 11 kN/mm arasında değişmektedir. İlk rijitlik değeri maksimum olan numune K-2 iken maksimum yük altında rijitlik değeri en fazla olan numune K-6 numunesidir. K-6 numunesinin et kalınlığından ötürü fazla yük alamaması sebebiyle nihai rijitlik değeri nispeten diğer numunelere göre fazladır.

3.3.4. Eğim Açısı Grafiklerinin Karşılaştırılması

8 adet betonarme kiriş numunelerinin eğim açısı grafikleri karşılaştırılmıştır. Grafiklere ait ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 3.103’de tüm numunelere ait eğim açısı grafikleri verilmiştir.

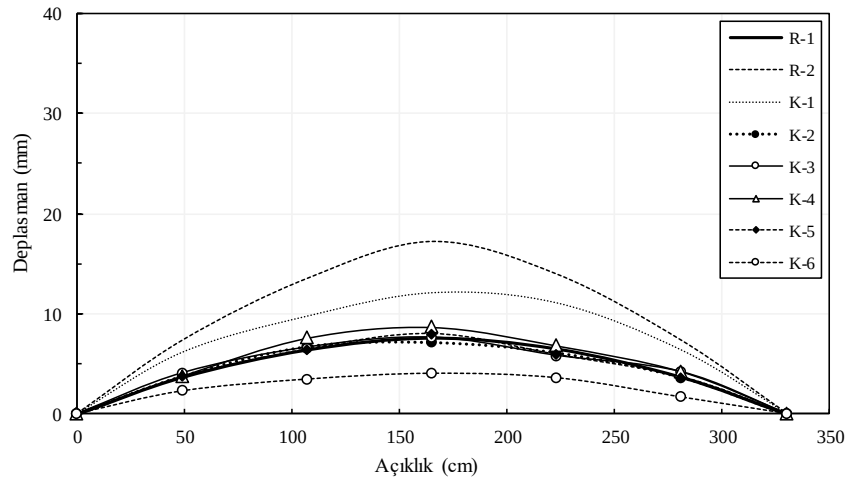


Şekil 3.103. Tüm numunelerin eğim açısı grafikleri

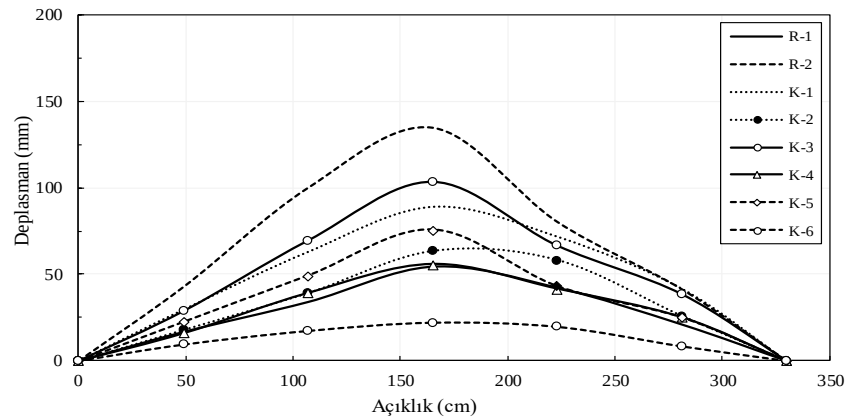
Eğim açılarındaki son yüklemeye numarası göçme öncesi yüke kadar olan kısmı kapsamaktadır. Tüm numuneler benzer davranış göstermişlerdir. R-2 numunesinin diğer numunelere oranla eğim açısında göçme yüküne kadar daha çok azalma meydana gelmiştir. Başlangıç açısı 90 derece kabulüyle R-2 numunesi haricinde tüm numunelerin açılarındaki 75 ve 85 derece aralığına kadar bir azalma olduğu görülmüştür. R-2 numunesinde açı değeri 65 dereceye kadar azalma göstermiştir. Başlangıç değerine göre R-1 numunesinin % 11.32, R-2 numunesinin %28.66, K-1 numunesinin %13.7, K-2 numunesinin %14.84, K-3 numunesinin %16.43, K4 numunesinin %9.4, K-5 numunesinin %10.86 K-6 numunesinin %5.63 oranında açılarındaki azalma meydana gelmiştir. 120 mm boşluğa sahip K-1 ve K-2 numuneleri diğer numune tiplerine oranla birbirine en çok yakınlık gösteren numunelerdir. Akma bölgesine kadar numunelerin eğim açısında azalma meydana gelmezken numunelerin akma bölgesine ulaştıktan sonra göçmeye kadar olan kısımda eğim açılarındaki ciddi azalmalar meydana gelmiştir.

3.3.5. Deplasman Eğrilerinin Karşılaştırılması

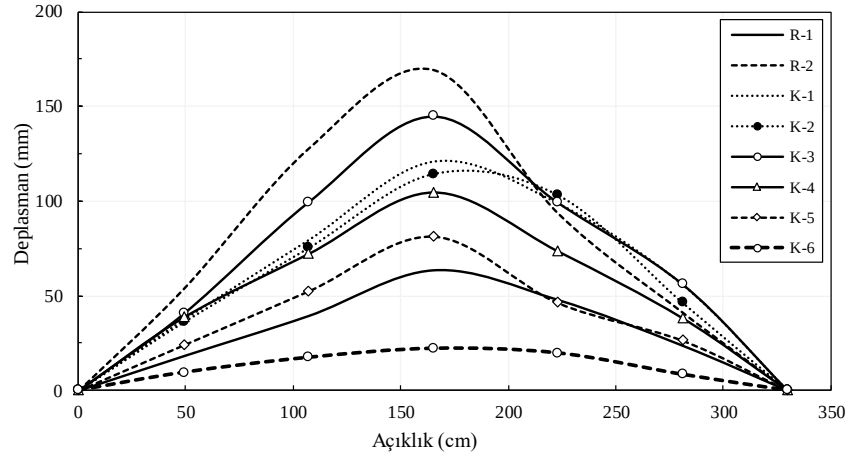
8 adet betonarme kiriş numunelerinin deplasman eğrileri karşılaştırılmıştır. Her bir numuneye ait akma yükü, maksimum yük ve göçme öncesi yükte oluşan deplasman eğrileri karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Şekil 3.104’de akma yüküne karşılık gelen deplasman eğrileri şekil 3.105’de maksimum yüke karşılık gelen deplasman eğrileri şekil 3.106’da ise göçme öncesi yüke karşılık gelen deplasman eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 3.104. Numunelerin akma yük değerinde deplasman eğrileri



Şekil 3.105. Numunelerin maksimum yük değerinde deplasman eğrileri

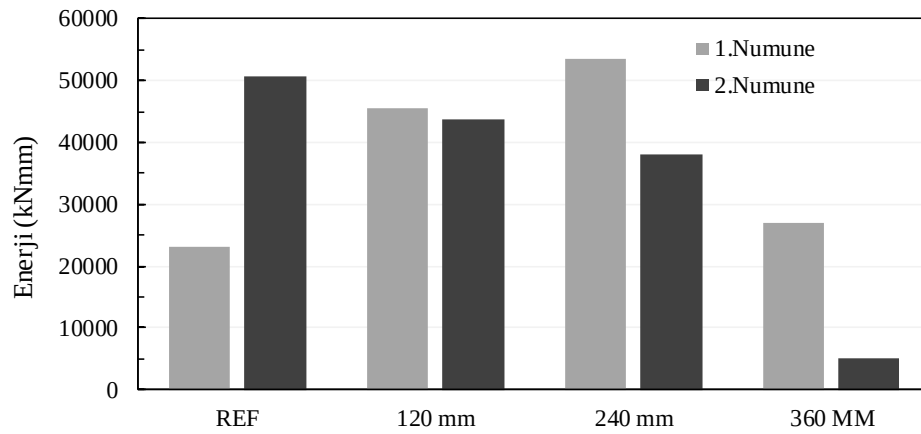
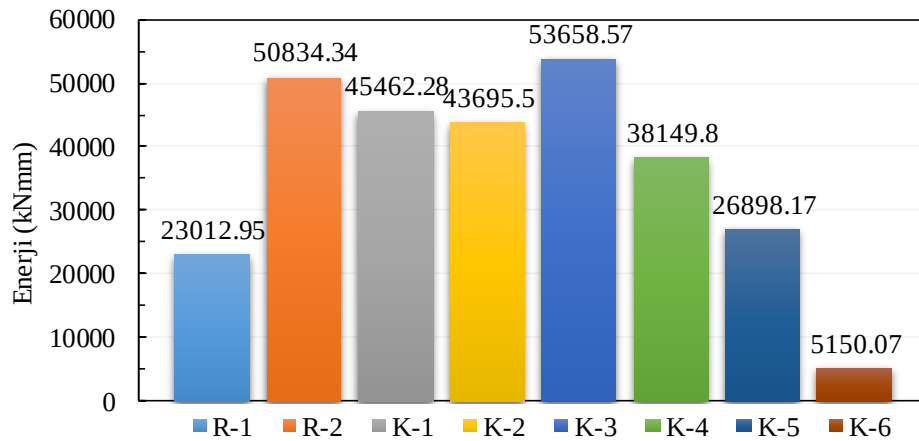


Şekil 3.106. Numunelerin göçme yük değerinde deplasman eğrileri

Tüm numuneler arasında eğriliğin en iyi gözlemlendiği numune K-6 numunesidir. Akma yük değeri altında numunelerin orta nokta deplasman değeri R-2 numunesi haricinde 5-10 mm aralığındadır. R-2 numunesi 17 mm deplasman gerçekleşmiştir. Numunelerin akma yükünde açıklıkta sol kısımlarda deplasman ölçerlerden alınan veriler doğrusal artış gösterirken sağ tarafta ise K-1 ve K-6 numunesi dışında doğrusallık göstermemektedir. Kirişin altında konumlanan 5 tane deplasman ölçerden alınan verilere göre oluşturulan deplasman eğrilerinde maksimum ve göçme yükü altında istenen eğrilik elde edilmiştir. R-1 numunesinde orta nokta deplasman değeri en fazladır. Boşluk oranı arttıkça nispeten deplasman değeri azalma eğilimindedir. %20 ve %40 boşluk oranına sahip numunelerde deplasman değeri yüksek miktarda azalma göstermezken %60 boşluk oranlarına sahip numunelerin deplasman değerlerinde ciddi azalma olduğu belirlenmiştir. Birbirine en yakın deplasman eğrisi gösteren tip numune %20 boşluk oranına sahip K-1 ve K-2 numuneleridir. K-6 numunesi boşluğun yükleme noktasına olan yakınlığından ötürü numune öngörülen deplasman değerine gelmeden göçme yüküne ulaşmıştır.

3.3.6. Toplam Tüketilen Enerji Miktarının Karşılaştırılması

8 adet betonarme kiriş numunelerinin toplam tükettiği enerji miktarları karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Şekil 3.107'de tüm numunelerin tükettiği enerji miktarı gösterilmiştir.



Şekil 3.107. Numunelerin enerji tüketme miktarları

Enerji tüketme miktarı en fazla olan numune %40 boşluk oranına sahip K-3 numunesidir. En az tüketme miktarı ise K-6 numunesindedir. Referans numuneleri mukayese edildiğinde R-2 numunesinin enerji tüketme miktarı R-1 numunesinden %121 daha fazladır. %20 boşluk oranına sahip K-1 numunesi K-2 numunesinden %4 daha fazla enerji tüketmiştir. %40 boşluk oranına sahip K-3 numunesi K-4 numunesinden %28.9 daha fazla enerji tüketmiştir. K-6 numunesi, boşluğun basınç bölgesine olan yakınlığından ötürü büyük miktarda enerji tüketimi gerçekleştiremeden göçme noktasına ulaşmıştır. Enerji tüketme miktarı referans , %20 boşluklu ve %40 boşluklu numunelerde benzer miktarlarda iken %60 boşluklu numunelerde ise önemli derecede azalma göstermiştir. Boşluk oranının artmış olması deplasman değerini düşürdüğünden enerji tüketme miktarını da azaltmıştır. Boşluk çapı arttıkça çatlaklar kesitin zayıf olduğu boşluğa doğru yönelmiş ve kesitin taşıma kapasitesini düşürmüştür bu durumda numunenin enerji tüketme kapasitesini azaltmıştır.

3.3.7. Numunelerin Kırılma Anlarının Karşılaştırılması

Tüm numunelerin göçme öncesi mekanizma durumlarına ait görselleri Şekil 3.108’de gösterilmiştir. Görseller yükün boşaltılması ile elde edilen numunelerin kalıcı deformasyonlu hallerine ait görsellerdir.



R-1



R-2



K-1



K-2



K-3



K-4



K-5



K-6

Şekil 3.108. Numunelerin kırılma anları

Numunelerin yük sonlandırıldıktan sonraki halleri incelendiğinde referans numunelerinde eğilme bölgesinde çatlakların yoğunlaştığı ve simetrik bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Çekme bölgesinde alt noktalarda çatlaklarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Referans numunelerinde eğilme davranışı hakimdir. Basınç bölgesinde betonda ezilmeler meydana gelmiştir. Mesnet noktalarında da 45 derecelik kesme çatlakları oluşmuştur. Ankastre mesnet etkisinin gerçekleştiği görülmektedir.

K-1 ve K-2 numunelerine bakıldığında kırılma anında çatlaklar sağ boşluğun çevresinde yoğunlaşmış ve asimetrik bir dağılım göstermiştir. Basınç bölgesinde betonda ezilmeler meydana gelmiştir. Mesnet bölgelerinde 45 derecelik kesme çatlakları belirgin şekilde oluşmuştur. Mesnetler mekanizma durumuna ulaşmıştır. Numunelere eğilmeli-kesme davranışı hakimdir. K-1 ve K-2 numuneleri birbirlerine benzer davranış göstermiştir. Ankastre mesnet etkisinin gerçekleştiği görülmektedir. K-3 ve K-4 numunelerinde çatlaklar sağ boşluğun çevresinde yoğunlaşmıştır. Basınç bölgesinde betonda ezilmeler ve dökülmeler meydana gelmiştir. Basınç donatılarında burkulma oluşmuştur.

Mesnet bölgesindeki kesme çatlakları referans ve % 20 boşluklu numunelere göre daha az genişliktedir. Çatlaklar kesitin zayıf olduğu boşluklara doğru yönelmiştir ve basınç bölgesine kadar uzanmamıştır. Çatlaklar daha az genişlikte ama birçok sayıda dalgalanmalar yaparak boşlukların çevresinde yoğunlaşmıştır. Eğilmeli-kesme davranışı görülmüştür.

K-5 ve K-6 numunelerinde mesnetler mekanizma durumuna ulaşmamıştır. K-5 numunesinde çatlaklar sağ boşluğun çevresinde dalgalanma yaparak yoğunlaşmıştır. Betonda ezilmeler ve dökülmeler olmuştur. Basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir. Sol mesnette kesme çatlakları görülürken sağ mesnet noktaları zorlanmadığından kesme çatlakları kılcıl boyutlardadır. K-6 numunesinde boşluğun basınç bölgesine yakın imal edilmesinden dolayı et kalınlığı yetersiz kaldığından kesit nihai yüke ulaşmış ve çatlak gelişimi gözlenememiştir. Çatlaklar kılcıl boyutta eğilme bölgesinde meydana gelmiştir. Mesnet bölgesi zorlanmadığından kesme çatlakları oluşmamıştır.

3.3.8. Numunelerin Süneklilik Değerlerinin Karşılaştırılması

8 adet betonarme kiriş numunelerinin süneklilik değerleri karşılaştırılmıştır. Tablo 3.4’de tüm numunelerin süneklilik değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Tüm numuneler için süneklilik değeri karşılaştırılması

Numune Adı	Akma Noktasında		Göçme Noktasında		Süneklilik ($\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$)
	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Yük (kN)	Deplasman (mm)	
R-1	277	7,58	346,55	63,18	8,33
R-2	202,85	17,28	311,43	169,42	9,80
K-1	221,39	12,16	321,44	120,89	9,94
K-2	223,81	7,11	317,59	114,23	16,07
K-3	202,25	7,62	330,03	144,92	19,01
K-4	260,92	8,67	305,46	104,71	12,08
K-5	223,68	8	349,76	81,41	10,18
K-6	139,94	4,1	244,04	22,12	5,4

4. BÖLÜM

NÜMERİK ÇALIŞMA AŞAMASI

4.1. Giriş

Nümerik çalışma kapsamında kullanılacak olan sonlu elemanlar metodu mühendislik çözümlerinde karmaşık problemleri analiz etmek ve modellemek amacı ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu eleman yöntemi ile analiz, yapılacak çalışmanın kapsamlı olarak incelenerek daha basit alt bölümlere ayırarak her bir bölümün kendi içerisinde çözümlenmesini sağlamaktadır. Zaman, doğruluk ve kolaylık açısından sonlu eleman yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir.

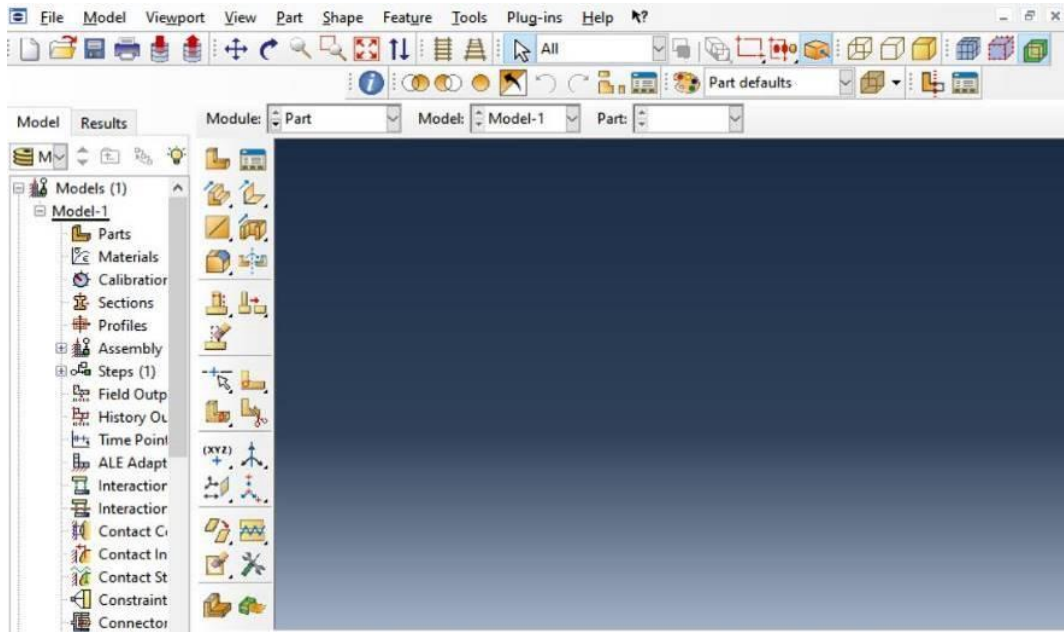
Tez çalışması kapsamında kullanılan sonlu eleman programı ABAQUS (2018) yazılım programıdır. Bu program kapsamında inşaat mühendisliği yapı elemanlarının analizi doğrusal ve doğrusal olmayan analizler şeklinde yapılabilmektedir. Deney numuneleri ABAQUS programında statik/explicit yöntemiyle analiz edilmişlerdir. 4 tip deney numunesi program kapsamında aşamalı olarak modellenerek deformasyon grafikleri, yük-deplasman grafikleri, çatlak gelişimi aşamaları elde edilmiştir.

4.2. Sayısal Modellemenin Oluşturulması

Bu çalışma kapsamında nümerik modellemeler ve analizler, sonlu eleman programı ABAQUS (2018) kullanılarak yapılmıştır. ABAQUS programında doğrusal olmayan analiz yapmak amacıyla yapı elemanının çözümü için statik açık (explicit) yöntemi kullanılmıştır. Kapalı yöntemin kullanılmama sebebi zamana bağlı olarak sönüm ve atalet parametrelerini dikkate almaması ve daha fazla zaman gerektiren bir yöntem olmasıdır. Açık yöntem ise zamanı dikkate alarak analizin çözümünde hızlı bir çözüm üretmektedir. Modelleme oluşturulurken SI birim sistemi kullanılmıştır. Sayısal modelleme kapsamında öncelikle kiriş elemanları geometrilerine bağlı olarak oluşturuldu. Donatı ve yükleme noktalarında kullanılacak aparatların kesit özellikleri ve

geometrileri oluşturuldu. Malzeme özellikleri de tanımlanarak oluşturulan kesitlere atamalar yapıldı. Sonrasında yapılan işlemler aşağıdaki gibidir;

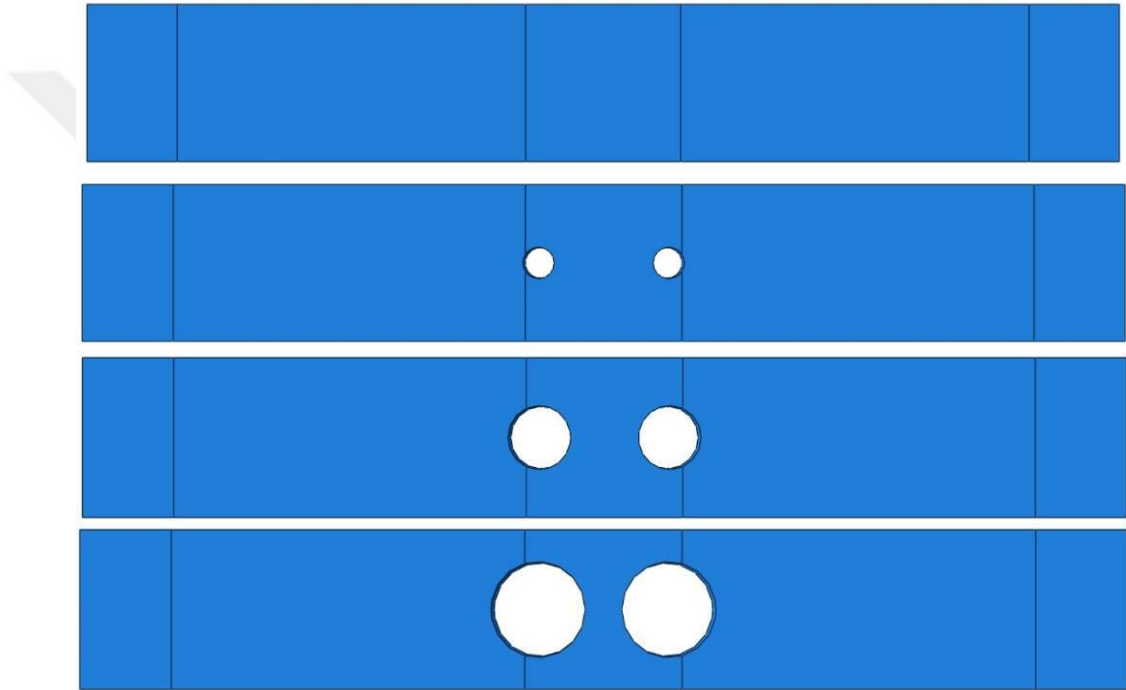
- Her bir numuneye ait parçaların ve boşlukların konumlandırılarak sistemin genel olarak oluşturulması,
- Sistemdeki etkileşimde ve temas durumunda olacak yüzeyler arasında bağlantıların oluşturulması ve özelliklerin girilmesi, yük-deplasman okuması yapılacak noktalara referans nokta atamalarının yapılarak yüzeyle aralarında bağlantıların oluşturulması,
- Analiz yönteminin belirlenerek analiz süresinin adım aralıklarının ve diğer parametrelerin girilmesi,
- Sistemde ankastre mesnet bölgelerinin tanımlanması yani sınır şartlarının oluşturulması ve yükleme durumunun deplasmana bağlı olarak oluşturulması,
- Sistemdeki her parçanın ayrı olarak yapısal atamasının yapılarak sonlu küçük parçalara (mesh) ayrılarak mesh özelliklerinin girilmesi ve meshlenmesi,
- Analiz çıktılarının oluşturulması
- Analiz işleminin özelliklerinin girilmesi ve oluşturulması,
- Analiz sonuçlarının ve çıktıların oluşturulması ve görüntülenmesi



Şekil 4.1. ABAQUS ara yüzü

4.2.1. Kesit Geometrilerinin Oluşturulması ve Kesit Atamaları

SI birim sistemine göre kesit geometrileri oluşturuldu. Sonrasında her bir kiriş geometrisine ait kesitler atanarak kesit atamaları tamamlanmıştır. Kiriş geometrisi 3 boyutlu ve katı (solid) eleman olarak modellenirken donatılar kablo (wire) eleman olarak modellenmiştir. Tip numunelerin model görünüşleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Basınç, çekme donatısı ve etriyeler, deneysel çalışmadaki numunelerle aynı düzene ve tasarıma sahip olacak şekilde üretilmiştir. Donatı düzeni şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Numunelerin model görünüşleri



Şekil 4.3. Nümerik model donatı görünümü

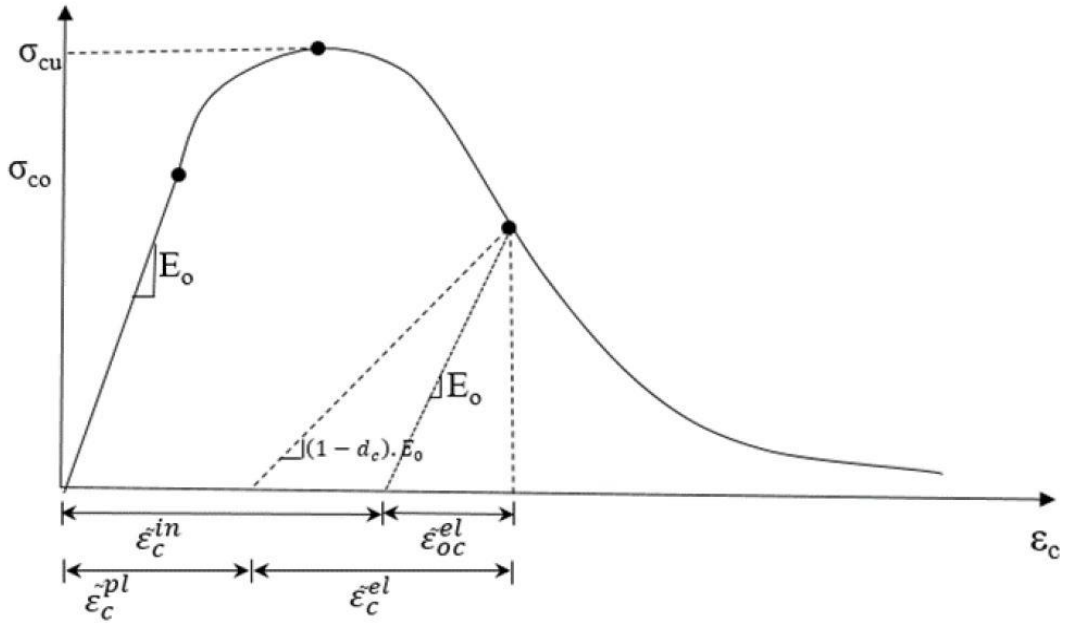
Boşluklu kiriş modellemelerinde boşluğun denk geldiği enine donatılar eklenmemiştir. Ankastre mesnet içinde yer alacak kirişin kısımlarının da belirgin olması açısından ilgili kısımlar geometride ayrılarak modellenmiştir.

4.2.2. Malzeme Modellerinin Oluşturulması

Nümerik modelleme kapsamında malzeme modelleri doğrusal olmayan davranışı temsil etmesi açısından plastik davranışlar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Beton için beton hasar plastisite malzeme modeli kullanılmıştır (Concrete Damaged Plasticity). BHP modeli numune üretiminde alınan betonun laboratuvarındaki basınç ve çekme testleri sonuçlarından elde edilen verilerle oluşturulmuştur. BHP modeli betonun yükleme altında hasar mekanizmasını ve çatlak gelişimini gerçekçi açıdan tanımlayabilmek için büyük katkı sağlamaktadır. BHP modeli monotonik yükleme altında ilk olarak Lubliner ve arkadaşları (1989) tarafından önerilmiştir. Lee ve Fenves (1998) ise bu modeli dinamik ve çevrimsel yüklemeler için geliştirerek sunmuşlardır. Beton malzeme modülünde girilmesi gereken elastik özellikler yoğunluk, elastisite modülü ve poisson oranıdır. BHP model kapsamında girilmesi gereken akma yüzeyi parametreleri şunlardır (Hibbit ve ark.,2013);

- Dilasyon açısı (Ψ),
- akma yüzeyi eksantrisitesi (ϵ)
- Başlangıç eksenel basınç akma gerilmesinin başlangıç eksenel basınç gerilmesine oranı (f_{b0}/f_{c0})
- Çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranı (K),
- Viskozite (μ)

Dilasyon açısı (Ψ) olarak literatürdeki mevcut literatür çalışmalarında kullanılan değerler de dikkate alınarak parametrik olarak belirlenmeye çalışılmıştır. K değeri olarak $2/3$ alınırken f_{b0}/f_{c0} değeri ise 1.16 olarak alınmıştır. ABAQUS programında analiz aşamasında malzeme modellerinde, gerilme ve rijitlik değerlerinin giderek azalmasından ötürü yakınsama (convergence) problemi oluşmaktadır. Viskozite parametresinin 0'dan büyük bir değer olarak programa girilmesi sonucu malzemeye vizkoplastik regülasyon uygulanacağı anlamına gelmektedir (Hibbitt ve ark., 2013). Viskozite parametresi için ABAQUS programında varsayılan 0 değeri girilmiştir. Bu nedenle betonun basınç ve çekme davranışına ait parametreler girilmiştir. Şekil 4.4'de betonun basınç davranışı gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Betonun basınç davranışı (Hibbitt ve ark., 2013)

ABAQUS programında betonun basınç davranışı için girilen parametreler akma gerilmeleri ve bu gerilmelere bağlı olarak elde edilen inelastik birim şekil değiştirme değerleri girilmektedir. Grafikte inelastik davranış, akma anındaki gerilme ve deformasyon değerinden sonraki kısmı içindir. İnelastik şekil değiştirme değerleri denklem 4.1'den elde edilmektedir (Kamali, 2012). Gerilme değerleri denklem 4.2'e göre hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (4.1)$$

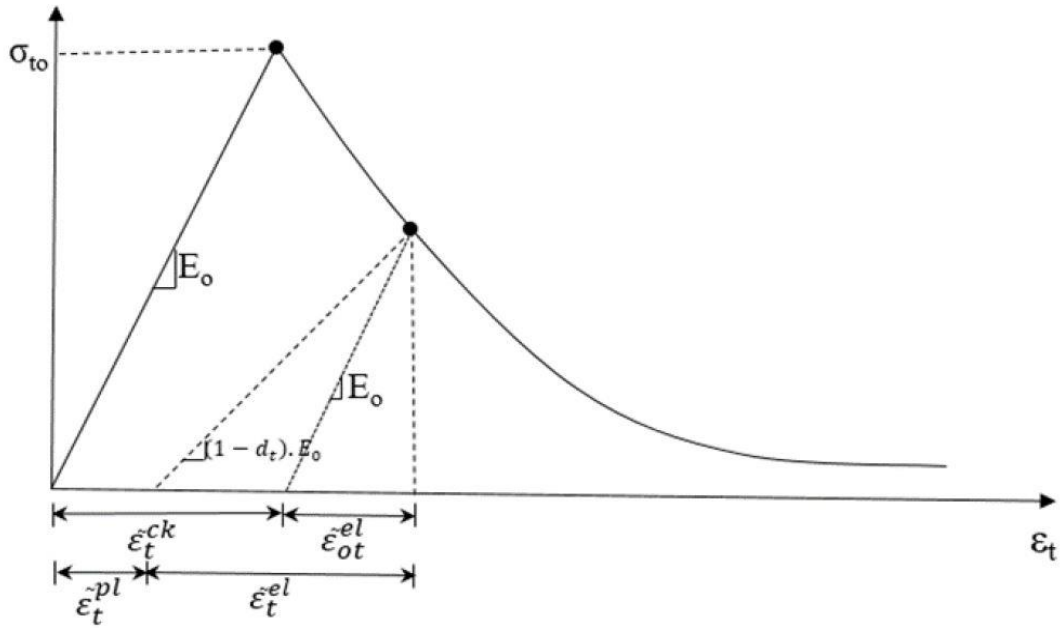
$$\sigma_c = (1-d_c) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (4.2)$$

İnelastik birim şekil değiştirme değerleri hesaplanarak programa girilirken plastik birim şekil değiştirme değerlerini program hesap etmektedir. Plastik birim şekil değiştirmeleri denklem 4.3'den hesaplanmaktadır. Denklem 4.4'de d_c betonun basınç yüklemesi altında hasar parametresini ifade etmektedir. Hasar parametresi Şekil 4.4'de belirtilen grafikteki maksimum gerilmeden sonra yüklemeye bağlı olarak elastik rijitlikteki azalmayı ifade etmektedir. Hasar parametresi betonun plastik davranışının program üzerinde gerçeğe yakın olarak aktarılması açısından büyük önem arz etmektedir. Hasar parametresi denklem 4.4'e göre hesaplanmaktadır (Kamali, 2012).

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (4.3)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c / E_0}{\sigma_c / E_0 + \varepsilon_c^{in} (1-b_c)} \quad (4.4)$$

Denklemden belirtilen b_c parametresi plastik birim şekil değiştirmenin inelastik şekil değiştirmeye oranını ifade etmektedir. Mevcut çalışmalar dikkate alındığında beton için bu değerin 0.5-0.7 aralığında olabileceği görülmüştür (Krätzig ve Pölling, 2004; Birtel ve Mark, 2006). Betonun basınç davranışı ile birlikte çekme davranışının özellikleri girilmektedir. Betonun çekme davranışı ile alakalı davranışı Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Çekme davranışı ile ilgili programa girilen parametreler şekil 4.5’den elde edilen verilerdir.



Şekil 4.5. Betonun çekme davranışı (Hibbitt ve ark., 2013).

Betonun çekme dayanımı denklem 4.6’ya göre hesaplanır. Programa girilen parametreler betonun çekme gerilme değerleri (σ_t) denklem 4.5’den inelastik birim şekil değiştirme değerleri (ε_t^{ck}) denklem 4.7’den ve betonun çekme etkisi altındaki hasar parametresi değerleri (d_t) denklem 4.8’den elde edilerek girilmektedir.

Denklem 4.6'dan elde edilen plastik birim şekil değiştirme değerlerini (ε_t^{pl}) programın kendisi hesap etmektedir. Çatlak genişliği denklem 4.11'den elde edilir. Denklemde yer alan I_{eq} mesh boyutunu ifade etmektedir.

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \sigma_{t0} / E_0 \quad (4.7)$$

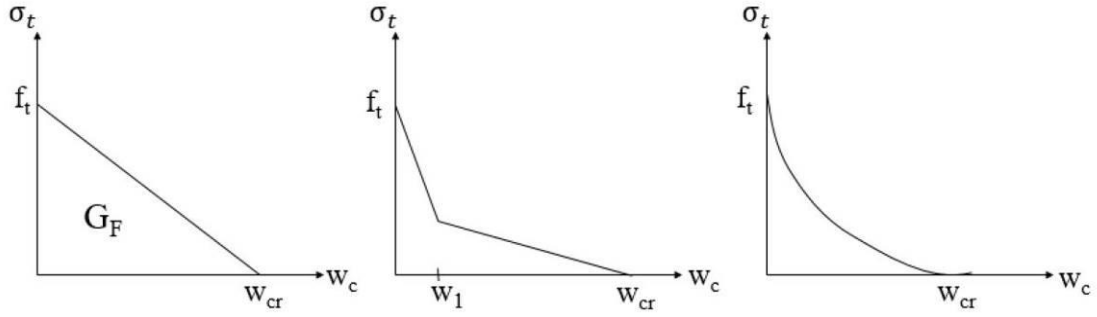
$$d_t = 1 - \frac{\sigma_{t0} / E_0}{\sigma_{t0} / E_0 + \varepsilon_t^{ck} (1 - b_t)} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t0} - w / I_{eq} \quad (4.9)$$

$$b_t = \frac{\varepsilon_t^{pl}}{\varepsilon_t^{ck}} \quad (4.10)$$

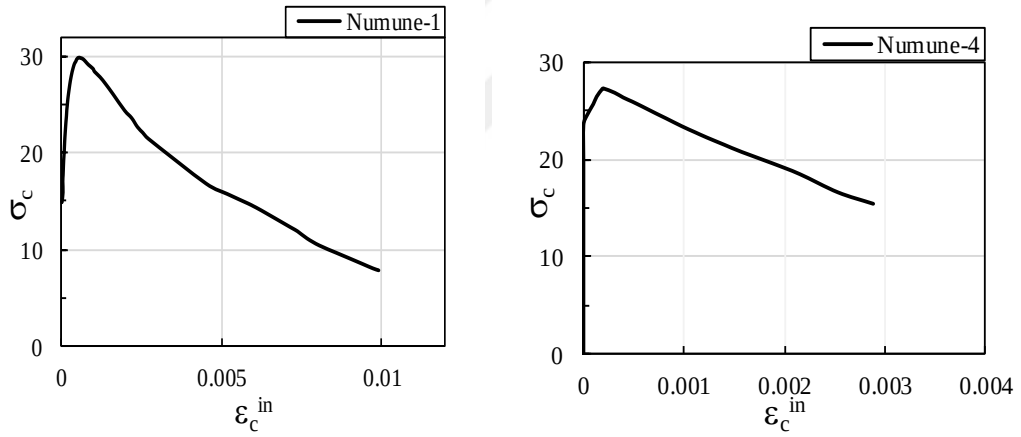
$$w = \left[\varepsilon_t^{pl} + \frac{\sigma_t \cdot d_t}{(1 - d_t) \cdot E_0} \right] \cdot I_{eq} \quad (4.11)$$

Denklem 4.8'de belirtilen b_t değeri için literatür çalışmalarında 0.1 ile 0.7 arasında değer alabileceği belirtilmiştir. Denklem 4.9'da ifade edilen formülde gösterilen w değeri çatlak genişliğini ifade ederken I_{eq} değeri ise mesh boyutunu ifade etmektedir. (Birtel ve Mark, 2006; Kamali, 2012). Betonun çekme rijitliğine ait lineer, bilineer ve üstel modellemeler Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

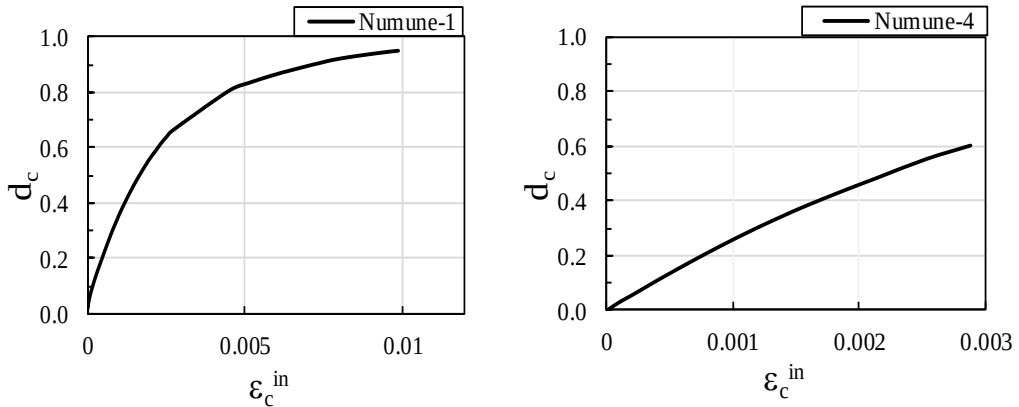


Şekil 4.6. Betonun çekme rijitliği modelleri (Earji ve ark., 2017)

Betonun basınç ve çekme davranışına ait ilgili parametrelerin tamamı girilerek beton malzemesine ait özellikler oluşturuldu. Deney kirişlerinin üretiminde alınan numunelerin basınç testlerinden elde edilen verilerden yararlanılarak basınç davranış grafikleri ve hasar parametreleri elde edilmiştir (Şekil 4.7-4.8).



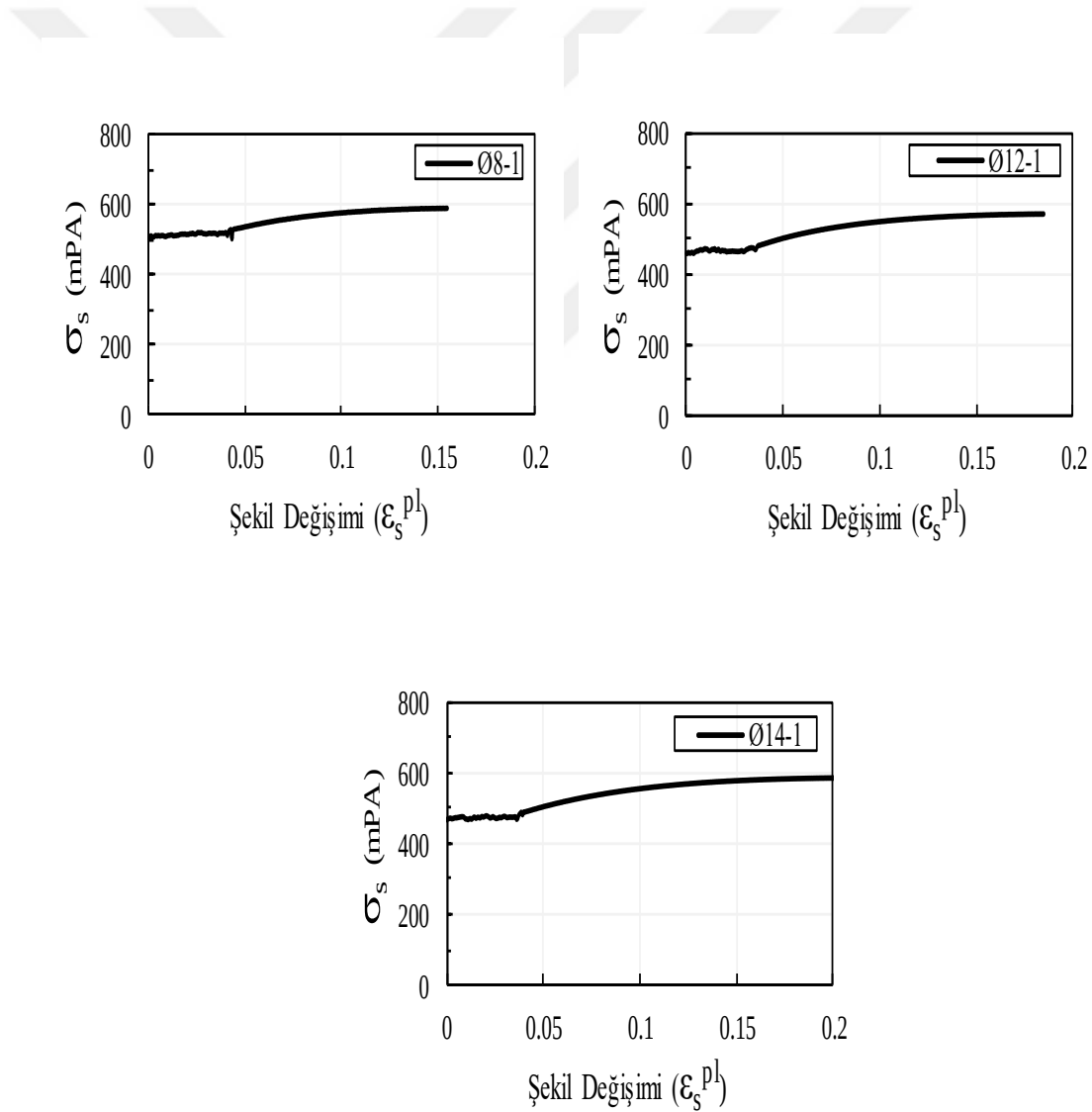
Şekil 4.7. Numunelerin beton basınç davranış grafikleri



Şekil 4.8. Numunelerin basınç etkisindeki hasar parametresi grafikleri

Donatıya ait malzeme davranışı programa girilirken donatılara ait laboratuvarda yapılan çekme testlerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme verileri kullanılmıştır. Donatı çeliği ile ilgili olarak programa girilen özellikler yoğunluk, elastisite modülü, poisson oranı ve gerilme-plastik birim şekil değiştirme değerleridir. Elastisite modülü basınç testlerinden elde edilen verilerden yararlanılarak programa girilirken poisson oranı için ise mevcut çalışmalardan yararlanılmıştır.

Laboratuvar ortamında donatıların çekme testi sonuçlarından elde verilerle oluşturulan ve programa girdilerinin belirtilmesi gereken gerilme-plastik birim şekil değiştirme grafikleri şekil 4.9’de gösterilmiştir.

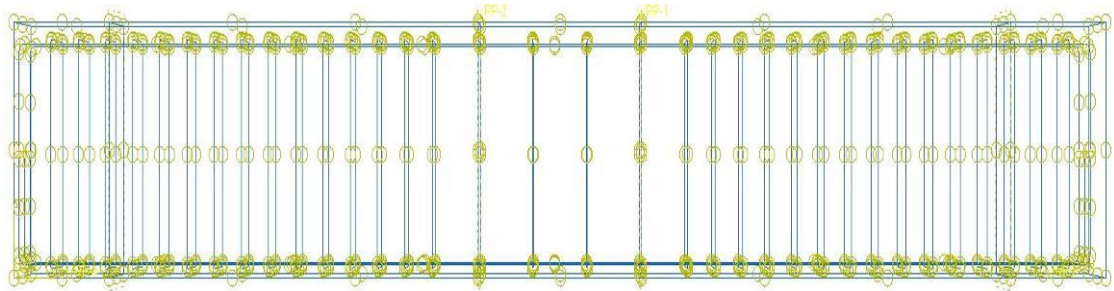


Şekil 4.9. Numunelerin basınç etkisindeki hasar parametresi grafikleri

Malzeme modeli ile alakalı beton ve çelik donatıya ait tüm bilgiler girildikten sonra bir malzeme modeli de çeliğin özelliklerini taşıyacak şekilde numuneye yükü aktaracak dairesel miller için oluşturulmuştur. Bu malzeme modeline sahip elemanlar deplasman yüklemesinin yapılacağı elemanlardır. Bu eleman için oluşturulan çelik malzemesinde sadece elastik özellikler girilmiştir (yoğunluk, elastisite modülü ve poisson oranı). Oluşturulan çelik için yoğunluk değeri 7.85 gr/cm^3 , elastisite modülü 200 GPa, poisson oranı ise 0.3 olarak girilmiştir. Deforme olması beklenmediğinden ötürü herhangi bir plastik deformasyon özelliği girilmemiştir.

4.2.3. Temas Yüzeylerinin Oluşturulması ve Donatı Beton Etkileşimi

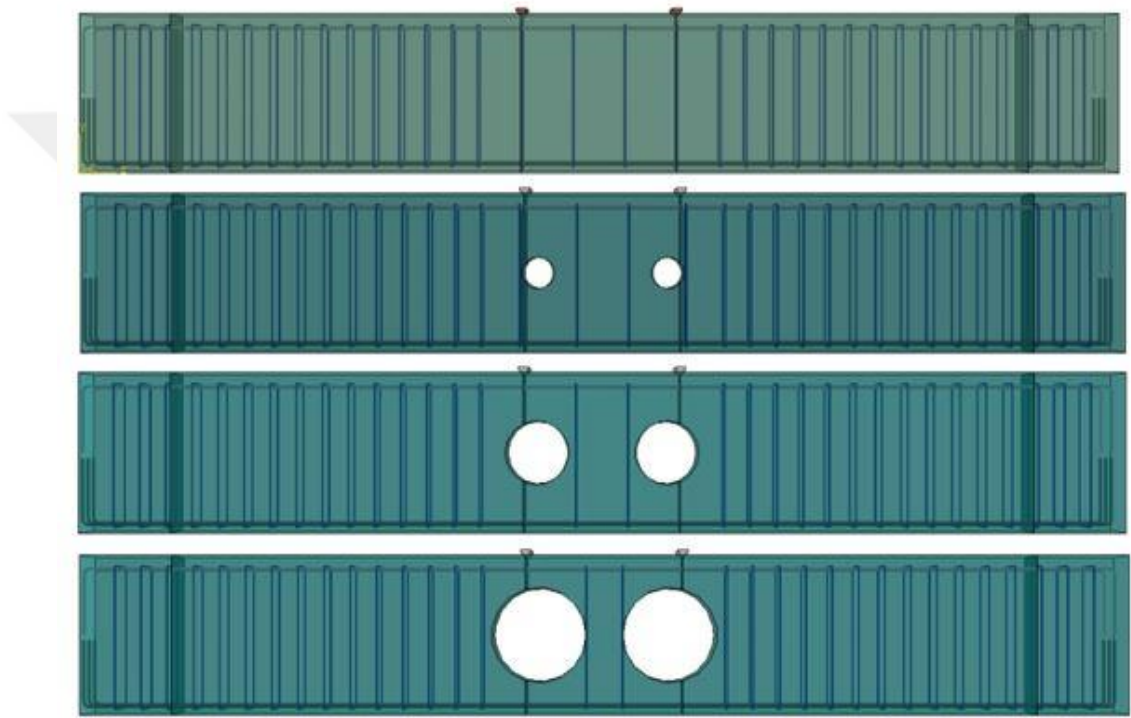
ABAQUS programında yapılan analizlerde yüzeyler ve elemanlar arasındaki etkileşimin oluşabilmesi için bağlantıların tanımlanması oldukça önemlidir. Bu doğrultuda ilk olarak oluşturulan etkileşim donatı-beton etkileşimidir. Donatının tamamının gömülü (embedded) olarak betonla etkileşimi oluşturulur. Donatının bu yöntemle betonun içerisine yerleştirilmesinin amacı yükleme altında birlikte çalışmasını sağlamaktır. Bu sayede donatının serbestlik dereceleri betonun serbestlik dereceleri ile sınırlandırılmış olup, beton ve donatı arasındaki aderans gerçeğe yakın olarak oluşturulur. (Hibbitt ve ark., 2013). Oluşan etkileşim Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Donatı-beton etkileşimi

Yükleme noktalarına yerleştirilen ve deplasmanın tanımlanacağı çelik miller ile kiriş temas edeceği yüzeyler arasında “tie constraint” model tekniği (bağ sınır şartı) seçilerek bağlantı oluşturulur. Her iki yükleme noktası için de bu bağlantılar oluşturulur. Bu bağlantılar oluşturularak temas eden yüzeylerin etkileşim içine girerek beraber hareket etmesi sağlanır. Yükleme deplasman dizisi tanımlanarak yapılacağı için mesnet noktalarına referans nokta ataması yapıldı. Referans noktaları ile kiriş alt yüzü arasında bağlantı çifti (coupling constraint) oluşturularak analiz sonrası reaksiyon kuvveti

okuması amaçlandı. Birbiri ile temas eden yüzeyler arasında yükleme bağı olarak sürtünme meydana gelecektir. Bu nedenle etkileşim menüsünden “contact” seçeneğinden “normal behavior” seçeneği için “hard contact” seçilerek yüzeylerin birbiri ile tam etkileşime girmesi sağlanır. “Tangetial behavior” seçeneğinden de “penalty” tanımlanarak “friction coefficient” (sürtünme katsayısı) 0.35 olacak şekilde tanımlanarak elemanların etkileşimleri tamamlanmıştır. Kiriş numunelerinin sonlu eleman modelleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Kiriş numunelerinin sonlu eleman modelleri

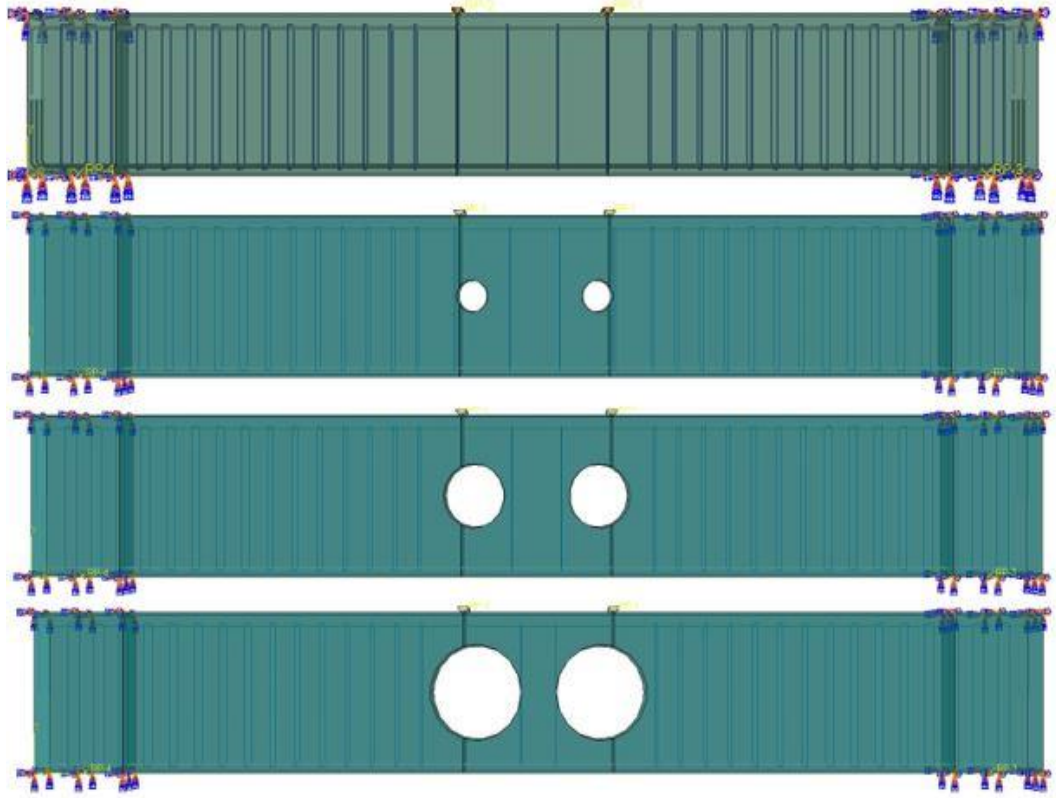
4.2.4. Analiz Yönteminin Belirlenmesi

ABAQUS programı kapsamında analiz olarak tercih edilen static ve dynamic olarak iki yöntem mevcuttur. Bu iki yöntemde kendi içinde explicit (açık) ve implicit (kapalı) olmak üzere iki ayrı genel çözüm yöntemi bulundurulur. Explicit yöntemi genellikle çarpma etkisinde maruz kalmış aşamalı olarak zarar görme, numunenin göçme mekanizmasına ulaşması gibi durumlarda kullanılır. Explicit yöntemlerde malzemenin sönüm ve atalet etkisi analize dahil edildiğinden, bu çalışma kapsamında daha uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Bağlantı elemanlarının oluşturulduğu birbiri ile temas eden yüzeylerin mevcut olduğu sistemlerde açık yöntem daha iyi sonuçlar vermektedir.

Sistem statik davranış sergilediğinden sistem kapalı yöntemlerden biri olan statik general yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz süresi olarak 20 saniye belirlenirken doğrusal olmayan davranış analize dahil edilmiştir. Adım boyutları çeşitli denemelerden sonra optimum olarak belirlenmiştir.

4.2.5. Sınır ve Yükleme Şartlarının Oluşturulması

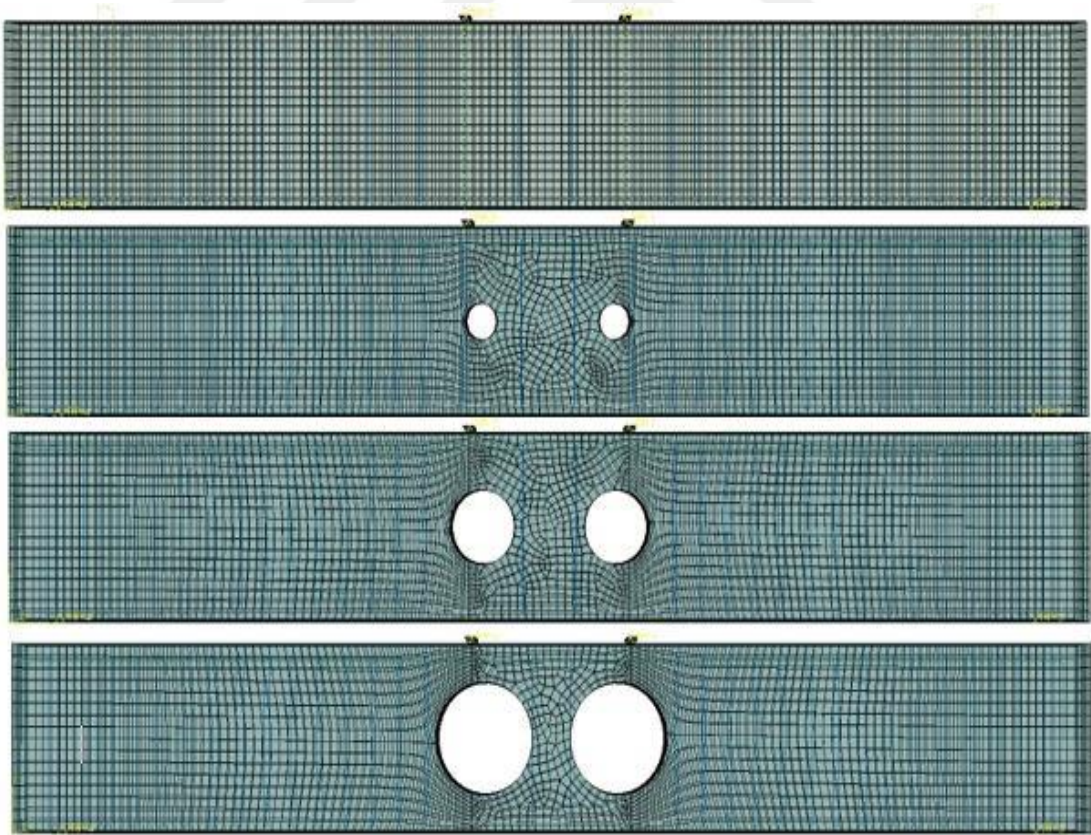
Analiz aşamasında deneysel çalışmayla yakınlık sağlanabilmesi açısından yükleme ve sınır şartlarının doğru oluşturulması çok önem arz etmektedir. Sayısal modellemelerde kiriş numuneleri deneysel çalışma ile aynı olacak şekilde ankastre olarak modellenmiştir. Ankastre mesnet bölgeleri deplasmanların ve dönmelerin oluşmayacağı şekilde modellenmiştir. Kiriş numunelerinin deneysel çalışmada olduğu gibi mesnet bölgesi içinde kalan yüzeyleri için “create boundary condition” seçeneğinden yüzeyler için ayrı ayrı ankastre mesnet özelliklerini sağlayacak özellikler belirtilmiştir. Düşey yükleme altında yan yüzeylere ankastre mesnet tanımlanmaması ve o yüzeylerde hareketin engellenmesi amacıyla herhangi bir hareketin oluşmaması için o yöndeki deplasmanlar ve dönmeler engellenmiştir.



Şekil 4.12. Ankastre mesnetli kiriş numunelerinin sonlu eleman modelleri

Yükleme çift noktalı olarak yüklem noktalarında modellenen plaka ile o plakanın merkezine atanan referans noktasının bağlantısından oluşan sete (coupling) deplasman verilerek oluşturulmuştur. Düşey ekseninde merkezine deplasman adımları amplitude olarak tanımlanmıştır. Amplitude ile step kısmında tanımlanan süre 20 saniye olarak belirlenmiştir. FEMA 461 yüklem prosedürüne göre her adımda bir önceki adımın 1.4 katı olacak şekilde deplasman adımları tanımlanmıştır.

Çözüm ağı (mesh) atamalarında tüm malzemelere element tipi tanımlaması yapılmıştır. Tüm malzemeleri 3D ataması yapılarak kiriş C3D8R olarak modellenmiştir. C3D8R 3 yer değiştirme serbestlik derecesine sahip 8 düğüm noktalı ve 1 azaltılmış integrasyon noktalı modellemeyi ifade etmektedir. Kiriş kübik sonlu eleman olarak çözümlenmiştir. Yüklem milleri ise kirişle aynı özelliklerde mesh boyutu daha yüksek olarak çözümlenmiştir. Donatılar ise T3D2 yani tek serbestlik derecesine sahip 2 düğüm noktalı 3D çubuk sonlu eleman olarak çözümlenmişlerdir.



Şekil 4.13. Kiriş numunelerinin mesh görüntüleri

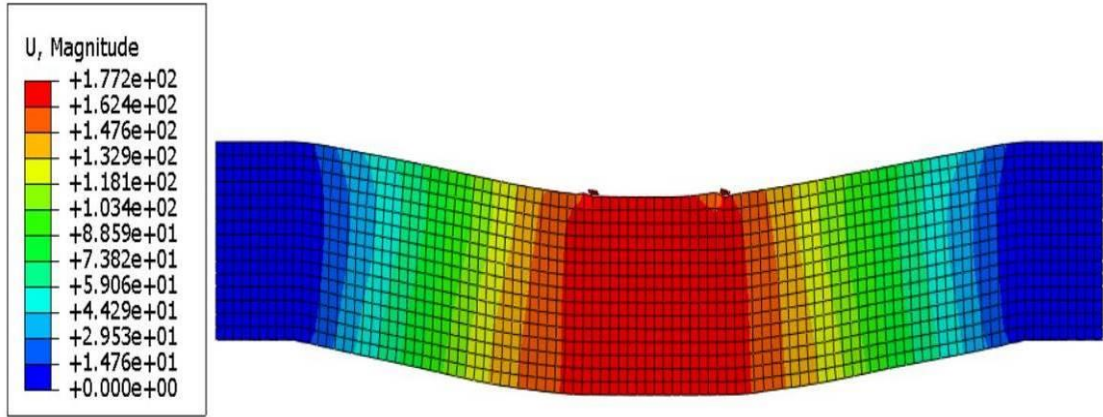
Analiz çıktıları içinde gerekli düzenlemeler yapılarak istenilen çıktı bilgileri oluşturulmuştur. Yük-deplasman grafikleri, numunelerin analiz sonuçlarına ait görüntüler ve verileri elde etmek amacıyla çıktı düzenlemeleri yapılmıştır.

4.3. Analiz Sonuçları

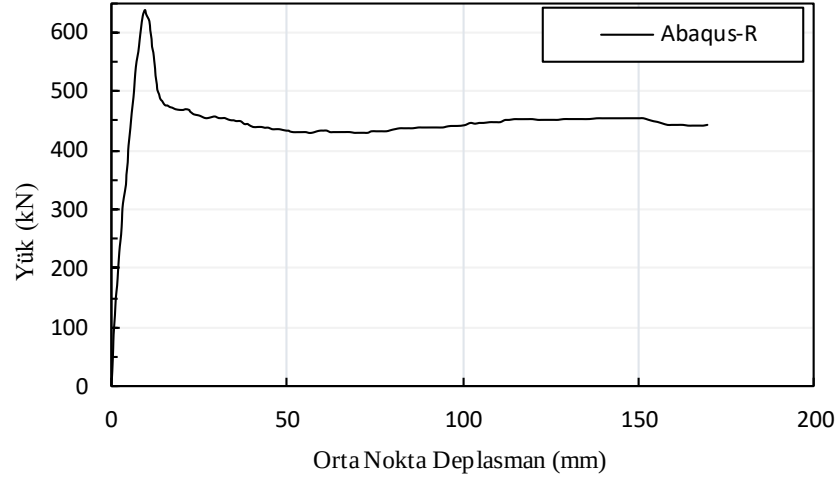
Tüm tip numunelere ait oluşturulan sayısal modellemeler ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizler sonucunda şu grafikler ve görünümeler elde edilmiştir.

4.3.1. Referans Numunesi Analiz Sonuçları

Referans numunesinin deplasman kontrollü yükleme yapılarak oluşturulan sonlu eleman analizi sonucunda göstermiş olduğu deplasman davranışı şekil 4.14'de gösterilmiştir. Şekil 4.15'de analiz sonucunda meydana gelen yük-deplasman grafiği gösterilmiştir. Mesnet bölgelerinde ankastre mesnetlenme koşulları oluşturulduğu için herhangi bir deplasman meydana gelmemiştir. Grafikten de görüleceği üzere numune akma yükünden sonra ani bir yük düşüşü gerçekleştirerek sünek davranış göstermiştir.

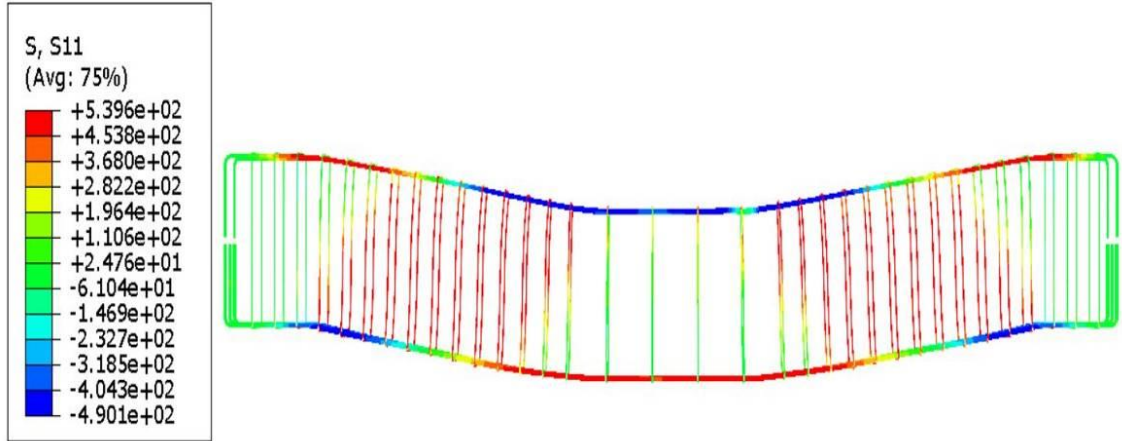


Şekil 4.14. Referans numunesinin sonlu eleman deplasman davranışı



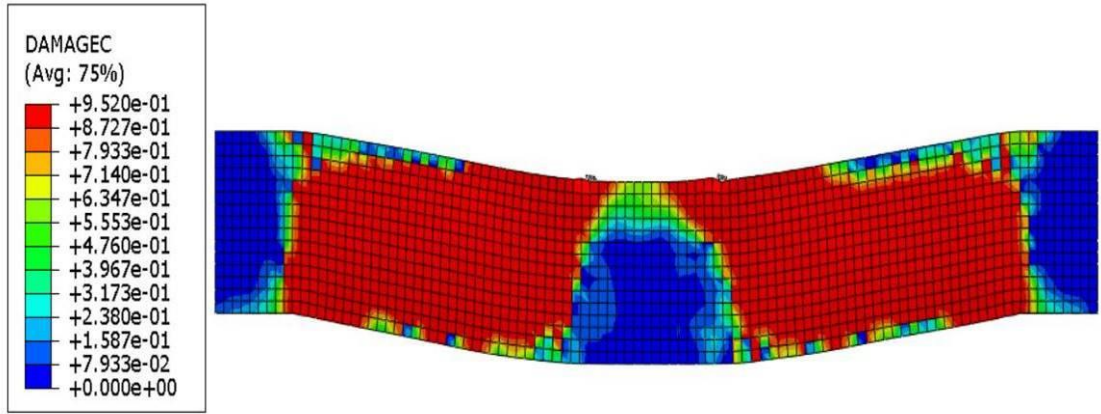
Şekil 4.15. Referans numunesinin sonlu eleman yük-deplasman grafiği

Referans numunesinin enerji tüketme kapasitesi 75564 kNmm'dir. Yükleme altında donatılarda oluşan gerilme dağılımı Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Eğilme davranışı hakim olduğu için çekme donatılarında açıklık ortasında meydana gelen gerilme değerleri büyüktür. Basınç donatılarında ise mesnet bölgelerindeki gerilmeler büyük değerlerdedir.



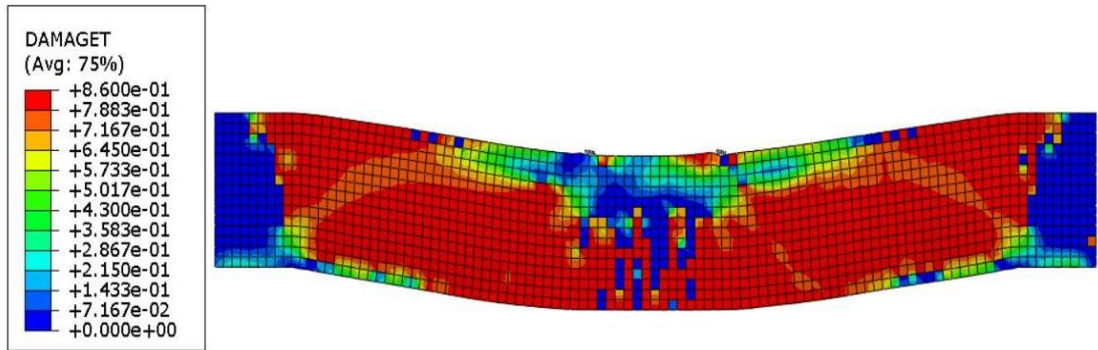
Şekil 4.16. Referans numunesinin donatılarının gerilme davranışı

Referans numunesinin betonda basınç etkisi altında oluşan hasar dağılımı Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Basınç etkisi altında açıklık ortasında kirişin alt bölümlerinde hasar dağılımı yoğun olarak gözlemlenmemiştir.



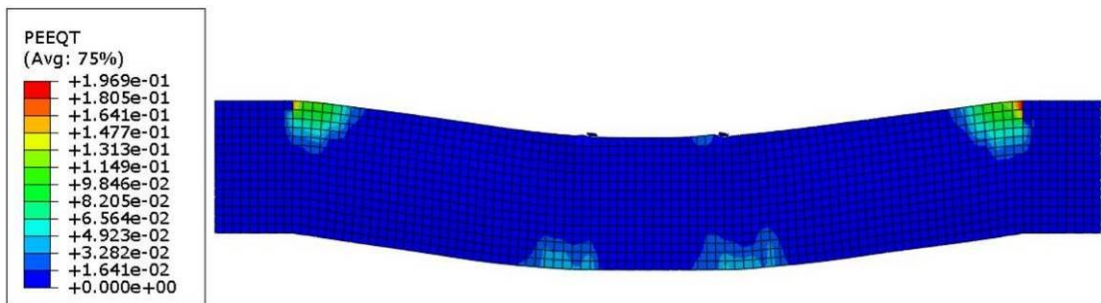
Şekil 4.17. Referans numunesinin basınç etkisi altında hasar dağılımı

Referans numunesinin betonda çekme etkisi altında oluşan hasar dağılımı Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Çekme etkisinde açıklık ortası kirişin basınç bölgesinde hasar dağılımı yoğun olarak görülmemektedir.



Şekil 4.18. Referans numunesinin çekme etkisi altında hasar dağılımı

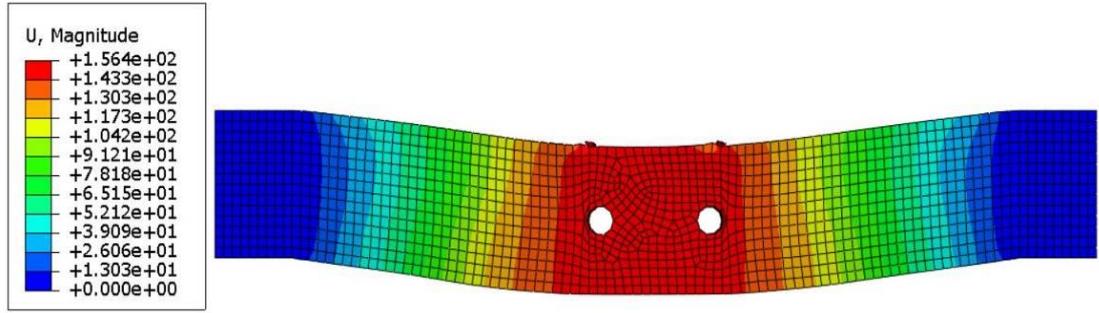
Referans numunesinin analizi sonucunda elde edilen eşdeğer çekme plastik birim şekil değiştirme davranışı (PEEQT) Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



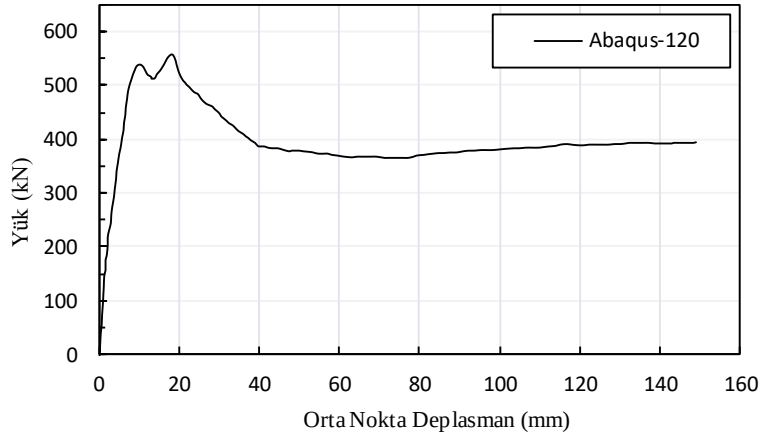
Şekil 4.19. Referans numunesinin PEEQT davranışı

4.3.2. % 20 Boşluklu Numunenin Analiz Sonuçları

% 20 boşluklu numunenin deplasman kontrollü yükleme yapılarak oluşturulan sonlu eleman analizi sonucunda göstermiş olduğu deplasman davranışı Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Şekil 4.21’de analiz sonucunda meydana gelen yük-deplasman grafiği gösterilmiştir. Mesnet bölgelerinde ankastre mesnetlenme koşulları oluşturulduğu için herhangi bir deplasman meydana gelmemiştir.

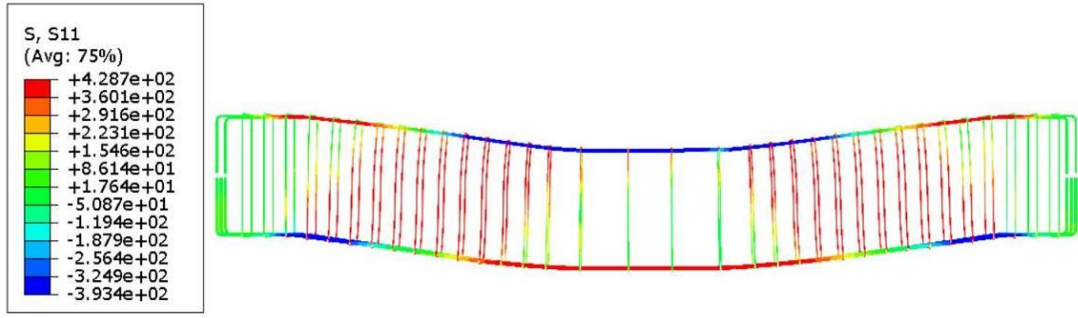


Şekil 4.20. %20 boşluklu numunenin sonlu eleman deplasman davranışı



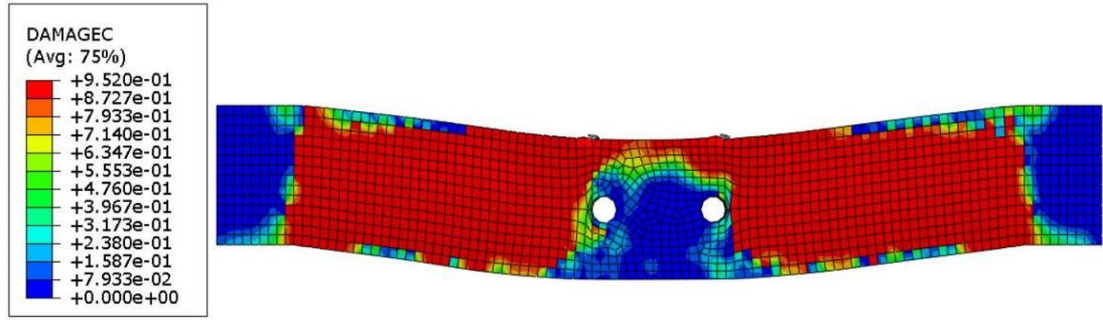
Şekil 4.21. %20 boşluklu numunenin sonlu eleman yük-deplasman grafiği

%20 boşluklu numunenin enerji tüketme kapasitesi 59856 kNmm’dir. Yükleme altında donatılarda oluşan gerilme dağılımı Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Eğilme davranışı hakim olduğu için çekme donatılarında açıklık ortasında meydana gelen gerilme değerleri büyüktür. Basınç donatılarında ise mesnet bölgelerindeki gerilmeler büyük değerlerdedir.



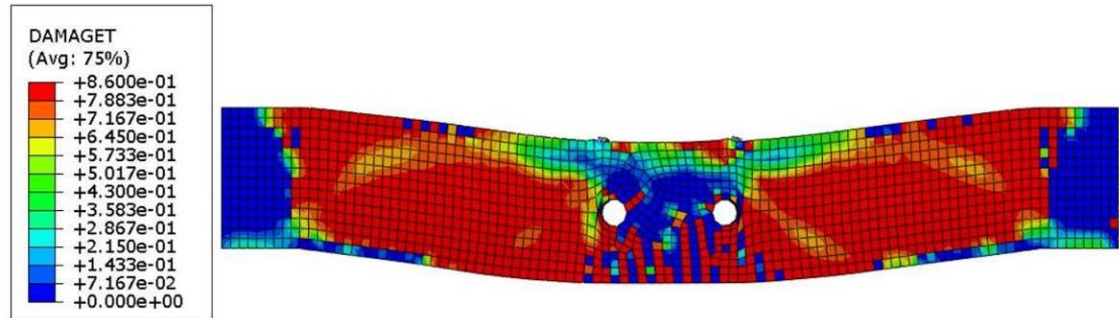
Şekil 4.22. %20 boşluklu numunenin donatılarının gerilme davranışı

%20 boşluklu numunenin betonda basınç etkisi altında oluşan hasar dağılımı Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



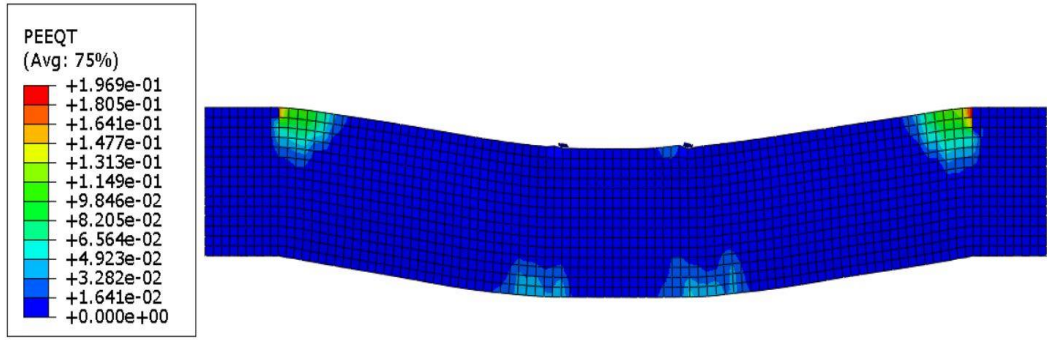
Şekil 4.23. %20 boşluklu numunenin basınç etkisi altında hasar dağılımı

%20 boşluklu numunenin betonda çekme etkisi altında oluşan hasar dağılımı Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



Şekil 4.24. %20 boşluklu numunenin çekme etkisi altında hasar dağılımı

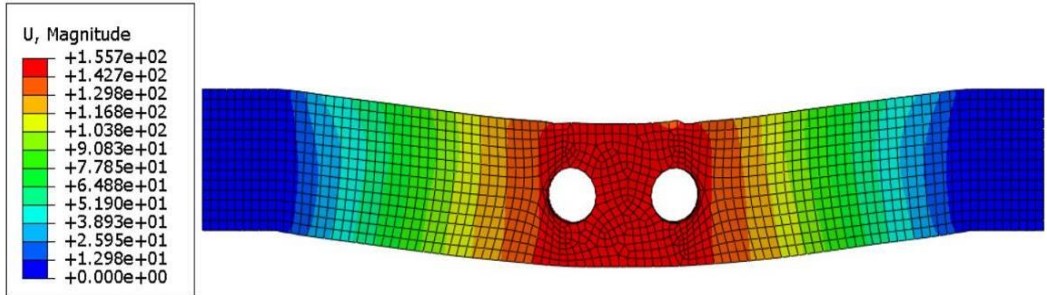
%20 boşluklu numunenin analizi sonucunda elde edilen eşdeğer çekme plastik birim şekil değiştirme davranışı (PEEQT) Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Plastik birim şekil değiştirme değerleri çatlakların yoğun olarak gözlemlendiği açıklık ortası kiriş alt bölümlerinde ve mesnet bölgelerinin kiriş üst kısımlarında yoğunlaşmıştır



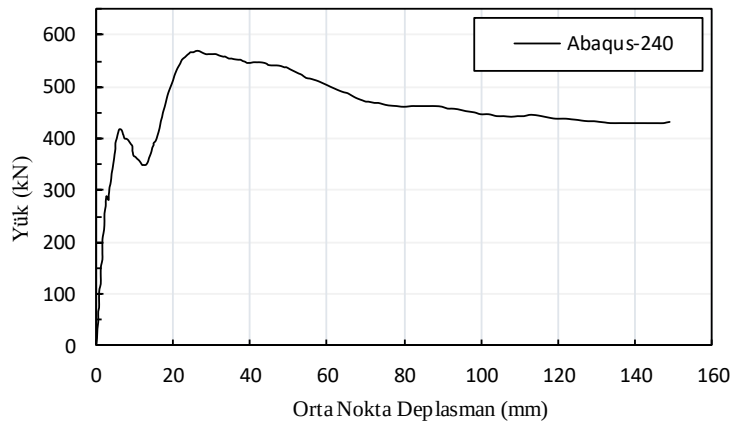
Şekil 4.25. %20 boşluklu numunenin PEEQT davranışı

4.3.3. % 40 Boşluklu Numunenin Analiz Sonuçları

%40 boşluklu numunenin deplasman kontrollü yükleme yapılarak oluşturulan sonlu eleman analizi sonucunda göstermiş olduğu deplasman davranışı Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Şekil 4.27'de analiz sonucunda meydana gelen yük-deplasman grafiği gösterilmiştir. Mesnet bölgelerinde ankastre mesnetlenme koşulları oluşturulduğu için herhangi bir deplasman meydana gelmemiştir. Numune akma bölgesinden sonra ani bir yük düşüşü gerçekleştirmiş maksimum yük kapasitesine ulaştıktan sonra sünek davranış göstermiştir.

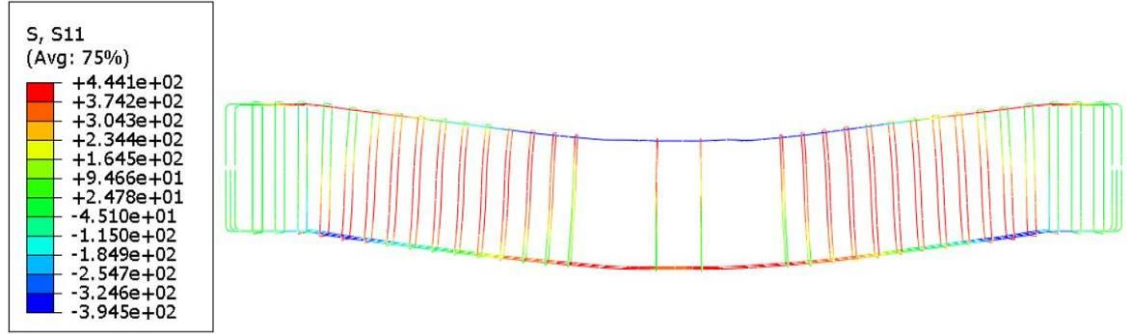


Şekil 4.26. %40 boşluklu numunenin sonlu eleman deplasman davranışı



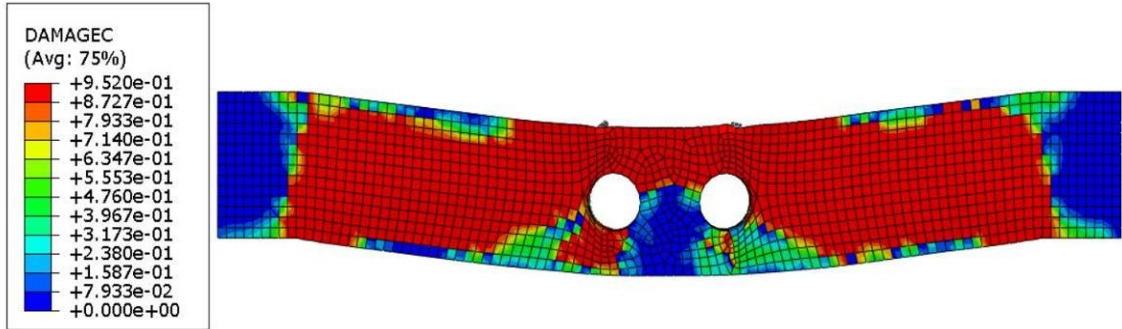
Şekil 4.27. %40 boşluklu numunenin sonlu eleman yük-deplasman grafiği

%40 boşluklu numunenin enerji tüketme kapasitesi 68868 kNmm'dir. Yükleme altında donatılarda oluşan gerilme dağılımı Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Eğilme davranışı hakim olduğu için çekme donatılarında açıklık ortasında meydana gelen gerilme değerleri büyüktür. Basınç donatılarında ise mesnet bölgelerindeki gerilmeler büyük değerlerdedir.



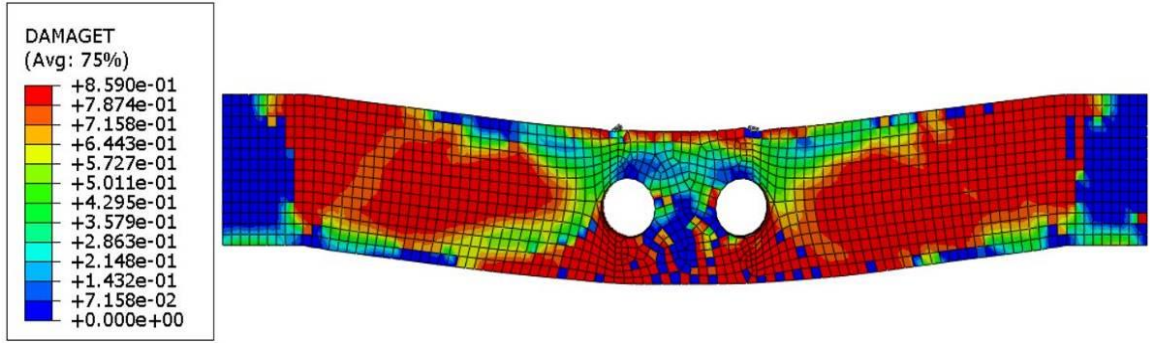
Şekil 4.28. %40 boşluklu numunenin donatılarının gerilme davranışı

%40 boşluklu numunenin betonda basınç etkisi altında oluşan hasar dağılımı Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



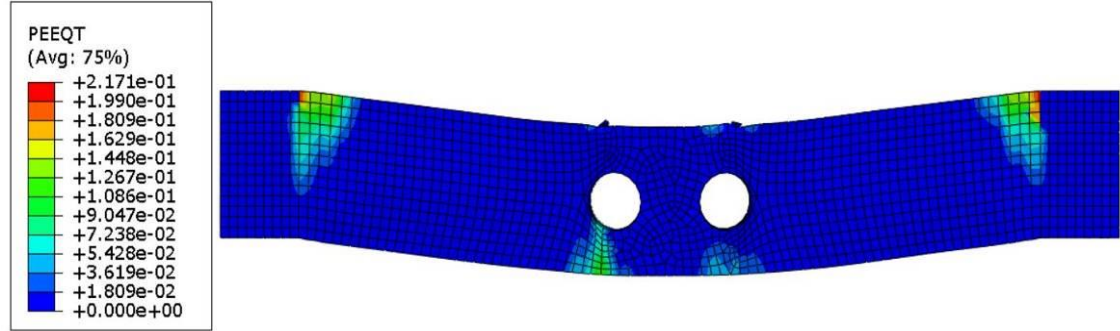
Şekil 4.29. %60 boşluklu numunenin basınç etkisi altında hasar dağılımı

%40 boşluklu numunenin betonda çekme etkisi altında oluşan hasar dağılımı Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30. %40 boşluklu numunenin çekme etkisi altında hasar dağılımı

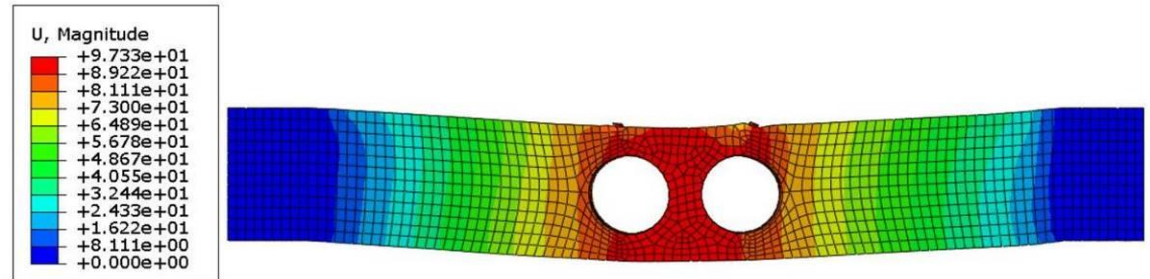
%40 boşluklu numunenin analizi sonucunda elde edilen eşdeğer çekme plastik birim şekil değiştirme davranışı (PEEQT) Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



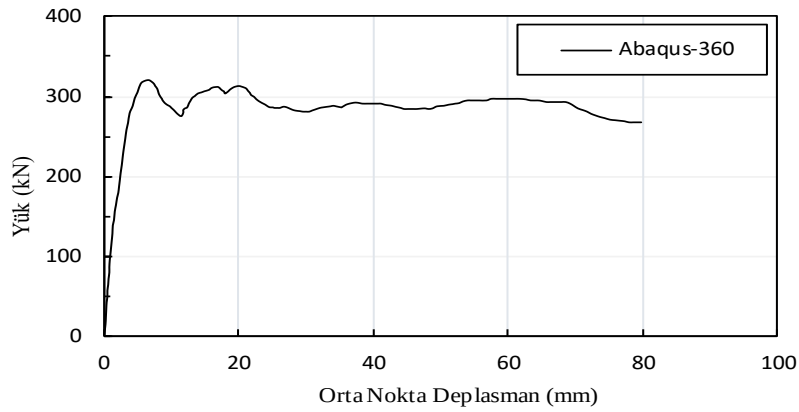
Şekil 4.31. %40 boşluklu numunenin PEEQT davranışı

4.3.4. %60 Boşluklu Numunenin Analiz Sonuçları

%60 boşluklu numunenin deplasman kontrollü yükleme yapılarak oluşturulan sonlu eleman analizi sonucunda göstermiş olduğu deplasman davranışı Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Şekil 4.33’de analiz sonucunda meydana gelen yük-deplasman grafiği gösterilmiştir.

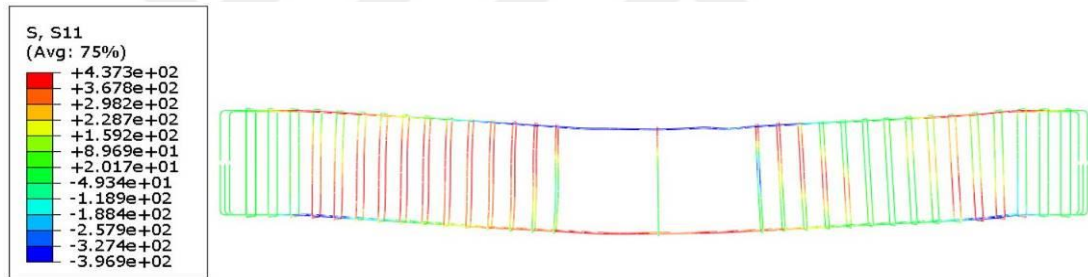


Şekil 4.32. %60 boşluklu numunenin sonlu eleman deplasman davranışı



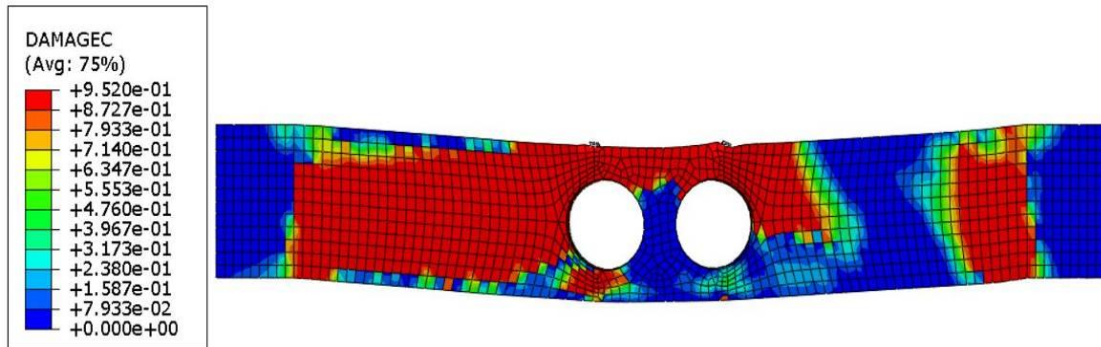
Şekil 4.33. %60 boşluklu numunenin sonlu eleman yük-deplasman grafiği

%60 boşluklu numunenin enerji tüketme kapasitesi 22664 kNmm'dir. Yükleme altında donatılarda oluşan gerilme dağılımı Şekil 4.34'de gösterilmiştir.



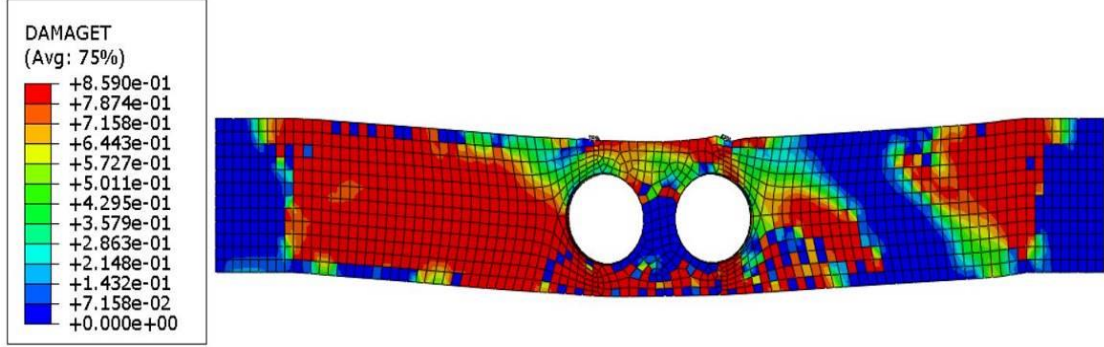
Şekil 4.34. %60 boşluklu numunenin donatılarının gerilme davranışı

%60 boşluklu numunenin basınç etkisi altında betonda oluşan hasar dağılımı Şekil 4.35'de gösterilmiştir.



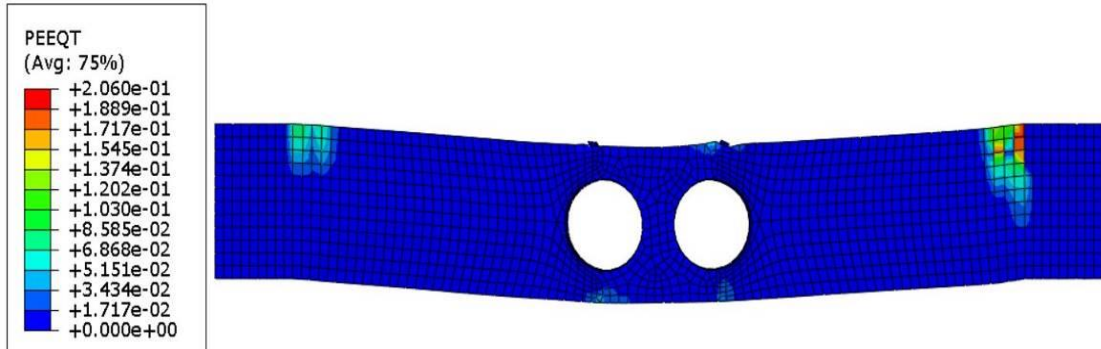
Şekil 4.35. %60 boşluklu numunenin basınç etkisi altında hasar dağılımı

%60 boşluklu numunenin çekme etkisi altında betonda oluşan hasar dağılımı Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.36. %60 boşluklu numunenin çekme etkisi altında hasar dağılımı

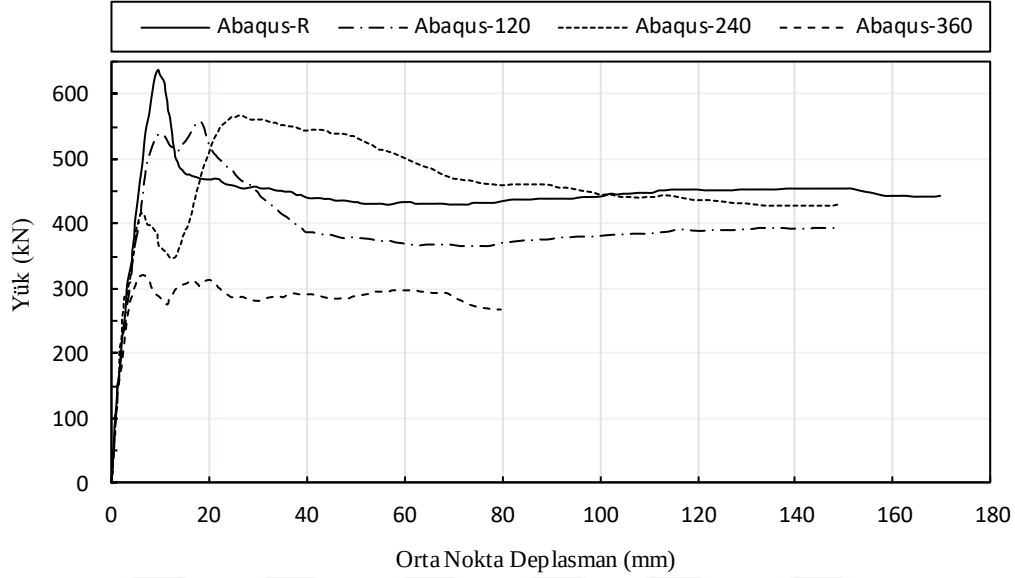
%60 boşluklu numunenin analizi sonucunda elde edilen eşdeğer çekme plastik birim şekil değiştirme davranışı (PEEQT) Şekil 4.37'de gösterilmiştir.



Şekil 4.37. %60 boşluklu numunenin PEEQT davranışı

4.3.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tüm numune tiplerine ait sayısal modellemeler ve analizler sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 4.38’de gösterilmiştir.



Şekil 4.38. Tüm numunelere ait nümerik yük-deplasman grafikleri

Şekilden de görüleceği üzere tüm tip numuneler elastik bölgede benzer davranış göstermişlerdir. Elastik bölgede en fazla yük kapasitesine referans numunesi ulaşmıştır. Referans numunesi 638 kN seviyesinde akma bölgesine ulaşırken yaptığı deplasman değeri 9.55 mm’dir. % 20 boşluklu numune 540 kN seviyesinde akma değerine ulaşırken yaptığı deplasman değeri 9.72 mm’dir. % 40 boşluklu numune 416 kN seviyesinde akma değerine ulaşırken yaptığı deplasman değeri 6.42 mm’dir. % 60 boşluklu numune 320 kN seviyesinde akma değerine ulaşırken yaptığı deplasman değeri 6.67 mm’dir. Tüm numunelerde akma bölgesi sonrasında ani bir kırılma davranışı gözlemlenirken bu davranış sonrasında numuneler üzerinde plastik davranış hakimdir. Elastik bölgedeki yük kapasitelerinin plastik bölgeye göre daha yüksek olup ani bir düşüş yaşanmasında ankastre mesnetlenmenin etkisi olduğu kanısına varılmıştır. Boşluk yüzdesi arttıkça akma yükünde ve plastik bölgedeki yük kapasitelerinde azalma meydana gelmiştir. Numunelerin yükleme altındaki yapmış oldukları deplasman değerleri de boşluk yüzdesinin artışına bağlı olarak azalmıştır. Genel olarak referans, %20 boşluklu ve %40 boşluklu numuneler benzer davranış gösterirken, %60 boşluklu numune kapasitesinde ve deplasman değerlerinde ciddi azalmalar meydana gelmiştir.

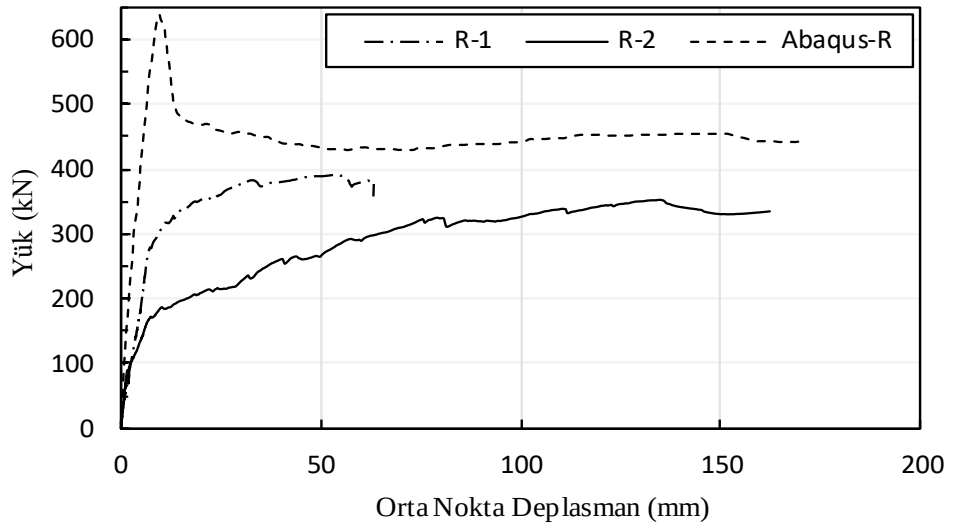
5. BÖLÜM

DENEYSEL ve NÜMERİK SONUÇLAR

Deneyisel çalışmada $4 \times 2 = 8$ numune teste tabi tutulmuştur. Nümerik çalışmada tip numunelere ait tek analiz yapılarak toplamda 4 sonlu eleman modeli oluşturularak analiz edilmiştir. Her bir tip numuneye ait deneyisel ve nümerik çalışmalar karşılaştırılmıştır.

5.1. Referans Numunelerinin Deneyisel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması

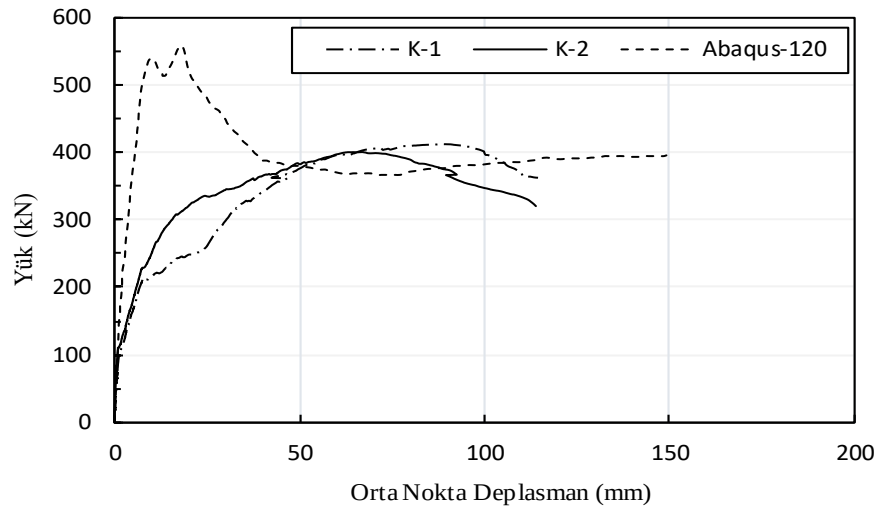
Referans numunelerine ait 2 deneyisel ve 1 nümerik çalışmadan elde edilen yük-orta nokta deplasman grafikleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Deneyisel numune sonuçları ile nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Nümerik analizin deneyisel sonuçlara oranla akma yükünün ve ortalama yük kapasitesinin daha fazla olduğu görülmektedir. Nümerik analizin enerji tüketme kapasitesinin de deneyisel sonuçlara oranla R-2 numunesinden %48,6 daha fazladır.



Şekil 5.1. Referans numunelerinin deneyisel ve nümerik yük-deplasman grafikleri

5.2. %20 Boşluklu Numunelerin Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması

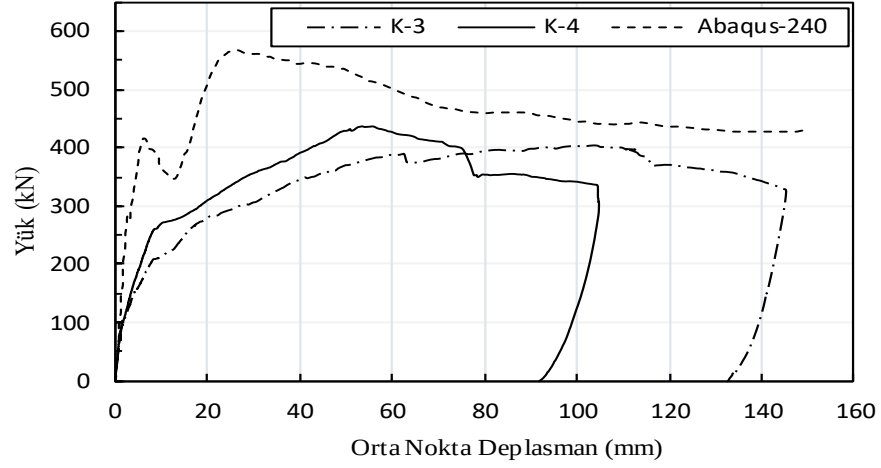
%20 boşluklu numunelere ait 2 deneysel ve 1 nümerik çalışmadan elde edilen yük-orta nokta deplasman grafikleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Deneysel numune sonuçları ile nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Nümerik analizin deneysel sonuçlara oranla akma yükünün ve ortalama yük kapasitesinin daha fazla olduğu görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi akma bölgesinden sonra deneysel ve nümerik sonuçlar benzer davranış göstermiştir. Nümerik analizin enerji tüketme kapasitesinin de deneysel sonuçların ortalamasına oranla %34.27 daha fazladır.



Şekil 5.2. %20 boşluklu numunelerin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri

5.3. %40 Boşluklu Numunelerin Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması

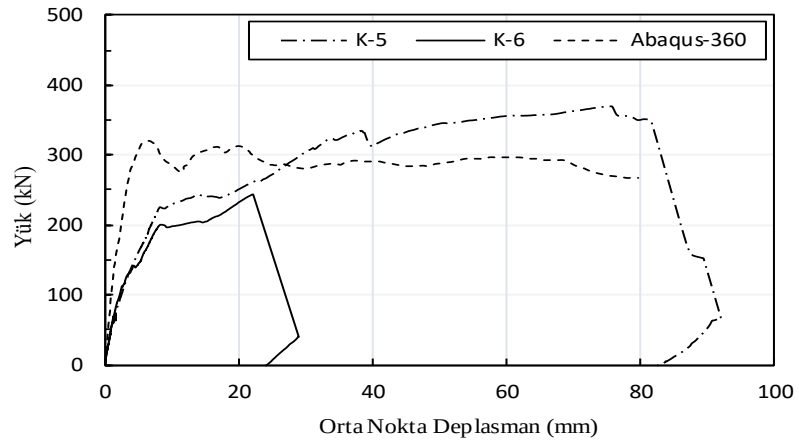
%40 boşluklu numunelerine ait 2 deneysel ve 1 nümerik çalışmadan elde edilen yük-orta nokta deplasman grafikleri Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Deneysel numune sonuçları ile nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elastik bölgede Nümerik analizin deneysel sonuçlara oranla akma yükünün ve ortalama yük kapasitesinin daha fazla olduğu görülmektedir. Nümerik analizin enerji tüketme kapasitesinin de deneysel sonuçlara oranla K-3 numunesinden %28.34 daha fazladır. K-3 ve K-4 numunesi benzer davranış gösterirken K-4 numunesi daha fazla deplasman yapmıştır.



Şekil 5.3. %40 boşluklu numunelerin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri

5.4. %60 Boşluklu Numunelerin Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması

%60 boşluklu numunelere ait 2 deneysel ve 1 nümerik çalışmadan elde edilen yük-orta nokta deplasman grafikleri Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Deneysel numune sonuçları ile nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. K-5 numunesinin nümerik sonuçlara oranla akma yükü daha düşük değerlerdedir. K-5 numunesinin ortalama yük kapasitesi nümerik analizden daha yüksek değerlerdedir. K-5 numunesinin enerji tüketme kapasitesi nümerik analiz elde edilen enerji tüketme kapasitesinden fazladır. K-6 numunesinde boşluğun basınç bölgesine yakın oluşturulmasından kaynaklı et kalınlığının yetersiz gelmesi sebebiyle diğer sonuçlara oranla yük kapasitesi ve enerji tüketme miktarı daha düşük çıkmıştır. Nümerik analizin enerji tüketme kapasitesi deneysel sonuçlara oranla K-5 numunesinden %15.74 daha azdır.



Şekil 5.4. %60 boşluklu numunelerin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri

6. BÖLÜM

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında açıklık ortasında boşluk bulunduran betonarme kirişlerin davranışı deneysel ve nümerik olarak ortaya konulmaya çalışılmıştır. 4 tip numunenin deneysel olarak laboratuvarında 4 noktalı olarak eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Aynı özelliklere sahip olacak şekilde numuneler sonlu elemanlar programı ABAQUS yardımıyla da nümerik olarak analiz edilmiştir.

Deneysel çalışmada 2 adet referans numune olmak üzere toplamda 8 adet numune üretilmiştir. Boşluklu numuneler kiriş yüksekliğinin %20, %40 ve %60 oranında her oran için 2 adet olmak üzere üretilmiştir. Deneysel çalışmada betonarme kirişlerin yapılarıdaki gerçek davranışının sağlanması amacıyla mesnetlenme şekli ankastre olarak oluşturulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

İlk çatlağın görüldüğü yükün tüm numunelerde benzer aralıkta ve 100-140 kN seviyelerinde oluştuğu gözlemlenmiştir. İlk çatlağın oluştuğu anda orta nokta deplasman değeri 2-3.5 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Akma anındaki yük değerleri K-6 numunesi dışında 200 kN üzerindedir. Referans numunelerinin yaptığı kalıcı deplasman ortalaması 105 mm'dir. Referans numunelerinin ortalama yük kapasitesi 371 kN'dur. Teorik yük kapasitesi 335.8 kN olarak hesaplanmıştır Referans numunelerinin ortalama yük kapasitesi teorik yük kapasitesinden % 9.5 fazladır. %20 boşluk oranına sahip K-1 ve K-2 numunelerinin yaptığı ortalama kalıcı deplasman değeri 119 mm'dir. K-1 ve K2 numunelerinin ortalama yük kapasitesi 407.5 kN'dur.

K-1 ve K-2 numunelerinin ortalama yük kapasitesi teorik yük kapasitesinden % 21.3 daha fazladır. % 40 boşluk oranına sahip K-3 ve K-4 numunelerinin yaptığı ortalama kalıcı deplasman değeri 112.55 mm'dir. K-3 ve K-4 numunelerinin ortalama yük kapasitesi 420.5 kN'dur. Ortalama yük kapasiteleri teorik yük kapasitesinden % 25.2 fazladır. % 60 boşluk oranına sahip K-5 ve K-6 numunelerinin yaptığı kalıcı deplasman değeri 53.77 mm'dir. K-5 ve K-6 numunelerinin ortalama yük kapasitesi 306.6 kN'dur. Ortalama yük kapasiteleri teorik yük kapasitesinden % 8.7 oranında daha azdır. K-6 numunesinde boşluklar üretim esnasındaki aksaklık nedeniyle basınç bölgesine çok yakın oluşturulmuştur. Et kalınlığının yetersiz olması sebebiyle nihai yük kapasitesi düşük çıkmıştır.

Referans numunelerinin enerji tüketme kapasiteleri ortalaması 36923 kNmm'dir. % 20 boşluklu K1 ve K-2 numunelerinin enerji tüketme kapasite ortalamaları 44578.9 kNmm, K-3 ve K-4 numunelerinin enerji tüketme kapasite ortalamaları 45904.2 kNmm, K-5 ve K-6 numunelerinin enerji tüketme kapasite ortalamaları 16024 kNmm'dir.

Deplasman değerleri R-2 numunesinde en yüksek değer alırken boşluk oranı arttıkça deplasman değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Yük kapasitesinde ise referans, %20 boşluklu ve % 40 boşluklu numunelerde boşluk oranının artmasına bağlı olarak azalma meydana gelmezken, %60 boşluğa sahip numunelerde yük taşıma kapasitesinde azalma meydana gelmiştir. Eğilme bölgesindeki boşluk oranının artmasının yük taşıma kapasitesinde ciddi azalmalar oluşturmadığı ama deplasmanda azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir.

Referans ,%20 boşluklu ve %40 boşluk oranına sahip numunelerin yaptıkları deplasman değerleri, yük kapasiteleri, enerji tüketme miktarları yakınlık göstermektedir. Kiriş davranışında %60 oranında boşluklu numuneler için ciddi azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Eğilme bölgesinde bırakılan boşluk oranının %40 dan fazla olması durumunda kirişin taşıma kapasitesi ve süneklik özelliklerinde ciddi azalmaların meydana geldiği tespit edilmiştir.

Analitik çalışmada 4 tip numune ABAQUS programında ankastre mesnetli olarak modellenmiştir. Programda, malzeme modelinde deneysel çalışmalarda elde edilen basınç ve çekme testleri sonucundan elde edilen veriler kullanılarak beton ve donatı malzeme modelleri oluşturulmuştur. Gerekli temas yüzeyleri ve bağlantı elemanları

oluşturularak donatı-beton etkileşimi ve yükleme noktaları ile kiriş arasındaki etkileşimler oluşturulmuştur. Analiz yöntemi olarak “Statik, General” çözüm yöntemi kullanılmıştır. Analitik çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Nümerik analizi yapılan 4 tip numune de deneysel oranla akma yükü ve maksimum yük kapasitesinde artış meydana gelmiştir. 4 tip numunenin elastik bölge davranışı benzerdir. Elastik bölge sonrası numunelerin tamamı sünek davranış göstermiştir. Referans, %20 ve %40 boşluklu numuneler genel olarak benzer davranış gösterirken %60 boşluklu numunelerde yük kapasitesinde, deplasman değerlerinde ve enerji tüketme kapasitesinde ciddi azalmalar meydana gelmiştir.

Çalışma sonucunda, boşluk oranlarının artması süneklilikte belirli bir boşluk yüzdesine kadar artışa sebebiyet vermiştir. Özellikle kiriş derinliğine göre dairesel boşluk yüksekliğinin %40’ın üzerinde olması durumunda süneklilik azalmış ve davranışta ani kırılmalar gerçekleşmiştir. Boşluk üzerindeki et kalınlığının kiriş yüksekliğinin %20’sinden fazla tutulması betonarme davranış için önemlidir. ABAQUS sonlu elemanlar programında nümerik sonuçlarda değerlendirildiğinde, boşluk yüksekliğinin kiriş yüksekliğinin %40’ından fazla olmasında ani kırılmalar gelişmektedir. Benzer şekilde boşluk üzeri et kalınlığının kiriş yüksekliğinin %20’sinden fazla olması, donatı ve betondaki gerilme yığılmalarını azaltmaktadır. Betonarme kirişlerde boşluk bırakılması durumunda uygun tasarımın yapılması ve önerilen değerlerinde sağlanması, çalışma sonucunda tasarım için önerilmektedir.

6.2. Öneriler

Literatürde ve bu tez kapsamında yapılan deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda gelecek çalışmalar için yapılan öneriler aşağıda özetlenmiştir.

Ankastre mesnet koşulu sağlanarak boşluk yüzdeleri çeşitlendirilerek deneysel çalışmalar artırılabilir. Eğilme bölgesinde aynı boşluk yüzdelere sahip merkezleri arasındaki mesafe değiştirilerek üretilen numuneler üzerinden deneysel çalışmalar çoğaltılabilir. Boşluğun kesme bölgesinde değil de eğilme bölgesinde oluşturulması daha olumlu sonuçlar doğurduğu için kesme ve eğilme bölgesinde aynı geometride oluşturulacak boşluklar ve boşluk yüzdesi üzerinden çalışmalar ankastre mesnetlenme koşulu için çoğaltılabilir.

Nümerik çalışma kapsamında yapılan analiz yöntemi çeşitlendirilerek “Dynamic Explicit” yöntemi de kullanılarak analizler gerçekleştirilebilir. Boşluk oranı eğilme bölgesi için değiştirilerek analizler çeşitlendirilebilir. Eğilme bölgesindeki boşluk konumları sabit tutularak analizler mesnetlenme koşulu değiştirilerek sabit mesnet içinde incelenebilir. Malzeme modelindeki parametreler üzerinden değişiklik yaparak analizler çeşitlendirilebilir.

Yapı elemanlarının davranışına önemli ölçüde etki eden boşlukların herhangi bir analiz yapılmadan bırakılmaması gerekmektedir. Tasarım öncesi ve tasarım sonrası gerekli analizler yapıldıktan sonra ilgili tedbirler alınarak boşluklar yapı elemanında oluşturulmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Demiral T., 2018, Betonarme Kiriş Boşluklarının Davranışa Etkisinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 127.
2. Quaderi A., 2020, Eğilme Etkisindeki Büyük Dairesel Boşluklu Kirişlerin Davranışının Deneysel İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 65.
3. Jasim, W. A., Allawi, A. A., Oukaili, N. K. 2019. Effect of size and location of square web openings on the entire behavior of reinforced concrete deep beams. **Civil Engineering Journal**, 5(1), 209-226.
4. Smarzewski, P. (2019). Analysis of failure mechanics in hybrid fibre-reinforced high-performance concrete deep beams with and without openings. **Materials**, 12(1), 101.
5. Senthil, K., Gupta, A., Singh, S. P. 2018. Computation of stress-deformation of deep beam with openings using finite element method. **Advances in concrete construction**, 6(3), 245-257.
6. Shather, L. M., Hussein, S. N., Hasan, L. F. 2018. Theoretical evaluation of RC deep beam with web opening by using nonlinear finite element software [ABAQUS]. **Int. J. Sci. Eng. Res**, 9(5):413-421.
7. Hassan, H. M., Arab, M. and Ismail el-kassas, A. (2019). Behavior of high strength self compacted concrete deep beams with web openings. **Heliyon**, 5(4), e01524.
8. Smarzewski, P. (2018). Hybrid fibres as shear reinforcement in high-performance concrete beams with and without openings. **Applied Sciences**, 8(11), 2070-2084.
9. Osman, B. H., Wu, E., Ji, B., Abdulhameed, S. S. 2017. Repair of pre-cracked reinforced concrete (RC) Beams with openings strengthened using FRP sheets under sustained load. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, 11(1), 171-183.

10. Abdul-Razzaq, K. S., Ali, H. I., Abdul-Kareem, M. M. 2017. A new strengthening technique for deep beam openings using steel plates. **International Journal of Applied Engineering Research**, **12**(24), 15935-15947.
11. Saleh A, Hamad M, Elzeny S, Elwan SK, Deifalla A. 2017. The Behavior of RC Beam-Column Joint with Beam Reinforced Web Opening under Cyclic Loading Abstract: Introduction: **Research Significance and Previous Work Test Set-up**. **39**:191-200.
12. Mansur, M. A., Tan, K. H., Lee, S. L., 1985. Design method for reinforced concrete beams with large openings. In **Journal Proceedings**, 82 (4), 517-524.
13. Sayed, A.M. 2019. Numerical study using FE simulation on rectangular RC beams with vertical circular web openings in the shear zones. **Engineering Structures**, **198**, 109471.
14. Ashour, A.F., Rishi, G. 2000. Tests of reinforced concrete continuous deep beams with web openings. **Structural Journal**, **97**(3), 418-426.
15. Salama, A. E., Kassem, M. E., Mahmoud, A. A. 2018. Torsional behavior of T-shaped reinforced concrete beams with large web openings. **Journal of Building Engineering**, **18**, 84-94.
16. Mansur, M. A., Lee, Y. F., Tan, K. H., Lee, S. L. 1991. Tests on RC continuous beams with openings. **Journal of Structural Engineering**, **117**(6), 1593-1606.
17. Shoeib, A. E. K., Sedawy, A. E. S. 2017. Shear strength reduction due to introduced opening in loaded RC beams. **Journal of Building Engineering**, **13**, 28-40.
18. Tan, K. H., Mansur, M. A., Wei, W. 2001. Design of reinforced concrete beams with circular openings. **Structural Journal**, **98**(3), 407-415.
19. Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., Gemi, L., Arslan, M. H. 2020. Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. **Composite Structures**, **249**, 112561.

20. Tan, K. H., Mansur, M. A., Huang, L. M. 1996. Reinforced concrete T-beams with large web openings in positive and negative moment regions. **Structural Journal**, **93**(3), 277-289.
21. Mansur, M.A. 1992. Deflections of reinforced concrete beams with web openings. In **ACI Structural Journal**.
22. Abdul-Razzaq, K. S., Abdul-Kareem, M. M. 2018. Innovative use of steel plates to strengthen flange openings in reinforced concrete T-beams. In **Structures**, **16**, 269-287.
23. Daniel, J. J., Revathy, J. 2014. Experimental Investigation on flextural strength of Beams with Opening. **Int J Res Manage Tech (IJRMT)**, **4**(2), 141-143.
24. Hemzah, S. A., Alyhya, W. S., Hassan, S. A. 2020. Experimental investigation for structural behaviour of self-compacting reinforced concrete hollow beams with in-place circular openings strengthened with CFRP laminates. **In Structures** **24**, 99-106.
25. Herrera L., Lemnitzer A., 2014. Cyclic Performance of RC beams with web openings, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 25-29 August 2014, İstanbul, Turkey, 11.
26. Nie, X. F., Zhang, S. S., Teng, J. G., Chen, G.M. 2018. Experimental study on RC T-section beams with an FRP-strengthened web opening. **Composite Structures**, **185**, 273-285.
27. Yang, K. H., Eun, H. C., Chung, H. S. 2006. The influence of web openings on the structural behavior of reinforced high-strength concrete deep beams. **Engineering Structures**, **28**(13), 1825-1834.
28. Ahmed, A., Fayyadh, M. M., Naganathan, S., Nasharuddin, K. 2012. Reinforced concrete beams with web openings: A state of the art review. **Materials Design**, **40**, 90-102.
29. Nie, X. F., Zhang, S. S., Teng, J. G., Chen, G. M. 2018. Experimental study on RC T-section beams with an FRP-strengthened web opening. **Composite Structures**, **185**, 273-285.

30. Mansur, M. A., Tan, K. H., Wei, W. 1999. Effects of creating an opening in existing beams. **Structural Journal**, **96**(6), 899-905.
31. Arabzadeh, A., Karimizadeh, H. 2019. Experimental study of RC deep beams with opening and FRP composites installed by means of EBR and EBROG methods. **Construction and Building Materials**, **208**, 780-791.
32. Mansur, M. A., Paramasivam, P. 1984. Reinforced concrete beams with small opening in bending and torsion. In **Journal Proceedings**, 81 (2), 180-185.
33. Mohamed, A. R., Shoukry, M. S., Saeed, J. M. 2014. Prediction of the behavior of reinforced concrete deep beams with web openings using the finite element method. **Alexandria Engineering Journal**, **53**(2), 329-339.
34. Tan, K. H., Mansur, M. A. 1996. Design procedure for reinforced concrete beams with large web openings. **Structural Journal**, **93**(4), 404-411.
35. Aykac, B., Kalkan, I., Aykac, S., Egriboz, Y. E. 2013. Flexural behavior of RC beams with regular square or circular web openings. **Engineering Structures**, **56**, 2165-2174.
36. Elçi, H. 2005. Büyük boşluklu betonarme kirişlerin statik-betonarme analizi. **Türkiye Mühendislik Haberleri**, **50**(437), 17-24.
37. Shaaban, I. G., Zaher, A. H., Said, M., Montaser, W., Ramadan, M., Abd Elhameed, G. N. 2020. Effect of partial replacement of coarse aggregate by polystyrene balls on the shear behaviour of deep beams with web openings. **Case Studies in Construction Materials**, **12**, e00328.
38. S. Dünder B., 2008. Düzenli Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 124.
39. Herrera, L., Anacleto-Lupianez, S., Lemnitzer, A. 2017. Experimental performance of RC moment frame beams with rectangular openings. **Engineering Structures**, **152**, 149-167.
40. Yılmaz M.C., 2008. Düzenli Üçgen veya Dairesel Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 69 s.

41. Hawileh, R.A., El-Maaddawy, T. A., Naser, M. Z. 2012. Nonlinear finite element modeling of concrete deep beams with openings strengthened with externally-bonded composites. **Materials Design**, **42**, 378-387.
42. Nasser, K. W., Acavalos, A., Daniel, H. R. 1967. Behavior and design of large openings in reinforced concrete beams. **In Journal Proceedings**, **64** (1), 25-33).
43. Almusallam, T., Al-Salloum, Y., Elsanadedy, H., Alshenawy, A., Iqbal, R. 2018. Behavior of FRP-strengthened RC beams with large rectangular web openings in flexure zones: experimental and numerical study. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, **12**(1), 1-28.
44. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, 2019. <https://docplayer.biz.tr/119071340-Deprem-etkisi-altinda-binalarin-tasarimi-icin-esaslar.html> (Erişim: 23/02/2021).
45. TS500-2000, 2000. **Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
46. TSE, 2016. TS 708, Çelik- Betonarme için-Donatı Çeliği, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
47. Doğangün, A., 2019. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 844 s.
48. TSE. 2003. TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
49. TSE. 2002. TS EN 12390-6, Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
50. Ünal A., 2016. Sabit Dikdörtgen Kesitli Kirişlerin Farklı Mesnet Koşullarında Kesme Kapasitesinin Araştırılması. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya. 386 s.

51. Bostan S., 2017, Gövdesinde Geniş Boşluk Bulunan Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli. 81.
52. Ahmed A., Fayyadh M.M., Naganathan S., Nasharuddin K., 2012. Reinforced Concrete Beams with Web Openings: A State of The Art Review, **Materials and Design**, **40**(9): 90-102.
53. Jabbar S., Hejazi F., Mahmud H. M., 2016. Effect of an Opening on Reinforced Concrete Hollow Beam Web under Torsional, Flexural and Cyclic Loadings, **Latin America Journal of Solids and Structures**, **13**(8): 1576-1595.
54. Barney G.B., Corley W.G., Hanson J.M., Parmelee R.A., 1977, Behavior and Design of Prestressed Concrete Beams with Large Openings, **PCI Journal**, **22** (6): 32-61.
55. Abdalla H., Kenedy J.B., 1995. Dynamic Analysis of Prestressed Concrete Beams with Openings, **Journal of Structural Engineering**, **121**(7): 1058-1068.
56. Lui T.C., Chung K.F., 2003. Steel Beams with Large Web Openings of Various Shapes and Sizes: Finite Element Investigation, **Journal of Constructional Steel Research**, **59**(9): 1159-1176.
57. Ye, J. B., Cai, J., Zuo, Z. L., Chen, Q. J., Tang, X. L., Zhao, X. 2021. Numerical investigation on the shear behavior of prestressed concrete beams with small rectangular openings. **Structural Concrete**, **22**(2), 1100-1112.
58. Mansour, W. 2021. Numerical analysis of the shear behavior of FRP-strengthened continuous RC beams having web openings. **Engineering Structures**, **227**, 111451.
59. Nie, X. F., Zhang, S. S., Chen, G. M., Yu, T. 2020. Strengthening of RC beams with rectangular web openings using externally bonded FRP: Numerical simulation. **Composite Structures**, **248**, 112552.
60. Jabbar, D. N., Al-Rifaie, A., Hussein, A. M., Shubbar, A. A., Nasr, M. S., Al-Khafaji, Z.S. 2021. Shear behaviour of reinforced concrete beams with small web openings. **Materials Today: Proceedings**, **42**, 2713-2716.

61. Hassan, A., Atta, A. M., El-Shafiey, T. F. 2020. Restoration of the shear capacity for RC beams with web openings using precast SHCC plates. In **Structures**, **25**, 603-612.
62. Nie, X. F., Zhang, S. S., Yu, T. 2020. Behaviour of RC beams with a fibre-reinforced polymer (FRP)-strengthened web opening. **Composite Structures**, **252**, 112684.
63. Rahim, N. I., Mohammed, B. S., Al-Fakih, A., Wahab, M. M. A., Liew, M. S., Anwar, A., Amran, Y. H. 2020. Strengthening the structural behavior of web openings in RC deep beam using CFRP. **Materials**, **13**(12), 2804.
64. Liu, T. J., Chen, S. W., Feng, Z. H., Liu, H. Y. 2020. Effect of web openings on flexural behaviour of underground metro station RC beams under static and cyclic loading. **Advances in Civil Engineering**, 2020.
65. Nie, X. F., Zhang, S. S., Teng, J. G. 2021. Strengths of RC beams with a fibre-reinforced polymer (FRP)-strengthened web opening. **Composite Structures**, **258**, 113380.
66. Ghali, M. K., Said, M., Mustafa, T. S., El-Sayed, A. A. 2021. Behaviour of T-shaped RC deep beams with openings under different loading conditions. **In Structures**, **31**, 1106-1129. Elsevier.
67. AutoCAD 2021. Computer Aided Design Software, Autodesk.
68. Xtract, Cross Sectional Analysis of Components. Software Program.
69. ABAQUS v 2019. Software Program.
70. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Oñate, E. 1989. A plastic-damage model for concrete. **International Journal of solids and structures**, **25**(3), 299-326.
71. Lee J., Fenves, L. 1998. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. **Journal of Engineering Mechanics**, **124**(8):892-900.
72. Hibbitt H. D., Karlsson B. I., Sorensen E. P. 2013. ABAQUS user's manual. Providence (RI): Dassault Systemes Simulia Corp.

73. Kamali, A. Z. 2012. Shear Strength of Reinforced Concrete Beams subjected to Blast Loading. Royal Institute of Technology (KTH), Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Structural Engineering and Bridges. PhD Thesis.
74. Krätzig, W. B., Pölling, R. 2004. An elasto-plastic damage model for reinforced concrete with minimum number of material parameters. **Computer and Structures**, **82**:1201-1215.
75. Birtel, V., Mark, P. 2006. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. **ABAQUS User's Conference**, 95-108
76. Earij, A., Alfano, G., Cashell, K., Zhou, X. 2017. Nonlinear three-dimensional finite-element modelling of reinforced-concrete beams: Computational challenges and experimental validation. **Engineering Failure Analysis**, **82**, 92-115.
77. FEMA 461. 2007. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components. Federal Emergency Management Agency. Washington. D.C..

EKLER

EK 1. Numunelerin Yüklemeye Bağlı Olarak Çatlak Oluşum Durumları

Tablo Ek 1.1. R-1 numunesinin çatak ve hasar oluşumu

Yük (kN)	Orta Nokta Deplasman(mm)	Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
130	3,39	İlk kılcal çatlak oluşumu kiriş ortası eğilme bölgesinde kirişin altında çekme bölgesinde gözlemlenmiştir.
145	3,81	2. ve 3. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Çekme bölgesinden yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.
148	3,91	4. ve 5. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme eğilimindedir.
162	4,27	6. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Oluşan çatlaklar 1mm genişliklerindedir. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme göstermişlerdir.
178	4,78	7. Kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Diğer çatlakların genişlikleri artmıştır. Çatlaklar çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.
223	5,72	8,9 ve 10. çatlaklar oluşmuştur. Çatlak genişlikleri 1mm'den fazladır.
277	7,58	Numune akma noktasına ulaşmıştır. Çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları basınç bölgesine kadar uzanmıştır.
300	9,89	İlk geniş çatlak orta kısmın solunda oluşmaya başlamıştır. 3mm'den fazla genişliktedir.
350	19,78	2,3,4 ve 5. Geniş çatlaklar oluşmuştur. Çekme bölgesindeki çatlaklarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Basınç bölgesinde betonda ezilme olmuştur.
390	54,3	Numune maksimum yüke ulaşmıştır. Basınç bölgesinde betonda ezilme meydana gelmiş ve birçok geniş çatlak oluşmuştur.
347	63,18	Göçme öncesi ulaştığı yük değeridir. Yükleme sona erdirilmiştir. Kalıcı deplasman değeri 52,83 mm'dir.

Tablo Ek 1.2. R-2 numunesinin çatak ve hasar oluşumu

Yük (kN)	Orta Nokta Deplasman(mm)	Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
95	2,1	İlk kılcal çatlak oluşumu kiriş ortası eğilme bölgesinde kirişin altında çekme bölgesinde gözlemlenmiştir.
108	3,02	2. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çekme bölgesinden yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.
121	3,95	3. ve 4. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme eğilimindedir.
142	5,31	5. ve 6. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Oluşan çatlaklar 1mm genişliklerindedir. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme göstermişlerdir.
164	6,59	7. Kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Diğer çatlakların genişlikleri artmıştır. Çatlaklar çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.
175	8,56	8,9,10,11 ve 12. çatlaklar oluşmuştur. Çatlak genişlikleri 1mm'den fazladır.
184	9,72	İlk geniş çatlak orta kısmın sağında oluşmaya başlamıştır. 2 mm'den fazla genişliktedir.
195	14,31	2. geniş çatlak orta kısmın sağında oluşmaya başlamıştır. 3 mm'den fazla genişliktedir.
203	17,28	Numune akma noktasına ulaşmıştır. Çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları basınç bölgesine kadar uzanmıştır.
300	64,82	2,3,4,5 ve 6. Geniş çatlaklar oluşmuştur. Çekme bölgesindeki çatlaklarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Basınç bölgesinde betonda ezilme başlamıştır.
325	99,16	Çok fazla sayıda geniş çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar simetrik bir dağılım göstermiştir. Yükleme noktalarında ezilmeler meydana gelmiştir.
352	134,72	Numune maksimum yüke ulaşmıştır. Basınç bölgesinde betonda ezilme meydana gelmiş ve eğilme ve mesnet bölgelerinde birçok geniş çatlak oluşmuştur.
311	169,42	Göçme öncesi ulaştığı yük değeridir. Yükleme sona erdirilmiştir. Kalıcı deplasman değeri 157,5 mm'dir.

Tablo Ek 1.3. K-1 numunesinin çatak ve hasar oluşumu

Yük (kN)	Orta Nokta Deplasman(mm)	Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
135	3,21	İlk kılcal çatlak oluşumu kiriş ortası eğilme bölgesinde kirişin altında çekme bölgesinde gözlemlenmiştir.
142	3,66	2. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çekme bölgesinden yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.
146	3,86	3. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme eğilimindedir.
162	5,31	4. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Oluşan çatlaklar 1mm genişliklerindedir. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme göstermişlerdir.
172	4,7	5. Kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Diğer çatlakların genişlikleri artmıştır. Çatlaklar çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.
215	9,8	6,7,8 ve 9.çatlaklar oluşmuştur. Çatlak genişlikleri 1mm'den fazladır.
220	10,71	İlk geniş çatlak orta kısımda boşluğun sağında oluşmaya başlamıştır. 2 mm'den fazla genişliktedir ve dalgalanma oluşturmıştır.
221	12,16	Numune akma noktasına ulaşmıştır. Çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları basınç bölgesine kadar uzanmıştır.
252	22,6	2,3 ve 4. geniş çatlaklar oluşmuştur. Çekme bölgesindeki çatlaklarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Çatlaklar çekme bölgesinden boşluğa kadar ulaşmıştır.
370	47,53	Çok fazla sayıda geniş çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar asimetric bir dağılım göstererek sağ boşluğun yanında yoğunlaşmıştır. Yükleme noktalarında ezilmeler meydana gelmiştir.
412	89,32	Numune maksimum yüke ulaşmıştır. Basınç bölgesinde betonda ezilme ve dökülmeler meydana gelmiş ve eğilme ve mesnet bölgelerinde birçok geniş çatlak oluşmuştur.
321	120,89	Göçme öncesi ulaştığı yük değeridir. Yükleme sona erdirilmiştir. Kalıcı deplasman değeri 110,17 mm'dir.

Tablo Ek 1.4. K-2 numunesinin çatak ve hasar oluşumu

Yük (kN)	Orta Nokta Deplasman(mm)	Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
135	2,8	İlk kılcal çatlak oluşumu kiriş ortası eğilme bölgesinde kirişin altında çekme bölgesinde gözlemlenmiştir.
138	2,95	2. ve 3. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çekme bölgesinden yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.
141	3,04	4. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme eğilimindedir.
162	3,96	5. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Oluşan çatlaklar 1mm'den az genişliklerdedir. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme göstermişlerdir.
183	5,13	6. Kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Diğer çatlakların genişlikleri artmıştır. Çatlaklar çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.
220	6,95	7,8 ve 9. çatlaklar oluşmuştur. Çatlak genişlikleri 1mm'den fazladır.
224	7,11	Numune akma noktasına ulaşmıştır. Çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları basınç bölgesine kadar uzanmıştır.
245	9,64	İlk geniş çatlak orta kısımda sağ boşluğun sağ kısmında oluşmaya başlamıştır. 2 mm'den fazla genişliktedir ve basınç bölgesine doğru ilerlemiştir.
306	16,17	2. ve 3. geniş çatlaklar sağ boşluğun sağında oluşmuştur. Çekme bölgesindeki çatlaklarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Çatlaklar kesitin zayıflaştığı boşluğa doğru yönelmiştir.
350	33,51	Çok fazla sayıda geniş çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar asimetrik bir dağılım göstererek sağ boşluğun yanında yoğunlaşmıştır. Yükleme noktalarında ezilmeler meydana gelmiştir.
402	63,48	Numune maksimum yüke ulaşmıştır. Basınç bölgesinde yüklemenin yapıldığı sağ kısımda betonda ezilme ve dökülmeler meydana gelmiş ve eğilme ve mesnet bölgelerinde birçok geniş çatlak oluşmuştur.
318	114,23	Göçme öncesi ulaştığı yük değeridir. Yükleme sona erdirilmiştir. Kalıcı deplasman değeri 127,57 mm'dir.

Tablo Ek 1.5. K-3 numunesinin çatak ve hasar oluşumu

Yük (kN)	Orta Nokta Deplasman(mm)	Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
133	3,25	İlk kılcal çatlak oluşumu kiriş ortası eğilme bölgesinde kirişin altında çekme bölgesinde gözlemlenmiştir.
153	4,13	2. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çekme bölgesinden yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.
156	4,53	3. ve 4. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme eğilimindedir.
171	5,59	5. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Oluşan çatlaklar 1mm'den az genişliklerdedir. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme göstermişlerdir.
178	6,05	6. Kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Diğer çatlakların genişlikleri artmıştır. Çatlaklar çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.
200	7,46	7. ve 8. çatlaklar oluşmuştur. Çatlak genişlikleri 1mm'den fazladır.
202	7,62	Numune akma noktasına ulaşmıştır. Çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları basınç bölgesine kadar uzanmıştır.
224	12,1	İlk geniş çatlak orta kısımda sağ boşluğun alt kısmından oluşmaya başlamıştır ve boşluğa kadar devam etmiştir. 3 mm'den fazla genişliktedir.
248	14,89	2. ve 3. geniş çatlaklar boşluk altlarından boşluğa kadar oluşmuştur. Çekme bölgesindeki çatlaklarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Çatlaklar hepsi kesitin zayıflaştığı boşluğa doğru yönelmiştir.
350	41,03	Çok fazla sayıda geniş çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar asimetrik bir dağılım göstererek nispeten sağ boşluğun yanında yoğunlaşmıştır. Yükleme noktalarında sağ kısımda ezilmeler meydana gelmiştir.
405	103,75	Numune maksimum yüke ulaşmıştır. Basınç bölgesinde yüklemenin yapıldığı sağ kısımda betonda ezilme ve dökülmeler meydana gelmiş ve eğilme ve mesnet bölgelerinde birçok geniş çatlak oluşmuştur. Basınç donatısında ciddi burkulma meydana gelmiştir.
330	144,92	Göçme öncesi ulaştığı yük değeridir. Yükleme sona erdirilmiştir. Kalıcı deplasman değeri 132,6 mm'dir.

Tablo Ek 1.6. K-4 numunesinin çatak ve hasar oluşumu

Yük (kN)	Orta Nokta Deplasman(mm)	Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
130	2,79	İlk kılcal çatlak oluşumu kiriş ortası eğilme bölgesinde kirişin altında çekme bölgesinde gözlemlenmiştir.
143	3,09	2. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çekme bölgesinden yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.
150	3,31	3. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme eğilimindedir.
158	3,63	4. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Oluşan çatlaklar 1mm'den az genişliklerdedir. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme göstermişlerdir.
168	3,99	5,6,7. ve 8. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Diğer çatlakların genişlikleri artmıştır. Çatlaklar çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.
210	5,84	9. çatlak oluşmuştur. Çatlak genişlikleri 1mm'den fazladır.
261	8,67	Numune akma noktasına ulaşmıştır. Çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları basınç bölgesine ve boşluklara kadar uzanmıştır.
280	14,12	İlk geniş çatlak orta kısımda sağ boşluğun sağ kısmından oluşmaya başlamıştır ve basınç bölgesine kadar devam etmiştir. 3 mm'den fazla genişliktedir.
300	18,35	2,3,4,5. ve 6. geniş çatlaklar boşluk altlarından boşluğa kadar oluşmuştur. Çekme bölgesindeki çatlaklarda dalgalanmalar meydana gelmiştir. Çatlakların çoğunluğu kesitin zayıflaştığı boşluğa doğru yönelmiştir.
340	26,07	7,8. ve 9. geniş çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar asimetrik bir dağılım göstererek nispeten sağ boşluğun yanında yoğunlaşmıştır.
436	55,7	Numune maksimum yüke ulaşmıştır. Basınç bölgesinde yüklemenin yapıldığı sağ kısımda betonda ezilme ve dökülmeler meydana gelmiş ve eğilme ve mesnet bölgelerinde birçok geniş çatlak oluşmuştur. Basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir. Mesnette mekanizma gelişmemiştir.
305	104,71	Göçme öncesi ulaştığı yük değeridir. Yükleme sona erdirilmiştir. Kalıcı deplasman değeri 92,5 mm'dir.

Tablo Ek 1.7. K-5 numunesinin çatak ve hasar oluşumu

Yük (kN)	Orta Nokta Deplasman(mm)	Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
130	3,47	İlk kılcal çatlak oluşumu kiriş ortası eğilme bölgesinde kirişin altında çekme bölgesinde gözlemlenmiştir.
157	4,75	2. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çekme bölgesinden yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.
160	4,89	3. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme eğilimindedir.
171	5,48	4.ve 5. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Oluşan çatlaklar 1mm'den az genişliklerdedir. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme göstermişlerdir.
195	6,59	6,7. ve 8. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Diğer çatlakların genişlikleri artmıştır. Çatlaklar çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.
224	8	Numune akma noktasına ulaşmıştır. Çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları basınç bölgesine ve boşluklara kadar uzanmıştır.
230	10,11	İlk geniş çatlak orta kısımda sağ boşluğun sağ kısmından oluşmaya başlamıştır ve basınç bölgesine kadar devam etmiştir. 3 mm'den fazla genişliktedir.
242	13,48	2. geniş çatlak sağ boşluğun sağ tarafından oluşmuş ve boşluğa kadar devam etmiştir.
300	29,30	2. geniş çatlak genişlemeye devam etmiştir ve çatlak genişliği 10 mm'yi aşmıştır. Çatlaklar asimetrik bir dağılım göstererek sağ boşluğun yanında yoğunlaşmıştır. Çekme bölgesindeki çatlaklarda dalgalanmalar meydana gelmiştir.
369	75,64	Numune maksimum yüke ulaşmıştır. Basınç bölgesinde yüklemenin yapıldığı sağ kısımda betonda ezilme ve dökülmeler meydana gelmiştir. Basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir. Mesnette mekanizma gelişmemiştir. Sağ boşluğun bulunduğu bölgede betonda ayrılma meydana gelmiştir.
350	81,41	Göçme öncesi ulaştığı yük değeridir. Yükleme sona erdirilmiştir. Kalıcı deplasman değeri 83,22 mm'dir.

Tablo Ek 1.8. K-6 numunesinin çatak ve hasar oluşumu

Yük (kN)	Orta Nokta Deplasman(mm)	Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
110	2,41	İlk kılcal çatlak oluşumu kiriş ortası eğilme bölgesinde kirişin altında çekme bölgesinde gözlemlenmiştir.
121	2,99	2. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çekme bölgesinden yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.
138	4,05	3. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme eğilimindedir.
140	4,1	Numune akma noktasına ulaşmıştır. Çatlak genişlikleri artmaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları basınç bölgesine ve boşluklara kadar uzanmıştır.
152	5,43	4.ve 5. kılcal çatlak çekme bölgesinde oluşmuştur. Oluşan çatlaklar 1mm'den az genişliklerdedir. Çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme göstermişlerdir.
171	6,43	6. ve 7. kılcal çatlaklar çekme bölgesinde oluşmuştur. Diğer çatlakların genişlikleri artmıştır. Çatlaklar çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.
198	7,96	8,9. ve 10. Çatlaklar oluşmuştur.
209	15,86	İlk ve ikinci geniş çatlak orta kısımda sol boşluğun alt kısmından oluşmaya başlamıştır ve boşluğa kadar devam etmiştir. 2 mm'den fazla genişliktedir.
228	19,32	3. ve 4. geniş çatlak sağ boşluğun sağ tarafından oluşmuş ve boşluğa kadar devam etmiştir.
344	22,12	Numune maksimum yüke ulaşmıştır. Basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir. Sol boşluğun basınç bölgesine çok yakın olması sebebiyle et kalınlığı yetersiz kalmıştır. Mesnette mekanizma gelişmemiştir. Göçme öncesi ulaştığı yük değeridir. Yükleme sona erdirilmiştir. Kalıcı deplasman değeri 24,32 mm'dir.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hüseyin Hilmi ASLANBAY
Uyruğu : Türkiye (T.C.)
Doğum Tarihi ve Yeri :
Medeni Durumu :
e-mail :
Yazışma Adresi :

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği	2018
Lise	Küçükçekmece Anadolu Lisesi, İstanbul	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2020-Halen	T.C. Erciyes Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce