

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

**ÇARPMA ETKİSİNE MARUZ KALMIŞ YÜKSEK DAYANIMLI
BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞLARINDAKİ DEĞİŞİMİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**



DOKTORA TEZİ

Gökhan DOK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MEKANİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR
Ortak Danışmanı : Prof. Dr. Alper İLKİ

Eylül 2020

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahribat yapılmadığını başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitenin herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Gökhan DOK

14.09.2020

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR'a teşekkürlerimi sunarım. Sahip olduğu birikimi ve deneyimi esirgmeden paylaşan, yoğun akademik programına rağmen her zaman vakit ayıran eş danışmanım Sn. Prof. Dr. Alper İLKİ'ye sonsuz teşekkür ederim. Deneysel çalışmanın her aşamasında desteğiyle yanımda olan azimli çalışma arkadaşım Arş. Gör. Cemal YILMAZ'a teşekkür ederim.

Bu süreçte bilgi ve tecrübesinden istifade ettiğim değerli hocalarım Sn. Dr. Selçuk SAATÇİ'ye, Sn. Dr. Yusuf SÜMER'e, Sn. Dr. Osman KIRTEL'e teşekkür ederim. Çalışmanın her aşamasında yardım ve desteği için Sn. Dr. Hakan ÖZTÜRK'e ve Sn. Dr. Aydın DEMİR'e çok teşekkür ederim. Deneysel çalışma sürecindeki yardımları için, Sn. Kutalmış Recep AKÇA, Sn. Abdülhalim AKKAYA ve İnşaat Mühendisliği Bölümü araştırma görevlilerine teşekkür ederim. Deney düzeneğinin kurulması ve deney numunelerinin üretilmesi aşamasındaki yardımları için, Sn. Dr. Elif AĞCAKOCA'ya, Sn. Mustafa AKDEMİR'e, Sn. Gürhan DENİZ'e ve Sakarya Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığına teşekkür ederim. Ayrıca çalışmanın gerçekleştirilmesinde bilgi, tecrübe ve motive edici sözleriyle her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Sn. Esra DOBRUCALI'ya, Sn. Berna İSTEGÜN'e ve Sn. Özge ŞAHİN'e teşekkür ederim. Doktora eğitimim boyunca sabır, anlayış ve her türlü desteği için sevgili Yasemin Cansev AKALIN'a ve değerli aileme sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan; Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Öğretim Üyesi Yetiştirme Programına (ÖYP) ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-01-04-008, Proje No: 2014-50-02-031, Proje No: 2013-01-04-024, Proje No: 2013-01-04-025) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLOLAR LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xviii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Tez İçerik Planı	3
BÖLÜM 2.	
ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI.....	5
BÖLÜM 3.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
3.1. Literatür Özeti (Kirişler)	12
3.2. Amaç ve Hedef.....	35
3.3. Özgün Değer	35
BÖLÜM 4.	
BETONARME KİRİŞLERİN STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI.....	38

BÖLÜM 5.

MATERYAL VE YÖNTEM	51
5.1. Parametrik Çalışma ve Deney Matrisi	53
5.2. Deney Numunelerinin Tasarımı	55
5.3. Deney Numunelerine Ait Malzeme Özellikleri	57
5.4. Çarpma (Darbe) Deney Düzeneği ve Ölçüm Cihazları.....	59
5.5. Eğilme (Statik) Deney Düzeneği ve Ölçüm Cihazları	66
5.6. Veri Analiz Yöntemi	70
5.7. Pilot Deney Sonuçları.....	73

BÖLÜM 6.

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	78
6.1. Pilot Deney Sonuçları.....	79
6.2. Referans Numunelerine ait Eğilme Deneyi Sonuçları	83
6.3. Çarpma (Dinamik) Deneyleri Sonuçları	88
6.3.1. Eğilme deney serisine ait çarpma deney sonuçları (ρl sabit, E_i değişken)	91
6.3.2. Kritik (Geçiş) deney serisine ait çarpma deney sonuçları (E_i sabit, ρl değişken)	95
6.3.3. Kesme deney serisine ait çarpma deney sonuçları (ρl sabit, E_i değişken)	100
6.3.4. Kritik 2 (Farklı çarpma hızları V_i) deney serisine ait çarpma deney sonuçları (E_i ve V_i , ρl değişken).....	105
6.4. Eğilme (Statik) Deneyleri Sonuçları	111
6.4.1. Eğilme deney serisine ait statik eğilme deney sonuçları (ρl sabit, E_i değişken)	118
6.4.2. Kritik (Geçiş) deney serisine ait statik eğilme deney sonuçları (E_i sabit, ρl değişken).....	123
6.4.3. Kesme deney serisine ait statik eğilme deney sonuçları (ρl sabit, E_i değişken)	135
6.4.4. Kritik 2 (Farklı çarpma hızları V_i) deney serisine ait statik eğilme deney sonuçları (E_i ve V_i , ρl değişken).....	139

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	149
----------------------------	-----

7.1. Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler	155
---	-----

KAYNAKLAR	158
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	169
----------------	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: Kesme açıklığı
a/d	: Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı
A_s	: Çekme donatısı alanı
A_s'	: Basınç donatısı alanı
A_{sw}	: TBDY 2018'de enine donatı alanı
A_y	: ACI 318-14'te enine donatı alanı
A_{ts}	: Çekme çubuğunun toplam alanı
A_{tp}	: Öngermeli kirişlerde öngörme çubuğunun alanı
A_{cs}	: Kiriş kesit alanı
A_{nz}	: Düğüm noktalarının toplam alanı
b	: Kiriş genişliği
b_w	: Kiriş genişliği
$b_w d$	: En kesit alanı
c	: Sönüm katsayısı
d	: Faydalı yükseklik
d_b	: Ortalama boyuna donatı çapı
DIF	: Dinamik büyütme çarpmanı (Dynamic Increase Factor)
E	: Enerji
E_i	: Çarpma enerjisi
E_d	: Enerji yutma kapasitesi
K	: Rijitlik
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_{ck}	: Karakteristik beton basınç dayanımı
F_c	: Kesitteki eşdeğer basınç kuvveti
f_{cd}	: TBDY 2018'de betonun tasarım basınç dayanımı
f_{ce}	: Beton basınç çubuklarının efektif dayanımını

f_{ctd}	: TBDY 2018’de betonun tasarım çekme dayanımı
f'_c	: ACI 318-14’te betonun nominal basınç dayanımı
$f_d(t)$	: Sönüm kuvveti
F_{nn}	: Düğüm noktalarının kesme dayanımı
F_{ns}	: Etriyeler arası beton basınç çubuklarının (Strut) kesme dayanımı
F_{nt}	: Çekme çubuğunun kesme dayanımı
F_{n1}	: Beton basınç çubukları ve çekme çubuğunun toplam kesme dayanımı
F_{n2}	: Çekme çubuğu ve düğüm noktalarının kesme dayanımı
$f_s(t)$	: Atalet kuvvetleri
F_s	: Kesitteki eşdeğer çekme kuvveti
f_{se}	: Efektif akma dayanımı
f'_s	: Basınç donatısının akma dayanımı
f_y	: Çekme çubuğunun akma dayanımını
f_{ywd}	: TBDY 2018’de kesme donatısının tasarım akma dayanımı
f_{yt}	: ACI 318-14’te kesme donatısının nominal akma dayanımı
g	: Yerçekimi ivmesi
GÖ	: Göçmenin önlenmesi
h	: Kiriş yüksekliği
H	: Serbest düşme yüksekliği
k	: Rijitlik
kg	: Kilogram
kJ	: Kilojoule
KH	: Kontrollü hasar
kHz	: Kilohertz
L_p	: Plastik mafsal boyu
L_s	: TBDY 2018’de kesme açıklığı
$L_{effective}$	: Dinamik deneylerde hasarın yayıldığı bölgenin uzunluğu
m	: kütle
ms	: milisaniye
M_r	: Moment taşıma kapasitesi
M_u	: Maksimum moment taşıma kapasitesi
M_y	: Akma momenti

P_{cr}	: Eğik çatlama dayanımı
$P(t)$	: Zamana bağlı dış yük
P_u	: Maksimum yük taşıma kapasitesi
$P_{u_{dinamik}}$	: Maksimum dinamik yük taşıma kapasitesi
$P_{u_{statik}}$	: Maksimum statik yük taşıma kapasitesi
P_y	: Akma yükü
s	: Etriye adım mesafesi
SH	: Sınırlı hasar
STM	: Strut-and-tie model
$TBDY$	: Türkiye bina deprem yönetmeliği
$u(t)$	: Zamana bağlı deplasman
V_c	: ACI 318-14'te betonun kesme dayanımı
V_{cr}	: TBDY 2018'de betonun kesme dayanımı
V_i	: Çarpma hızı
V_{max}	: TBDY 2018'de kirişin taşıyabileceği maksimum kesme kuvveti
V_n	: ACI 318-14'te kirişin kesme dayanımı
V_r	: TBDY 2018'de kirişin kesme dayanımı
V_r/M_r	: Kesme dayanımının moment taşıma kapasitesine oranı
V_s	: ACI 318-14'te enine donatı (etriyenin) kesme dayanımı
V_u	: ACI 318-14'te kirişin taşıyabileceği maksimum kesme kuvveti
V_w	: TBDY 2018'de enine donatı (etriyenin) kesme dayanımı
ε	: Şekildeğiştirme
ε_c	: Betondaki birim şekildeğiştirme (kısılma)
ε_{cu}	: Betondaki ezilme birim şekildeğiştirmesi
ε_{co}	: Betonda maksimum gerilme altındaki birim şekildeğiştirme
$\varepsilon_{kalıcı}$	: Donatılardaki kalıcı şekildeğiştirme
ε_{maks}	: Donatılardaki maksimum şekildeğiştirme
ε_s	: Donatıdaki birim şekildeğiştirme
ε_y	: Donatıdaki akma birim şekildeğiştirmesi
σ_c	: Betondaki basınç gerilmesi
σ_s	: Donatıdaki çekme gerilmesi
ρ_b	: Dengeli donatı oranı

ρ_l	: Boyuna donatı oranı
ρ_{max}	: Maksimum donatı oranı
ρ_{min}	: Minimum donatı oranı
$\dot{u}(t)$	: Hız
$\ddot{u}(t)$	: İvme
Δ	: Yerdeğiştirme
Δ_{cr}	: Çekme bölgesindeki betonu çatlatan yerdeğiştirme
Δ_u	: Statik deneylerde maksimum yerdeğiştirme kapasitesi
Δ_y	: Akma yerdeğiştirmesi
$\Delta_{kalıcı}$	: Dinamik deneylerdeki kalıcı yerdeğiştirme
Δ_{maks}	: Dinamik deneylerdeki maksimum yerdeğiştirme
θ	: Dönme
θ_p	: Plastik dönme
θ_u	: Maksimum dönme
θ_y	: Akma dönmesi
μ	: Süneklik katsayısı
μ_Δ	: Yerdeğiştirme sünekliği
μ_θ	: Dönme sünekliği
$\emptyset$	: Donatı çapı
$\emptyset_u$	: Maksimum eğrilik
$\emptyset_y$	: Akma eğriliği
λ	: ACI 318-14'te malzeme katsayısı
Φ	: ACI 318-14'te kesme davranışı için kiriş tiplerine göre katsayı
β_s	: Strut katsayısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Deney numuneleri ve dinamik (çarpma) yükleme.....	13
Şekil 3.2. Deney numuneleri ve dinamik (çarpma) yükleme.....	14
Şekil 3.3. a) Deney numunelerinin geometrisi ve b) Çarpma deney düzeneği	15
Şekil 3.4. a) Numunelerinin kesit geometrisi b) Statik ve dinamik deneyler sonrası deney numunelerinin durumu	16
Şekil 3.5. a) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi b) Deney düzeneği.....	17
Şekil 3.6. a) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi b) Deney düzeneği.....	18
Şekil 3.7. a) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi b) Deney düzeneği.....	19
Şekil 3.8. a) Serbest düşme yapan kütle b) Mesnet alt başlık detayı c) Mesnet üst başlık detayı	19
Şekil 3.9. a) Deney düzeneği b) Deneylerde kullanılan yükleme şeması ve yapılan ölçümler c) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi.....	20
Şekil 3.10. a) Çarpma deneylerinde kullanılan deney düzeneği b) Mesnet detayı	22
Şekil 3.11. a) Deney düzeneği b) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi c) Deney matrisi	23
Şekil 3.12. a) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi b) Deney düzeneği c) Numunelere ait moment ve kesme kuvveti taşıma kapasiteleri	24
Şekil 3.13. a) Deney düzeneği b) Numunelere çimento ve fiber karışım oranları.	25
Şekil 3.14. Deney numunelerinin geometrisi	26
Şekil 3.15. Deney matrisi	26

Şekil 3.16. a) Deney numunelerinin geometirisi b) Statik deney düzeneği	
c) Statik deney düzeneği	27
Şekil 3.17. Deney matrisi	27
Şekil 3.18. a) Dikdörtgen deney numunelerinin geometirisi	
b) Dairesel deney numunelerinin geometirisi c) Deney düzeneği	29
Şekil 3.19. Deney numunelerinin geometrisi	31
Şekil 3.20. a) Deney Düzeneğinin şematik gösterimi b) Deney	
düzeneğinde örnek deney uygulaması.....	31
Şekil 3.21. Deney numunelerine ait malzeme özellikleri	32
Şekil 3.22. Deney numunelerine ait kesit özellikleri	33
Şekil 3.23. Deney numunelerine ait kesit özellikleri	34
Şekil 3.24. Deney matrisi	34
Şekil 4.1. a) Kiriş kesiti b) Birim şekildeğiştirme diyagramı	
c) Gerilme dağılımı d) İç kuvvetler	38
Şekil 4.2. a) Açıklık kesitindeki betonarme davranış b) Mesnet	
kesitindeki betonarme davranış	39
Şekil 4.3. Betonarme kirişlerin eğilme momenti etkisi altındaki davranışı	40
Şekil 4.4. Betonarme kirişlerin üç noktada asal, çekme ve basınç	
gerilmelerine ait yörüngeler	41
Şekil 4.5. Betonarme kayma gerilmelerinin değişimi.....	41
Şekil 4.6. Betonarme kirişlerin göçme durumları a) Eğilme b) Kesme	
kuvveti ve eğilme c) Eğik çekme d) Gövde basınç e) Kenetlenme	
güç tükenmesi durumları	42
Şekil 4.7. Betonarme kirişte kafes sistem yaklaşımı.....	42
Şekil 4.8. a) A/d'nin davranışa etkisi b) Çekme donatısına bağlı eğilme	
davranışı	43
Şekil 4.9. Farklı a/d oranları için güç tükenmesi durumları.....	44
Şekil 4.10. Çarpma yükleme ait yükleme şeması ve hasar tipleri a) Çarpma	
yüklemesi ve lokal hasarlar b) Eğilme çatlakları c) Lokal ezilme ve	
kesme hasarı d) Kesme hakim davranış e) Kesmeli eğilme davranışı	45
Şekil 4.11. a) Kiriş davranışı b) Sönümsüz tek serbestlik dereceli sistem	
davranışı	46

Şekil 4.12. a) Statik yükleme b) Dinamik yükleme	46
Şekil 4.13. İki serbestlik dereceli sönümlü sistemin dinamik modeli.....	48
Şekil 4.14. a) Dönme ve yerdeğitirme b) Yerdeğitirme sünekliği.....	49
Şekil 5.1. Numune isimlendirmesi ve notasyonu.....	53
Şekil 5.2. Numunelerin geometrik özellikleri ve donatı detayları	56
Şekil 5.3. a) Pilot deney numunelerinin üretilmesi b) Deneysel çalışmaya ait numunelerin imalatı c) Tüm numunelerin genel görüntüsü	56
Şekil 5.4. a) Donatıların taşlanması ve zımparalanması b) Gerinim pulu yapıştırma işlemi c) Gerinim pulu üzerine silikon uygulaması d) Gerinim pullarının genel görüntüsü	57
Şekil 5.5. a) Beton basınç dayanım testi b) Donatı çekme testi	58
Şekil 5.6. a) Çarpma deney düzeneği temel detayı b) Çarpma deney düzeneği ankraj detayı c) Temel imalatı d) Deney düzeneği temel ankraj imalatı	60
Şekil 5.7. a) Çarpma deney düzeneği b) Çarpma deney düzeneği 3 boyutlu çizimi c) Ölçüm cihazları şematik gösterimi	61
Şekil 5.8. a) Çatlak genişliği ölçmek için kullanılan mafsallı yer değıştirme ölçerler b) Mesnet bağlantı detayı c) Hareketli mesnet detayı d) Sabit mesnet detayı	62
Şekil 5.9. a) İvmeölçer b) Gerinim pulu c) Yük hücresi d) Lazermetre e) Tam ve çeyrek köprü f) Mafsallı potansiyometre	64
Şekil 5.10. a) NI cDAQ b) NI 9234 c) NI 9237 d) NI 9219 e) NI 9215	66
Şekil 5.11. a) Eğilme çerçevesi b) Çatlak genişliği ölçmek için kullanılan mafsallı yer değıştirme ölçerler c) Eğilme çerçevesinde yükleme şeması	67
Şekil 5.12. a) Eğilme çerçevesi temel ve bağlantı detayı b) Piston için bağlantı detayı c) Bağlantı plakasının montajı	68
Şekil 5.13. a) Yük hücresi b) Gerinim pulu c) Potansiyometre d) Mititoyo (yerdeğıştirme ölçer) e) 32 kanallı veri toplama sistemi f) 4 kanallı veri toplama sistemi	69
Şekil 5.14. a) Cam lam uygulaması b) Mesnet çökmesi ölçümü için bağlantı hazırlıkları c) Mesnet çökmesi ölçümü	70

Şekil 5.15. a) İvmeölçer ayarları b) Gerinim pulu ayarları c) Mafsallı potansiyometre ayarları	71
Şekil 5.16. a) Yük hücresi ayarları b) Yük hücresi için ölçeklendirme örneği c) Lazaermetre ayarları d) Lazermetre için ölçeklendirme örneği	72
Şekil 5.17. TestLAB program arayüzü	73
Şekil 5.18. a) Mesnetlerin ilk hali b) Yenilenen mesnet tasarımı	75
Şekil 5.19. Çarpma yükü uygulanırken çelik plaka kullanılması.....	75
Şekil 5.20. a) Kullanılan ilk bağlantı detayları b) Tercih edilen bağlantı detayı ...	76
Şekil 5.21. a) Eğilme numunesi b) Kesme numunesi	77
Şekil 6.1. Pilot çarpma deneylerinde oluşan hasarlar	81
Şekil 6.2. a) Eğilme numunesi b) Kesme numunesi	83
Şekil 6.3. H-F-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi.....	84
Şekil 6.4. H-FC-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi	85
Şekil 6.5. H-FS-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi.....	86
Şekil 6.6. H-SC-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi	87
Şekil 6.7. H-S-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi.....	87
Şekil 6.8. Eğilme deney serisine ait değişen çarpma enerjisine bağlı hasar durumları	91
Şekil 6.9. Eğilme numunelerinde oluşan ivme-zaman ve kuvvet-zaman ilişkileri	92
Şekil 6.10. Eğilme numunelerinde oluşan yerdeğiştirme-zaman ve şekildeğiştirme-zaman ilişkileri.....	94
Şekil 6.11. Ara deney serisine ait değişen çarpma enerjisine bağlı hasar durumları.....	96
Şekil 6.12. Kritik seriye ait numunelerde oluşan ivme-zaman ve kuvvet-zaman ilişkileri.....	97
Şekil 6.13. Kritik seriye ait numunelerde oluşan yerdeğiştirme-zaman ve şekildeğiştirme-zaman ilişkileri	99
Şekil 6.14. Kesme deney serisine ait değişen çarpma enerjisine bağlı hasar durumları	101
Şekil 6.15. Kesme numunelerinde oluşan ivme-zaman ve kuvvet-zaman ilişkileri	102

Şekil 6.16. Kesme numunelerinde oluşan yerdeğiştirme-zaman ve şekildeğiştirme-zaman ilişkileri	104
Şekil 6.17. Kritik deney serisine ait değişen çarpma enerjisine bağlı hasar durumları	106
Şekil 6.18. Kritik 2 seri numunelerinde oluşan ivme-zaman ve kuvvet-zaman ilişkileri	108
Şekil 6.19. Eğilme numunelerinde oluşan yerdeğiştirme-zaman ve şekildeğiştirme-zaman ilişkileri	110
Şekil 6.20. TBDY 2018'e göre hasar sınırları ve hasar bölgeleri	113
Şekil 6.21. Deneysel dönme değerlerinin hesabını uygun kiriş geometrisi ve plastik mafsalları kabulü	115
Şekil 6.22. "Strut and Tie" (STM) modeli	117
Şekil 6.23. Eğilme numunelerinde statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları	119
Şekil 6.24. Eğilme numunelerinde oluşan yük-yerdeğiştirme ilişkileri	120
Şekil 6.25. Eğilme numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri	122
Şekil 6.26. Kritik seri eğilme ve eğilme kritik numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları	124
Şekil 6.27. Kritik seri kesmeli eğilme numunesi için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları	125
Şekil 6.28. Kritik seri kesme kritik ve kesme numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları	125
Şekil 6.29. Kritik seri eğilme ve eğilme kritik numuneleri için yük- yerdeğiştirme ilişkileri	126
Şekil 6.30. Kritik seri kesmeli eğilme numunesi için yük-yerdeğiştirme ilişkileri	127
Şekil 6.31. Kritik seri kesme kritik ve kesme numuneleri için yük-yerdeğiştirme ilişkileri	128
Şekil 6.32. Eğilme numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri	131
Şekil 6.33. Eğilme kritik numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri	132
Şekil 6.34. Kesmeli eğilme numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri	133

Şekil 6.35. Kesme numunelerinde statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları.....	136
Şekil 6.36. Kesme numunelerinde oluşan yük-yerdeğiştirme ilişkileri	137
Şekil 6.37. Kritik 2 seri eğilme kritik numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları.....	140
Şekil 6.38. Kritik 2 serisi kesmeli eğilme numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları	140
Şekil 6.39. Kritik 2 seri eğilme kritik numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları.....	141
Şekil 6.40. Kritik 2 seri kesmeli eğilme numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları	142
Şekil 6.41. Eğilme kritik numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri	145
Şekil 6.42. Kesmeli eğilme numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri	146

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Deneyisel çalışmada kullanılacak çarpma enerjileri.....	6
Tablo 2.2. Deney matrisi.....	7
Tablo 5.1. Deneyisel çalışmada kullanılacak çarpma enerjileri.....	52
Tablo 5.2. Öngörülen deney matrisi.....	52
Tablo 5.3. Deney numuneleri ve çarpma enerjileri.....	54
Tablo 5.4. Deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi	55
Tablo 5.5. Beton karışım oranları	58
Tablo 5.6. Malzeme deneyi sonuçları	59
Tablo 5.7. Pilot çarpma deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi.....	74
Tablo 5.8. Pilot eğilme deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi	74
Tablo 6.1. Pilot çarpma deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi.....	79
Tablo 6.2. Pilot çarpma deney sonuçları.....	80
Tablo 6.3. Deneyisel çalışmada kullanılacak çarpma enerjileri.....	82
Tablo 6.4. Deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi	82
Tablo 6.5. Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.....	88
Tablo 6.6. Deney matrisi ve enerji düzeylerine göre karşılaştırma parametreleri .	90
Tablo 6.7. Eğilme serisine ait çarpma deneyi sonuçları.....	95
Tablo 6.8. Kritik (Geçiş) seriye ait çarpma deneyi sonuçları	100
Tablo 6.9. Kesme serisine ait çarpma deneyi sonuçları	105
Tablo 6.10. Kritik 2 seriye ait çarpma deneyi sonuçları	110
Tablo 6.11. Çarpma deneylerine ait DIF ve $L_{effective}$ parametreleri.....	111
Tablo 6.12. Çarpma deneylerine ait kalıcı yer değiştirmeler ve şekil değiştirmeler.....	112
Tablo 6.13. Eğilme deney serisindeki kirişlere ait statik eğilme deneyi sonuçları	121

Tablo 6.14. Kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki şekildeğişirmeler	121
Tablo 6.15. TBDY 2018'e göre deneysel dönme değerleri ve hasar sınırları.....	122
Tablo 6.16. TBDY 2018 ve ACI 318-14'e göre kesme güvenliği değerlendirmesi	123
Tablo 6.17. Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.....	129
Tablo 6.18. Kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki şekildeğişirmeler	130
Tablo 6.19. TBDY 2018'e göre deneysel dönme değerleri ve hasar sınırları.....	134
Tablo 6.20. TBDY 2018 ve ACI 318-14'e göre kesme güvenliği değerlendirmesi	134
Tablo 6.21. Kesme deney serisindeki kirişlere ait statik eğilme deneyi sonuçları.....	138
Tablo 6.22. Kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki şekildeğişirmeler	138
Tablo 6.23. TBDY 2018 ve ACI 318-14'e göre kesme güvenliği değerlendirmesi	138
Tablo 6.24. Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.....	143
Tablo 6.25. Kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki şekildeğişirmeler	144
Tablo 6.26 . TBDY 2018'e göre deneysel dönme değerleri ve hasar sınırları.....	146
Tablo 6.27. TBDY 2018 ve ACI 318-14'e göre kesme güvenliği değerlendirmesi	147

ÖZET

Anahtar kelimeler: Çarpma etkisi, yüksek dayanım, betonarme kiriş, artık yük taşıma kapasitesi, deneysel çalışma

Bu çalışmanın amacı; farklı çarpma enerjilerine maruz kalmış ancak taşıma gücünü tamamen kaybetmemiş, farklı süneklik kapasitelerine sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerindeki değişimin tespit edilmesidir. Çarpma etkileri nedeniyle oluşan eğilme ve kesme kapasitelerindeki değişimin tespiti için, kirişler üzerinde çarpma deneyleri sonrasında eğilme deneyleri de yapılmıştır. Böylelikle betonarme kirişlerin davranışlarındaki değişim çarpma etkilerine maruz kalmamış referans betonarme bir kirişin deneysel sonuçları ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada çarpma etkileri sonrasında, artık yük ve moment taşıma kapasiteleri, yerdeğiştirme ve dönme süneklikleri, maksimum kesme çatlak genişlikleri ile donatılardaki (çekme, basınç, kesme) şekildeğiştirmeler karşılaştırılarak, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin rijitlik ve enerji yutma kapasitelerindeki değişim belirlenmiştir. Bununla birlikte kirişlerde oluşan dönme değerleri ile teorik kesme dayanımları TBDY 2018’de verilen performans seviyeleri için tanımlanan sınır değerler ile TBDY 2018, ACI 318-14’te tanımlanan teorik kesme dayanımları kıyaslanmıştır. Böylelikle çarpma etkilerine maruz kalmış ancak eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen yitirmemiş betonarme kirişlerin, betonarme davranışlarındaki değişime bağlı olarak onarım, güçlendirme veya yeniden imalat gibi öneriler ortaya konmuştur. Bu tez çalışmasının deneysel kısmı 3 ana aşamadan oluşmaktadır. Deneysel çalışmanın birinci aşamasında pilot deneyler yapılarak düşme yüksekliği ve düşürülen kütlenin büyüklüğüne bağlı olarak enerji düzeyleri tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasında literatür ile benzer şekilde farklı çarpma enerjileri elde edilmiştir. Düşme yüksekliği 3,0 m ve düşürülen kütlenin büyüklüğü (vurma başlığının kütlesi) ise 240 kg olarak seçilmiştir. Vurma başlığına eklenen değişik kalınlıklardaki çelik plakalar ile ağırlığı arttırılmış ve 3 farklı enerji düzeyi elde edilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında pilot deney sonuçları dikkate alınarak deney numunelerinin boyutları ve donatı oranları belirlenmiş ve çarpma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak betonarme kirişlerin boyutları, beton basınç dayanımları, enine donatıları ve a/d oranları sabit tutulmuş sadece boyuna donatı oranları değiştirilmiştir. Boyuna donatı oranları ve süneklik düzeyleri farklı beş farklı deney numune tipi oluşturulmuştur. Bu deney numunelerinin eğilmeden kesmeye doğru gevrekleşen davranış göstermeleri amaçlanmıştır. Deneysel çalışmanın son aşamasında çarpmaya maruz kalmış numunelerin ve referans numunelerinin eğilme deneyleri yapılmıştır. Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin davranışlarındaki değişim ile çarpma etkisi arasındaki ilişki, kirişlerin artık yük ve moment taşıma kapasiteleri (residual load bearing capacity) ile sünekliklerindeki değişim karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF IMPACT DAMAGES ON THE PERFORMANCE OF HIGH- STRENGTH BEAMS

SUMMARY

Keywords: Impact effect, high strength, reinforced concrete beams, residual load bearing capacity, experimental study

The aim of this study is to determine the change in bending and shear capacity of high strength reinforced concrete (RC) beams with different ductility capacities which have been subjected to different impact energies but have not lost their bearing capacity completely. In order to determine the change in bending and shear capacities caused by impact effects, bending tests were also performed after impact tests on beams. Thus, the changes in the behavior of RC beams were examined by comparing the experimental results of a reference reinforced concrete beam which was not subjected to impact effects. In the experimental study, residual load and moment carrying capacities, displacement and rotational ductilities, bending rigidities, energy absorption capacities, maximum shear crack widths and deformations of reinforcements (tension, compression, and shear) were determined after the impact effects. Additionally, the experimental rotations and shear strengths of beams are compared with the limit rotation values and theoretical shear strengths given in TBEC 2018 and ACI 318-14. In addition to, appropriate intervention methods, such as repair, strengthening, and reconstruction have been recommended according to the damage intensity for the behavior of impact damaged high-strength RC beams. This thesis consists of three main stages. In the first stage of the experimental study, pilot experiments were performed and energy levels were defined depending on the free fall height and the mass of the impactor. In this thesis, different impact energies were obtained using different mass of impactor or different free fall height likewise the literature. In the second stage of the experimental study, the dimensions and reinforcement ratios of the test specimens were determined considering results of the pilot tests and the impact tests were performed. The dimensions, concrete compressive strength, transverse reinforcement and a/d ratios of the specimens used in the experiments were kept constant and only the longitudinal tension reinforcement ratios were changed to represent the five different behavior of RC beams changing from ductile to brittle manner. In the final stage of the experimental study, static flexural tests of both reference and impacted specimens were carried out to examine comparatively the relationship between the change in the behavior of high-strength reinforced concrete beams and the impact effect, the residual load bearing capacity and the change in ductility of the beams.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yapılar statik ve dinamik karakteristikli farklı tipte yüklere maruz kalmaktadır. Bunlar ölü, hareketli, deprem, rüzgâr, kar, sıcaklık değişimi vb. olarak teknik dokümanlarda ve yönetmeliklerde yer almaktadır. Bu yüklere karşı koyacak yapı tasarım kuralları ve yapı davranışı gerek yapılan çalışmalarla tespit edilmiş gerekse çıkartılan yönetmelik ve şartnameler mühendislerin daha uygun tasarımlar yapmaları sağlanmıştır. Çarpma gibi anlık impuls etkileri ise bu yükler dışında kalan, yükleme büyüklüğü, etki zamanı ve oluşturduğu deformasyonların hesaplanması karışık olan ve az bilinen bir yükleme türüdür. Bu konuda henüz yeterli sayıda çalışma olmamakla birlikte bu yüklere karşı önlem oluşturacak tasarım kuralları yönetmeliklerde yer almamaktadır. Çarpma etkilerini meydana getiren başlıca olaylar şöyle sıralanabilir:

1. Betonarme yapılara ve yapısal elemanlara araç çarpması
2. Petrol platformlarının ve köprülerin betonarme ayaklarına gemi çarpması
3. Karayolları ve demiryollarında bulunan yapılara araç çarpması, yolların kenarlarında bulunan yamaçlardan yol üzerinde bulunan yapıların üzerine kaya düşmesi ve benzeri olarak düşünülebilir.
4. Betonarme yapıların imalatı sırasında şantiye alnındaki kazalar, üretim aşamasında oluşan bazı büyük veya küçük kütleli nesne düşmeleri
5. Tünel vb yapılara kaya düşmeleri
6. Askeri tesisler içerisinde bulunan cephanelik vb. yerlerde patlayıcı maddelerin patlaması sonucu ortaya çıkan etkiler
7. Nükleer santrallerde meydana gelen kazaların oluşturduğu veya bu santrallere yapılan saldırıların oluşturduğu çarpma etkileri
8. Terör saldırılarında patlama nedeniyle anlık oluşan impuls etkileri olarak sıralanabilir.

Beton malzemesi günümüz yapı teknolojisinde hala en yaygın olarak kullanılan malzeme tipidir. Beton ve donatı çeliği kullanılarak imal edilen betonarme yapıların bahsedilen çarpma etkilerine karşı herhangi bir tasarım kuralı bulunmamaktadır. Çarpma etkisi gibi dinamik etkiler altında hem beton malzemesinin hem de betonarme elemanların nasıl bir davranış göstereceği ilgili henüz hazırda yeterli çalışma olmamakla birlikte, araştırmalar devam etmektedir. Ayrıca bu etkiler altında betonun davranışının iyileştirilmesi ve farklı güçlendirme yöntemleri de kullanılarak araştırılmaktadır.

Beton malzemesinin yükleme hızına bağlı olarak dayanımın değiştiği daha önce yapılan deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir. Betonarme yapı elemanlarının da beton malzemesinin dayanımındaki bu değişime bağlı olarak çarpma gibi dinamik etkiler altında davranışının değişeceği öngörülmektedir. Yapılan az sayıda ve kısıtlı çalışma da bu teoriyi doğrular niteliktedir. Betonarme elemanların çarpma etkileri altındaki dinamik davranışını tespit edebilmek için çeşitli döşeme, kiriş ve kolon deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda çarpma etkisi belirli bir yükseklikten serbest bırakılan kütleler ile elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda test edilen numunenin tipine bağlı olarak (kolon, kiriş, döşeme) farklı tipte deney düzenekleri kullanılmıştır. Bu araştırmalarda farklı vurma başlıkları, farklı düşme yükseklikleri, değişken kütleli vurma başlıkları kullanılarak bahsi geçen çarpma enerjileri elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca betonarme elemanlar için farklı enine ve boyuna tasarımları kullanılarak statik ve dinamik etkiler altındaki davranışlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırılma ile dinamik büyütme çarpanı olarak tanımlanan, dinamik yük taşıma kapasitesinin statik yük taşıma kapasitesine oranıyla bulunan parametre tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca betonarme elemanlardaki göçme modlarının değişimi de değerlendirilmiştir. Betonarme elemanların farklı malzemeler (çelik şerit, FRP, CFRP vb.) ile güçlendirilerek dinamik dayanımındaki değişim de yine başka çalışmalara konu olmuştur. Güçlendirilen elemanlardaki kesme ve eğilme kapasitelerinin artışı, ayrıca elemanları göçmeye götüren mekanizma yani betonarme davranışın değişimi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunların dışında çarpma sonrası davranışı inceleyen herhangi bir çalışma ise bulunmamaktadır.

Önerilen bu çalışmada ilk olarak, serbest düşme nedeniyle oluşan çarpma etkisini test etmek amacıyla hem betonarme hem de çelik elemanlar üzerinde deney yapabilecek, kiriş, kolon, döşeme ve çerçeve sistemler test edilebildiği düzeneği kurmak ve geliştirmiştir. Elde edilen yeni çarpma deney düzeneği çarpma etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerin eğilme ve kesme dayanımındaki değişimleri, çarpma sonrası elemanlardaki davranış değişimini ve göçme mekanizmalarını tespit etmek amaçlanmıştır. Bununla birlikte çarpma etkileri sonrasında betonarme davranışın değişimini tespit etmesi ve betonarme elemanların artık yük taşıma kapasitesinin ölçeksiz deney numuneleri ile bulunması bu çalışmayı literatürdeki diğer çalışmalardan ayrı kılmaktadır.

1.1. Tez İçerik Planı

Yedi bölümden oluşan bu tez çalışmasının her bir bölümüne ait içerik aşağıda sıralanmıştır.

Bölüm 1’de; tez kapsamında incelenen problemin tanımı, çalışmanın içeriği ve literatüre katkısı kısa bilgiler ile anlatılmıştır.

Bölüm 2’de; tezin konusu, kapsamı, amaç ve hedefleri anlatılmıştır. Bu bölümde ayrıca deneysel çalışmanın aşamaları ve deney matrisi kısaca açıklanmıştır.

Bölüm 3’te çalışma kapsamında yapılan ve konu ile ilgili ayrıntılı bir literatür özeti verilmiştir. Betonarme elemanların çarpma yükleri altında dinamik davranışını açıklayan bugüne kadar yapılmış çalışmalar ve betonarme kirişlere ait statik ve dinamik yük taşıma kapasitelerini inceleyen çalışmalar irdelenmiştir. Son kısımda ise çalışmanın amaç ve hedefleri ile özgün değerleri maddeler halinde sıralanarak açıklanmıştır.

Bölüm 4’te; betonarme kirişlerin statik ve dinamik yükler altındaki davranışı teorik olarak anlatılmıştır. Betonarme kirişlerin davranışı eğilme ve kesme davranışları irdelenerek açıklanmıştır.

Bölüm 5’de; tezin deneysel aşamasında kullanılan materyal ve yöntem ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Bölüm 6’da; deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Deneysel çalışmanın sonunda betonarme elemanların taşıma gücündeki ve sünekliğindeki değişim elde edilen deney sonuçları ile ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Bölüm 7’de; bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler ile çalışmanın genel değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar anlatılarak gelecekteki yapılabilecek muhtemel çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışmanın amacı; farklı çarpma enerjilerine maruz kalmış ancak taşıma gücünü tamamen kaybetmemiş, farklı süneklik kapasitelerine sahip betonarme kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerindeki değişimin tespit edilmesidir. Bununla birlikte betonarme kirişlere ait göçme modu, çatlak mekanizmaları da incelenecektir. Bu çalışmada dinamik çarpma deneylerine ait etkiler, ele alınan kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen kaybetmesine neden olmayacak düzeyde gerçekleşecektir. Bu sayede dinamik etkiler nedeniyle eğilme ve kesme kapasitelerindeki değişimin tespiti için, kirişler üzerinde çarpma deneyleri sonrasında eğilme deneyleri de yapılacaktır. Çarpma etkilerine maruz kalmış ancak eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen yitirmemiş betonarme kirişlerin, kapasitelerindeki değişime bağlı olarak onarım, güçlendirme veya yeniden imalat gibi öneriler konusunda daha net karar verilebilecektir.

Literatürdeki çarpma ile ilgili çalışmalarda, çarpma etkisine maruz betonarme kirişlerin dinamik yük taşıma kapasiteleri araştırılmış ve bu çalışmalarda güç tükenmesi durumuna getirecek enerji düzeyleri kullanılmıştır. Fakat betonarme kirişleri göçmeye götürmeyen, eğilme ve kesme kapasitelerine ait taşıma gücünü tamamen tüketmeyen enerji düzeyleri için araştırmalar eksik kalmıştır. Bu tez çalışmasında farklı çarpma etkilerine maruz kalmış ancak eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen kaybetmemiş kirişlerin taşıma gücündeki değişimi ve çarpma sonrası davranışları deneysel olarak araştırılacaktır. Deneysel çalışması daha önce yapılmamış bu konu, bu tez çalışması ile ele alınarak literatürdeki önemli bir eksiklik giderilecektir.

Bu çalışmayla çarpma gibi dinamik etkilere maruz kalmış ve sınırlı derecede hasar almış betonarme kirişlerin çarpma sonrası davranışları deneysel olarak araştırılmıştır.

Farklı çarpma enerjilerine maruz kalan betonarme kirişlerin çarpma sonrasındaki eğilme ve kesme kapasitelerini belirlemek için eğilme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, çarpma gibi dinamik etkilere maruz kalmış betonarme kirişlerin davranışlarındaki değişim ile çarpma etkisi arasındaki ilişki belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının deneysel kısmı 3 ana aşamadan oluşmaktadır. Deneysel çalışmanın birinci aşamasında pilot deneyler yapılarak düşme yüksekliği ve düşürülen kütlenin büyüklüğüne bağlı olarak enerji düzeyleri tanımlanmıştır. Literatürde enerji düzeyleri belirlenirken ya düşme yüksekliği ya da düşürülen kütlenin büyüklüğü değiştirilmiştir. Bu tez çalışmasında ise düşme yüksekliği sabit tutulmuş ve düşürülen kütlenin büyüklüğü değiştirilerek farklı “çarpma enerji düzeyleri” elde edilmiştir. Düşme yüksekliği 3 m ve düşürülen kütlenin büyüklüğü (vurma başlığının kütlesi) ise 240 kg olarak seçilmiştir. Bu vurma başlığına eklenen değişik kalınlıklardaki çelik plakalar ile ağırlığı arttırılmış ve 3 farklı enerji düzeyi elde edilmiştir (Tablo 2.1.). Enerji düzeyleri belirlenirken kirişlerde oluşan elastik ve plastik şekildeğiştirmeler dikkate alınmıştır. E1 enerji düzeyi kısmen elastik (donatı) şekil değiştirmeye E2 ve E3 enerji düzeyleri ise plastik şekil değiştirmelere karşılık gelmektedir.

Tablo 2.1. Deneysel çalışmada kullanılacak çarpma enerjileri

Enerji Düzeyleri	Düşme Yüksekliği (m)	Vurma Başlığı Kütlesi (kg)
E1	3	240
E2	3	360
E3	3	480

Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında pilot deney sonuçları dikkate alınarak deney numunelerinin boyutları ve donatı oranları belirlenmiş ve çarpma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak betonarme kirişlerin boyutları, beton basınç dayanımları, enine donatıları ve a/d oranları sabit tutulmuş sadece boyuna donatı oranları değiştirilmiştir. Boyuna donatı oranları a) $\rho_{\min}$ b) $2\rho_{\min}$ c) $4\rho_{\min}$ d) $6\rho_{\min}$ ve e) $\rho_{\max} = 0,85\rho_b$ olacak şekilde seçilerek süneklik düzeyleri farklı beş farklı deney numune tipi oluşturulmuştur. Bu deney numunelerinin eğilmeden kesmeye doğru gevrekleşen davranış göstermeleri amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılacak betonarme numuneler Tablo 2.2.’deki deney matrisinde gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Deney matrisi

Numune Sayısı			Davranış	Boyuna Donatı Oranı
Çarpma Deneyi	Eğilme Deneyi	Referans		
	Çarpma Sonrası			
3	3	1	Eğilme	ρ_{min}
1	1	1	Eğilme Kritik	$2\rho_{min}$
1	1	1	Eğilme +Kesme	$4\rho_{min}$
1	1	1	Kesme Kritik	$6\rho_{min}$
3	3	1	Kesme	ρ_{max}

Betonarme elemanları oluşturan beton ve çelik malzemesinin dayanımları yükleme hızına bağlı olarak değişmektedir (Abrams, 1917; Watstein, 1953). Malzeme dayanımlarında yükleme hızına bağlı olarak gerçekleşen bu değişim betonarme elemanlarda yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde değişmesine sebep olmaktadır (Atchly ve Furr, 1967). Yükleme hızının statik yüklemelere göre çok daha büyük olduğu çarpma veya darbe gibi anlık impuls yükleri altında taşıma gücündeki değişim bu duruma örnek gösterilebilir. Betonarme elemanlara ait yük taşıma kapasitesindeki bu değişim literatürde bazı katsayılar ve logaritmik fonksiyonlarla tanımlanmaktadır (Macneely ve Lash, 1963). Ancak dinamik dayanımı belirlemekte kullanılan, dinamik yük taşıma kapasitesinin statik yük taşıma kapasitesine oranı olarak tanımlanan dinamik büyütme çarpanı (Dynamic Increase Factor-DIF) literatürde en yaygın kullanılan ifadededir (Cotsovos, 2010; Satadru ve Fujikake, 2012; Adhikary, 2014). Bu aşamada betonarme kirişlerin davranışlarındaki değişim ile çarpma etkisi arasındaki ilişkiyi incelenecek ve dinamik yük taşıma kapasitesinin statik yük taşıma kapasitesine oranı olarak tanımlanan “dinamik büyütme çarpanı” katsayısındaki değişimi de belirlenecektir.

Deneyisel çalışmanın son aşamasında çarpmaya maruz kalmış numunelerin ve çarpma etkilerine maruz kalmamış referans numunelerinin eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonunda çarpmaya maruz kalmış betonarme kirişlerin davranışlarındaki değişim ile çarpma etkisi arasındaki ilişki belirlenmiştir. Eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen kaybetmemiş, farklı süneklik kapasitesine sahip, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin artık yük ve moment taşıma kapasiteleri (residual load bearing capacity) ile sünekliklerindeki değişim incelenmiştir. Çalışmanın sonunda

betonarme kirişlerin hasar yoğunluğuna bağlı olarak onarım, güçlendirme veya yeniden imalat gibi önerilerde bulunulmuştur.



BÖLÜM 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çarpma etkisi üzerinde yapılan ilk deneysel çalışmalar beton malzemesi üzerinde yapılmış olup beton malzemesinin, yükleme hızına bağlı olarak dayanımının değiştiği belirlenmiştir (Grime, 1934). Daha sonraki yıllarda beton malzemesi karışımına farklı malzemeler eklenmiş ve elde edilen yeni beton malzemesinin davranışındaki değişimler de çarpma etkisi altında incelenmiştir (Suaris ve Shah, 1983; Banthia ve ark., 1989; Habel ve Gauvrenau, 2019). Yapı elemanlarına çarpma testleri ise ilk olarak beton elemanlara uygulanmıştır (Mylrea, 1940; Kluge, 1943). Uygulanan bu çarpma etkileri, test edilen numunelerin maksimum eğilme kapasitenin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çarpma etkilerine maruz kalan yapısal elemanlar için çeşitli güçlendirme yöntemleri kullanılarak betonarme davranışın iyileştirilmesi de araştırılmaktadır. Ayrıca çarpma etkilerine maruz kalan yapısal elemanlar için çeşitli güçlendirme yöntemleri kullanılarak betonarme davranışın iyileştirilmesi de araştırılmaktadır. Beton ve betonarme elemanlar özellikle FRP (Barr ve Baghli, 1988; Sukontasukkul ve ark., 2002; Khalighi ve Banthia, 2011; Ramanna-Sanjeevaiah, 2012; Jordan ve Naito, 2014; Pham ve Hao, 2016), GFRP (Goldston ve ark., 2016), CFRP (Gómez-del Rio ve ark., 2005; Kantar, 2009; Anıl ve Yılmaz, 2015; Sadraie ve ark., 2019), çelik şerit (Erki ve Meier, 1999; Marar ve ark., 2001) ve çelik fiber (Habel ve Gauvreau, 2008; Ulzurrin, Zanuy, 2017 ve 2018) malzemeleri ile güçlendirilerek maksimum eğilme kapasitesinin artırılması amaçlanmıştır. Güçlendirilen elemanlardaki kesme ve eğilme kapasitelerinin artışı ve elemanları göçmeye götüren mekanizma incelenerek betonarme eleman davranışında meydana gelen iyileştirmenin belirlenmesi amaçlanmıştır. Betonarme elemanların çarpma etkileri altındaki dinamik davranışını tespit edebilmek için birçok dölşeme (Riera, 1998; Ong ve ark., 1999; Murtiadi ve Marzouk, 2001; Delhomme, 2005; Mougin ve ark., 2005; Zineddin ve Krauthammer, 2007; Danyciger ve ark., 2007; Batarlar, 2013; Zhang ve ark., 2014; Arsan, 2014; Yılmaz ve ark., 2017; 2018), kiriş (Louw ve ark., 1992; Erki ve Meier,

1999; Marar ve ark., 2001; Kishi ve ark., 2002; Gómez-del Rio ve ark., 2005; Kantar, 2009; Saatci S. ve Veccio, 2009; Ramanna-Sanjeevaiah, 2012; Dancygier ve ark., 2012; Zhai ve ark., 2016; Pham ve Hao, 2016; Zhang ve ark., 2019; Fan, 2019; Huawei, 2019), kolon (Williamson ve ark., 2011; Sharma ve ark., 2012; Liu ve ark., 2017; Gholipour, 2018; Gürbüz T. ve ark., 2019; Do ve ark., 2019; Fan, 2019; Jin, 2019) ve perde (Dancygier ve ark., 1996; 1999; 2007) deneyleri yapılmıştır. Ayrıca gelişen beton teknolojisiyle elde edilen çelik fiber katkılı ultra yüksek performanslı lifli betondan yapılmış betonarme elemanlarla yapılan deneysel çalışmaların da sayısı giderek artmaktadır (Yoo ve ark., 2015; 2017; Zany 2018). Bununla birlikte farklı yapı türleri için de olası çarpma etkilerini göz önünde bulundurarak oluşturulan deneyler de literatürde mevcuttur (Zhao, 2018; Wang ve Morgenthal, 2017; 2018). Çarpma etkisi gibi dinamik etkiler altındaki beton malzemesinin ve betonarme elemanların davranışı ile ilgili araştırmalar devam etmekle birlikte henüz yeteri kadar inceleme yapılamamıştır. Yapılan az sayıdaki çalışmada, çarpma gibi dinamik etkiler altında, yükleme hızına bağlı olarak betonarme yapı elemanlarının da farklı davranış gösterdiği belirlenmiştir (Bischoff ve Perry, 1995; Zineddin ve Krauthammer, 2007; Cotsovos 2010; Satadru ve ark., 2012; Adhikary ve ark., 2012 ve 2014; Korucu ve Irfanlıoğlu, 2018; Lee, 2018).

Deneysel çalışmaların sonunda ise betonarme elemanların göçme durumları, çatlak ilerleme durumları ile yerdeğiştirme değerleri ve maksimum kapasite değerleri araştırılmıştır. Çalışmalarda kullanılan çarpma enerjileri, farklı şekle ve kütleye sahip vurma başlıkları ile değişken düşme yükseklikleri kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır (Nataraja ve ark., 2005; Remennikov ve Kaewunruen, 2006; Krauthammer ve ark., 2008; Saatci ve Vecchio, 2009; Fujikake ve Soeun, 2009). Ayrıca farklı enine ve boyuna donatı detayları kullanılarak üretilen betonarme elemanların, statik ve dinamik etkiler altındaki davranışları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile dinamik yük taşıma kapasitesinin statik yük taşıma kapasitesine oranıyla bulunan ve dinamik büyütme çarpanı olarak tanımlanan parametre tespit edilmeye çalışılmış ve betonarme elemanlardaki göçme modlarının değişimi de değerlendirilmiştir (Arslan, 1995; Abbas ve ark., 2004). Çarpma yükü ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar analiz edildiğinde, çarpma etkisindeki tam ölçekli olarak

deney yapılan betonarme kirişlerin oldukça az sayıda olduğu belirlenmiştir (Barr ve Bouamrata, 1988; Adhikary ve ark., 2012). Yapılan çalışmalar genel olarak $\frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{4}$ ölçekli hazırlanmış betonarme elemanlardan oluşmaktadır. Çarpma deneyi yapılan betonarme kirişlerde, basit kirişe ait mesnet koşulları çarpma deney düzeneğinde tam olarak oluşturulamamıştır (Tang, 2002; Cotsovos, 2010; Yılmaz, 2014). Çarpma etkisinin incelendiği deney düzeneklerinde sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıpları oluşmaktadır. Betonarme elemanın dinamik davranışının gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için bu enerji kayıplarının dikkate alınması gerekir (Satadru ve ark., 2012). Bununla birlikte teorik olarak öngörülen mesnetlenme şartlarını deney düzeneğinin tam olarak yansıtabilmesi, deneysel çalışmanın doğruluğu açısından oldukça önemlidir (Ahmed ve ark., 2001; Kishi ve ark., 2002). Fakat literatürdeki bazı deneysel çalışmalarda, kullanılan deney düzenekleri sürtünmeden dolayı oluşan enerji kayıplarına engel olamamakta (Kishi ve Bhatti, 2010; Ramanna-Sanjeevaiah, 2012; Zhan ve ark., 2015), ayrıca kullanılan mesnet detayları teorik olarak öngörülen mesnetlenme şartlarını sağlayamamaktadır (Goldston ve ark., 2016; Zhai ve ark., 2016; Anil ve ark., 2016). Bununla birlikte, bu çalışmaların genelinde ölçekli deney numuneleri kullanılmış ve boyut etkisi ihmal edilmiştir (Liao ve ark., 2016; Isaac ve ark., 2017; Pham ve Hong, 2017).

Çarpma etkisi altındaki betonarme elemanların davranışlarının incelenmesinin önemi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de giderek artmaktadır. Bu konu ile ilgili ülkemizde son yıllarda birçok çalışma tamamlanmış olup hali hazırda devam eden çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genel olarak darbe etkisi altındaki farklı betonarme elemanların davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda tasarım, kapasite ve mesnetlenme şartları açısından birbirinden farklı deney numune ve düzenekleri kullanılmıştır (Koç, 2008; Çağaloğlu, 2010; Batarlar, 2013; Yılmaz, 2013; Erdem, 2013; Coşgun, 2014; Yılmaz, 2014; Arsan, 2014; Yaşayanlar, 2015; Yorgancılar, 2016; Yazıcı, 2017; Yılmaz, 2018 ve Sezer, 2018).

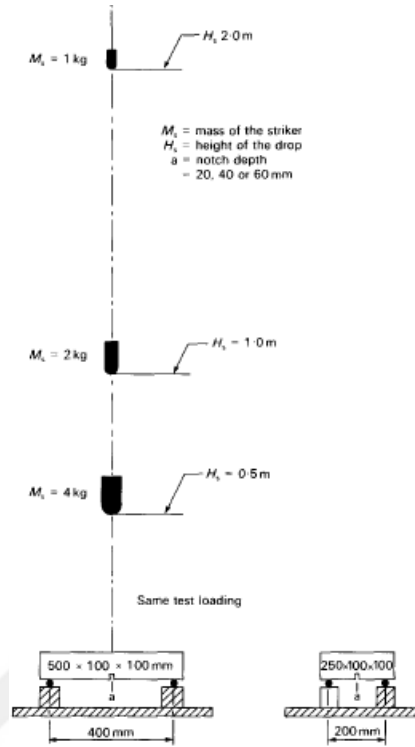
Literatürde karşılaşılan bu eksiklikleri gidermek amacıyla bu tez çalışması kapsamında tam ölçekli numunelerin test edilebildiği bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney

düzenğinde sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıpları dikkate alınmış ve bu enerji kayıplarını minimize etmek amacıyla sürtünme etkisini azaltan bir ray sistemi geliştirilmiştir. Ayrıca mesnet koşullarının tam olarak yansıtılabilmesi amacıyla yeni bir mesnet tasarımı da yapılmıştır.

3.1. Literatür Özeti (Kirişler)

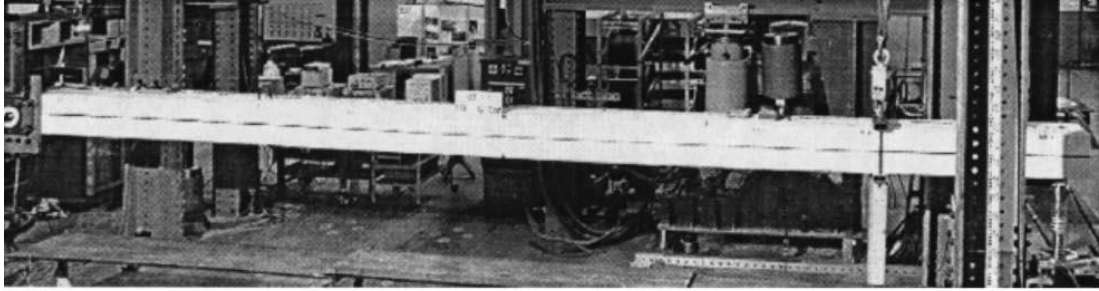
Bu tez çalışması kapsamında, farklı çarpma enerji düzeylerine maruz kalmış yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin davranışları inceleneceğinden detaylı bir literatür çalışması sadece çarpma etkisi altındaki kirişler üzerinde yapılmıştır.

B. Barr and A. Baghli (1988) yaptıkları deneysel çalışmada 100 mm x 100 mm enkesit ölçülerine sahip 250 mm ve 500 mm uzunluğundaki ölçekli betonarme kiriş numunelerine çarpma testleri uygulamıştır. Bu testler sırasında aynı yükleme prosedürü farklı yükseklik ve kütleler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin imalatı sırasında değişen fiber malzeme (%1, %2 ve %3) oranları kullanılarak beton malzemesi takviye edilmiş ve betonarme kiriş numunelerinde çarpma testleri altında dinamik dayanımının değişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca fiber oranıyla betonarme davranışın değişimi ve numunelerin göçme şekilleri incelenmiştir. Ancak bu çalışmada ölçekli numuneler kullanılmış ve basit kirişe ait mesnet şartları uygun şekilde sağlanamamıştır (Şekil 3.1.).

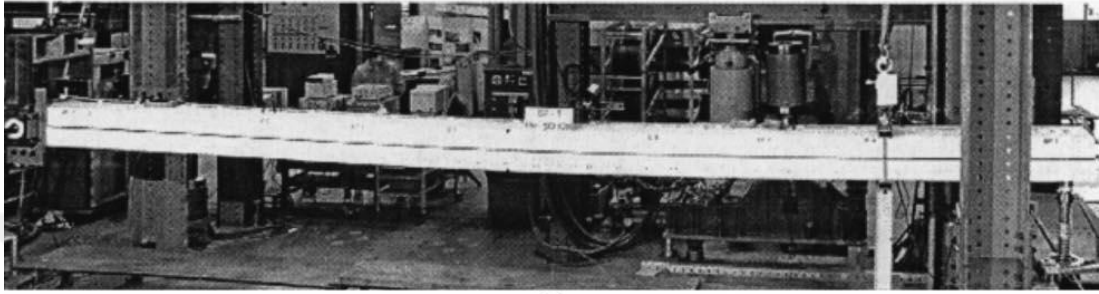


Şekil 3.1. Deney numuneleri ve dinamik (çarpma) yükleme

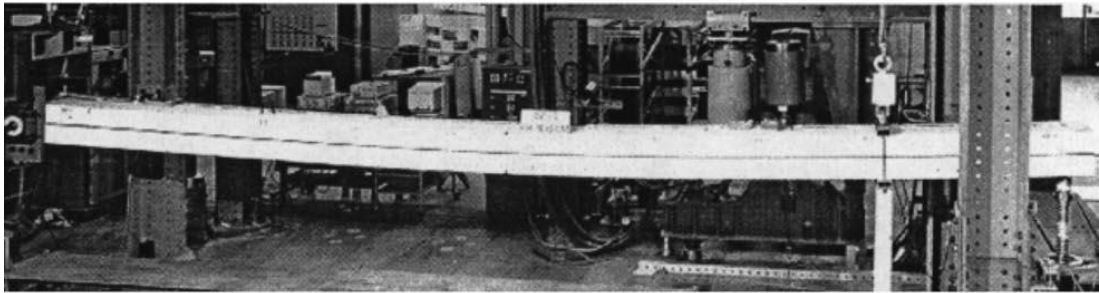
Erki, M. A., & Meier, U. (1999) yaptığı çalışmada sabit boyuna ve enine donatılı betonarme kirişlerde üç farklı yükseklikten sabit kütleli vurma başlığı ile çarpma testi yapmışlardır. 2 grup olarak tasarlanan betonarme numunelerde bir grup numune çelik plaka ile diğer grup numuneler ise CFRP malzemesi ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme yöntemi, betonarme olarak imal edilmiş kirişlere çarpma etkisine maruz kalmadan uygulanmıştır. Her iki grup numune arasındaki dinamik davranış ve dayanım farklılıkları gözlemlenmiştir. Güçlendirme yöntemlerinin kirişlere dinamik dayanım bakımından katkısı araştırılmıştır (Şekil 3.2.).



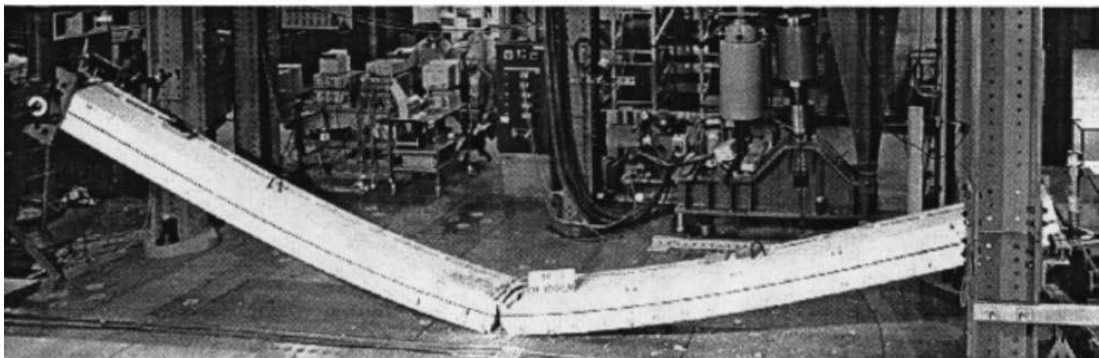
(a)



(b)



(c)

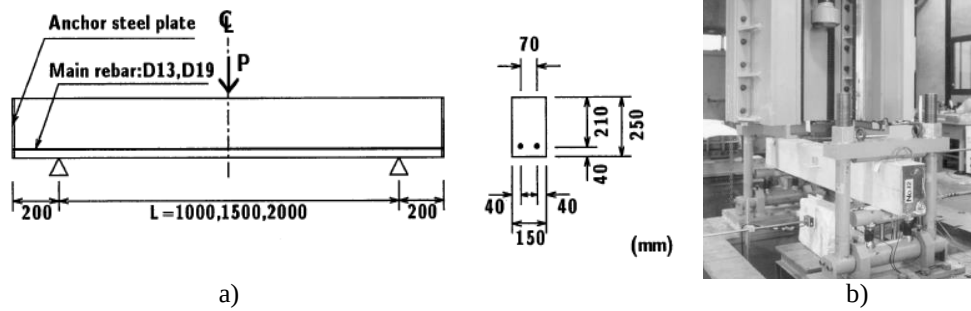


Şekil 3.2. Deney numuneleri ve dinamik (çarpma) yükleme

Bu çalışmada boyuna ve enine donatı oranları sabit tutulan betonarme kirişlerde sadece eğilme dayanımı değiştirilerek güçlendirmenin dinamik davranışa etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Literatürden bilindiği üzere eğilme davranışı gösteren kirişler dahi dinamik etkiler altında gevrek (kesme) davranışı gösterebilmektedir. Bu

çalışmada dinamik eğilme dayanımı ile birlikte dinamik kesme dayanımını ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmamıştır.

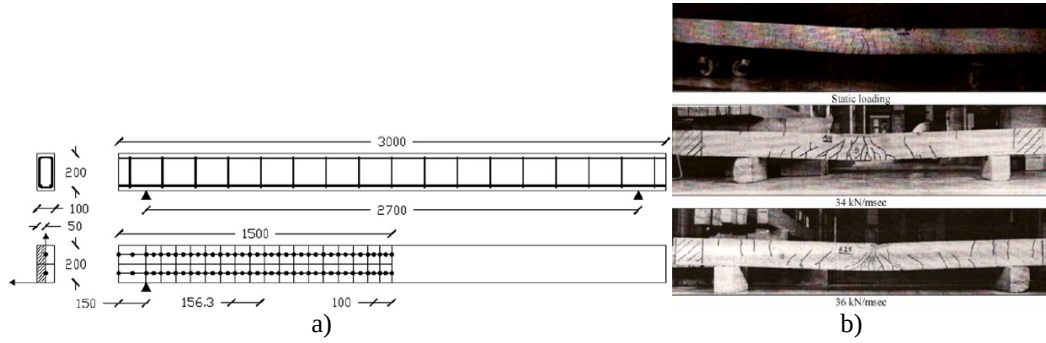
N. Kishi ve ark. 2002 yılında yaptığı çalışmada kayma donatısız olarak üretilmiş betonarme kirişlerin çarpma yüklemesi altındaki davranışları incelenmiştir. İki farklı boyuna donatı seçilerek üretilen betonarme kirişlerin en kesit ölçüleri 150x250 mm ve boyları 1000, 1500 ve 2000 mm olarak seçilmiştir(Şekil 3.3. a). Çalışmada kullanılan betonarme kirişler için kesme açıklığının faydalığı yüksekliğe oranı olarak tanımlanan üç farklı a/d oranı seçilmiştir. Farklı çarpma hızlarının (1-6 m/s) kullanıldığı bu çalışmada 300 kg 'lık kütlenin serbest düşmesiyle oluşturulan çarpma enerjisi kesme ve eğilme kritik olarak tasarlanmış kirişlere uygulanmıştır(Şekil 3.3. b). Elde edilen verilere göre betonarme elemanların dinamik davranışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney sonuçlarına göre dinamik yük taşıma kapasitesinin statik yük taşıma kapasitesine oranı olarak tanımlanan dinamik büyütme çarpanı hesaplanmış ve formülüze edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan betonarme elemanlar ölçekli numuneler olarak tasarlanmıştır. Bu durum betonarme davranışa doğrudan etki etmektedir. Ayrıca çalışmada eğilme kritik kirişe ait deney sonuçları ihmal edilerek çıkarımlar yapılmış ve önerilen formül genelleştirilmiştir.



Şekil 3.3. a) Deney numunelerinin geometrisi ve b) Çarpma deney düzeneği

Demetrios M. Cotsovos (2009) yaptığı çalışmada farklı yükleme hızlarının betonarme kirişlerdeki dayanıma etkisini araştırmış ve sonuçları statik deneylerle karşılaştırarak dinamik davranış ve statik dayanımlar arasındaki farkı göstermiştir. 34-36 kN/msec hızlarını deneyerek çarpma testleri uygulamıştır. Daha sonra daha yüksek çarpma

hızları için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak parametrik çalışma yapmıştır. Deneylerde kullanıldığı numunelere ait kesit geometrisi Şekil 3.4. a’da farklı yükleme hızları için sonuçlar ise Şekil 3.4. b’de verilmiştir.



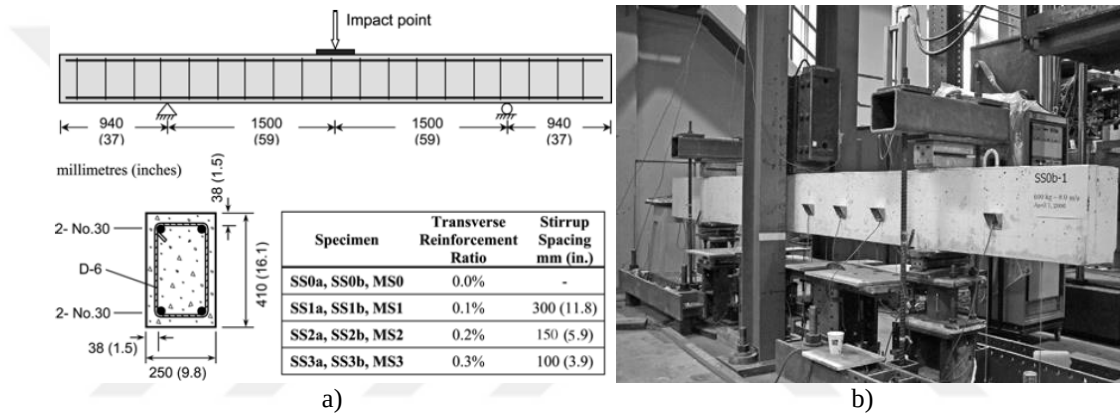
Şekil 3.4. a) Numunelerinin kesit geometrisi b) Statik ve dinamik deneyler sonrası deney numunelerinin durumu

Deney sonuçları ve nümerik analizler sonuçlarına göre kirişlere ait dinamik yük taşıma kapasitesi ve bu kapasiteyi hesaplayan teorik bir formül elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada farklı boyuna donatı oranları kullanılarak tasarımı yapılan eğilme kirişleri için elde edilen sonuçlar için literatürdeki formüller ile karşılaştırılmalar yapılmıştır. Çarpma veya darbe yüklemesinde betonarme elemanların dayanımına etki eden; yükleme hızı, beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı, vurma başlığının kütlesi gibi birçok parametre olduğu literatürden bilinmektedir. Bu çalışmada ise sadece yükleme hızının eğilme kirişlerinin dinamik dayanımına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca verilen enkesit ölçüleri bakımında betonarme kiriş numunelerinin ölçekli olarak tasarlandığı görülmüştür. Betonarme davranışı etkileyen en önemli parametrelerden biri olan bu durum davranışın öngörülmesi açısından olumsuz bir etki olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda deneysel parametrelerin tam sağlıklı incelenmesi için parametrik çalışmanın en az 3 değişkenle yapılması gerektiği bilinmektedir. Parametrik çalışma sonlu elemanlarda sürdürülmüştür. Dinamik dayanımın değişimi için 2’den fazla hız kullanmalıdır.

Saatci, S., & Vecchio, F. J. 2009 çalışmada sabit enkesit ölçülerine ve boyuna donatıyla tasarımı yapılmış betonarme kirişler için çarpma etkisi altındaki kesme davranışı incelenmiştir. Deney numuneleri farklı kayma donatısı oranları kullanılarak deney serileri oluşturulmuştur. İki farklı düşme yüksekliğinden serbest bırakılan 211

ve 600 kg'lık kütleler ile çarpma deneyleri yapılmış, kirişlerin dinamik dayanımları ve kayma donatısına bağlı dinamik davranışları incelenmiştir.

Bu deneysel çalışmada kullanılan çarpma enerjisi, parametrik çalışma ilkelerine bağlı olarak hem farklı kütleler ile hem de farklı yüksekliklerle ile sağlanmıştır. Her iki durumda da aynı çarpma enerji seviyelerinde betonarme davranış araştırılmıştır. Kayma donatısının olmadığı ve olduğu 3 farklı durum incelenerek dinamik davranışın değişimi gözlemlenmiştir. Şekil 3.5. a ve Şekil 3.5. b'de deney numunelerinin geometrisi ve deney düzeneği gösterilmiştir.



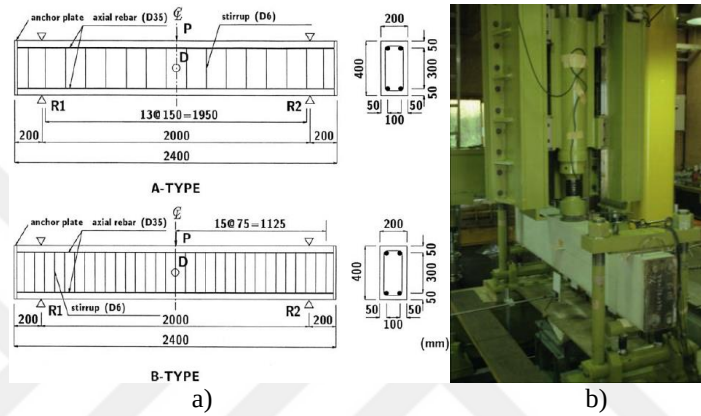
Şekil 3.5. a) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi b) Deney düzeneği

Bu çalışmada sabit boyuna donatı oranı (%1.38) ve a/d (4.03) oranı ile üretilmiş betonarme kirişler statik yükleme altında SS0 ve SS1 isimli serileri kesme kritik, SS2 ve SS3 isimli seriler ise eğilme kritik davranış göstermiştir.

Deneylerde kirişlerin betonarme davranışını etkileyen en önemli parametreler olan a/d oranı ve boyuna donatı oranı sabit tutularak sadece kayma donatısı ile eğilme ve kesme kritik davranış incelenmiştir. Farklı boyuna donatı oranlarının kullanıldığı durumlarda oluşabilecek göçmeye mekanizmaları bu çalışmada incelenmemiştir. Bununla birlikte daha büyük boyuna donatı oranlarıyla tasarımı yapılabilecek betonarme kirişlerin kesme davranışı incelenmesi çalışmayı destekleyebilecek araştırma konularından biridir. Ayrıca deneylerde vurma başlığı serbest bırakılırken kontrolsüz ve tek bir aks üzerinden geçmeyerek çarpma testi yapılmıştır. Bu da deneyde çarpma noktasının

gerçekleşmesi gereken tam orta noktadan sapmalara yapabilmek ve vurma başlığının geri sekmesine yol açabilmektedir.

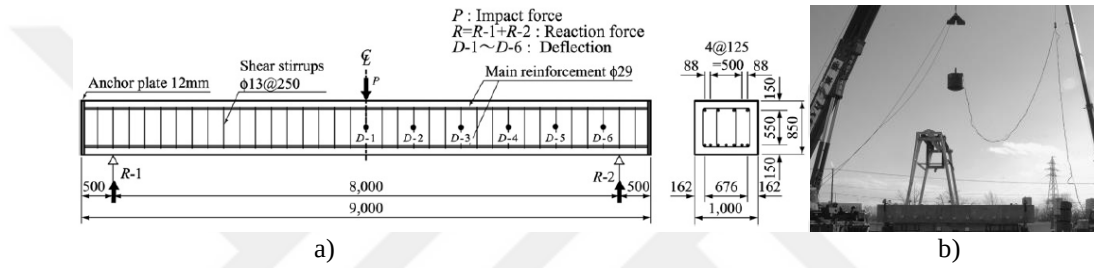
Abdul Qadir Bhatti ve ark. 2009 yılında yaptığı çalışmada kesme kritik betonarme kirişlerin çarpma yüklemesi altındaki elasto-plastik davranışını incelenmiş ve sonuçları nümerik modelleriyle karşılaştırmıştır. Çalışmada incelenen betonarme kirişlere ait kesit geometrileri ve deney düzeneği Şekil 3.6. a ve 3.6. b’de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. a) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi b) Deney düzeneği

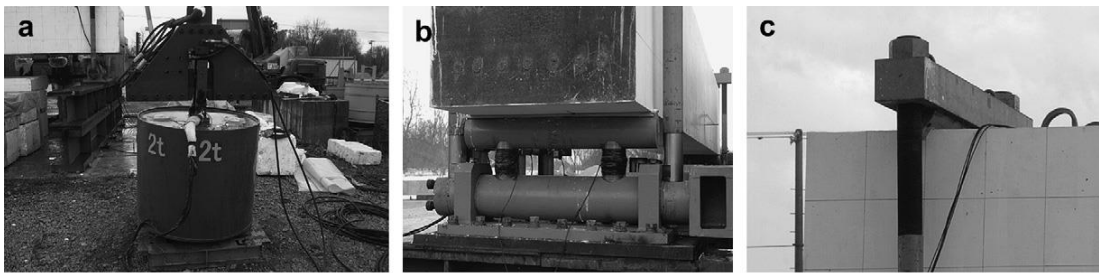
Deneyisel çalışma sırasında çarpma testleri 400 kg’lık ve 200 mm çapındaki çelik, dairesel, çelik kütlenin betonarme numuneler üzerine serbest düşme yapmasıyla tamamlanmıştır. Serbest düşme yaptırılan bu kütle için 6 farklı çarpma hızı kullanılmıştır. Elde edilen deney verileri zamana bağlı olarak reaksiyon ve uygulanan çarpma kuvveti, yerdeğiştirme ve enerji sönümleyebilme yeteneği bakımından nümerik modellerle ile karşılaştırılmıştır. Deneyisel çalışmada 2 farklı kayma donatısına kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda deneyisel parametrelerin tam sağlıklı incelenmesi için parametrik çalışmanın en az 3 değişkenle yapılması gerektiği bilinmektedir. Parametrik çalışma sonlu elemanlarda sürdürülmüştür. Deneyisel aşamada dinamik kayma dayanımının değişimi için 2’den fazla kayma donatısı oranı kullanılmalı ve sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanması çalışmanın içeriğini zenginleştirecektir. Ayrıca kirişlerin çarpma etkisinden sonra kalıcı dayanımlarının belirlenmesine ait herhangi bir bilgi verilmemiştir.

Norimitsu Kishi ve Abdul Qadir Bhatti 2010 yılında yaptığı çalışmada betonarme köprü kirişlerinin doğrusal olmayan dinamik davranışlarını belirlemeyi amaçlamıştır. Bu amaçla serbest düşme deneyleri ile çarpma etkilerinin uygulandığı betonarme köprü kirişlerinin davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Deneylerde 2t'luk kütle belirli bir yükseklikten bırakılarak deneyler tamamlanmış ve parametrik çalışma nümerik modelde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dış çapı 1 m olan çelik silindirin için çelik ve betonarme malzeme ile doldurularak 2t'luk kütle sağlanmıştır. Serbest düşme deneyinde kullanılan betonarme köprü kirişlerinin geometrisi Şekil 3.7. a'da, deney düzeneğinin gösterimi ise Şekil 3.7. b'de verilmiştir.



Şekil 3.7. a) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi b) Deney düzeneği

Yapılan deneylerde basit kirişe ait mesnet koşulları öngörölmüş ve mesnet reaksiyon ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan ve serbest düşme yapan kütle ve mesnet detayları sırasıyla Şekil 3.8. a, 3.8. b ve 3.8. c'de verilmiştir.

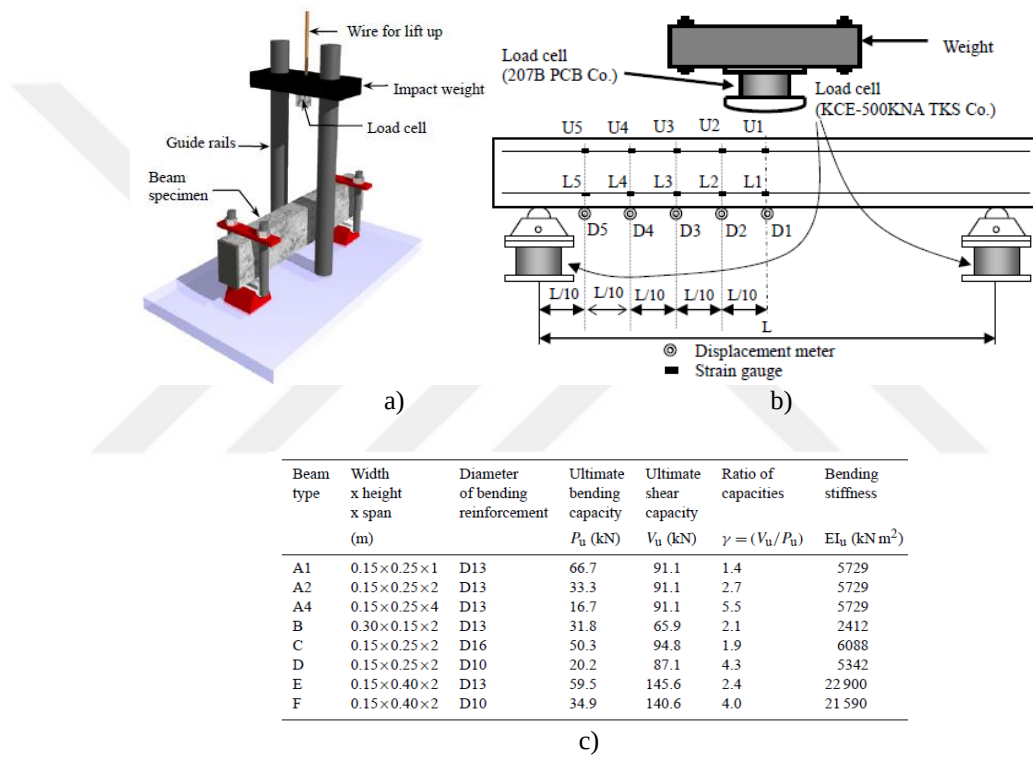


Şekil 3.8. a) Serbest düşme yapan kütle b) Mesnet alt başlık detayı c) Mesnet üst başlık detayı

Yapılan bu çalışmada parametrik çalışmanın tamamı nümerik modelle gerçekleştirilmiştir. Sonlu elamanlar yöntemiyle gerçekleştirilen nümerik modelin doğrulanması için yeterli düzeyde deney yapılması veya deneylerin tekrar edilip aynı veya benzer sonuçların görülmesi gerektiği literatürden bilinmektedir. Bu çalışmada

kullanılan betonarme köprü kiriş numuneleri ile daha fazla deney yapılması çalışmanın sonuçlarını doğrular nitelikte olacaktır.

S. Tachibana ve ark. 2010 yılında yaptıkları çalışmada betonarme kirişlerin çarpma yükleri altındaki performanslarını belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada farklı geometriler ile oluşturulmuş eğilme davranışı göstermesi beklenen betonarme kirişler test edilmiştir. Kirişlerde kullanılan donatı çapları ve kiriş ölçüleri Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. a) Deney düzeneği b) Deneylerde kullanılan yükleme şeması ve yapılan ölçümler c) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi

Ayrıca deneylerde betonarme yüzeylerle etkileşim yüzeyi 565 mm ve çapı 75 mm yuvarlak bir vurma başlığı 150, 300, 450 kg'lık kütleler olarak tasarlanmıştır ve deneylerde kullanılmıştır. Çarpma deneylerinde kullanılan deney düzeneği çelik bir taşıyıcı sisteme sahip olup vurma başlığı serbest düşmeyi bir ray üzerinde ilerleterek yapacak şekilde geliştirilmiştir. Deney düzeneği, alınan ölçümler ve yükleme şeması Şekil 3.9.'da gösterilmiştir. Deneyler iki seri olarak tasarlanmış ve tamamlanmıştır. İlk seride farklı çarpma kütleleri ve çarpma hızları kullanılarak deney numuneleri test

edilirken ikinci seride sabit kütle ve hızla (300 kg ve 5 m/s) çarpma deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan deneylerle çarpma etkisine maruz kalmış betonarme elemanlar için bir performans kriteri belirlemeye çalışılmış ve nümerik analizlerle deney sonuçları desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre impulsun, çarpma deneylerinde kullanılan hız ve kütlenin bir fonksiyonu olduğu, deneylerde elde edilen maksimum yerdeğiştirme değerinin de uygulanan çarpma kuvvetine doğrudan bağlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca betonarme elemanların statik eğilme kapasitesi ile çarpma enerjisi arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

Ancak bütün bu sonuçların yapılacak deneysel ve nümerik çalışmalarla genelleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca statik eğilme kapasitesi ile çarpma enerjisinin, maksimum yerdeğiştirme değerleri ile çarpma kuvvetinin arasındaki bağlantıyı anlatan formüllerin genelleştirilmesi için daha çok deneysel ve nümerik çalışma yapılmalıdır. Bununla birlikte çalışmada kullanılan deney sonuçlarının betonarme davranışı doğru temsil eden ölçeksiz numunelerle doğrulanması gerekmektedir.

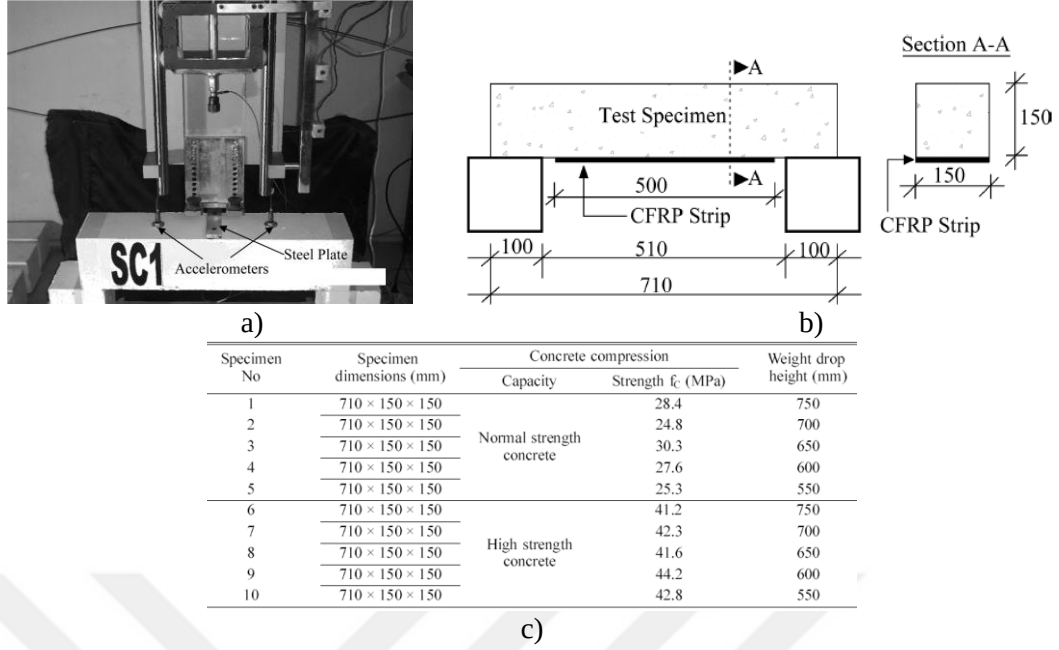
M. Chakradhara Rao ve ark. 2011 yılında yaptığı çalışmada geri dönüşümlü agregadan üretilmiş beton basit kirişlerde davranışın çarpma yükü altındaki değişimi incelenmiştir. Boyutları 100 mm x 150 mm ve boyu 1150 mm olan beton kirişlere ait beton malzemesinde karışım oranları %0, %25, %50, %100 olarak seçilen geri dönüşümlü agregat malzemesi kullanılarak 12 adet beton numune üretilmiştir. Bu numuneler için 5 kg ağırlığındaki kütle 0,225m yükseklikten serbest düşme testleri, basit mesnetli olarak tasarlanmış kiriş numunesi göçme durumuna gelene kadar tekrarlanmıştır. Çarpma testleri sonucunda numunelerin dinamik dayanımındaki değişim ve kiriş numunelerini göçmeye götüren çarpma enerjileri karşılaştırılarak geri dönüşümlü agregat malzemesinin çarpma yükleri altında davranışa etkisi gözlemlenmiştir. Elde edilen yük yerdeğiştirme-ilişkileri ve sönümlenen çarpma enerjileri ile beton kirişteki göçme modları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada geri dönüşümlü agregat malzemesi kullanımının, dinamik dayanımını azalttığı ancak deney numunelerine ait sünekliği bir miktar arttırdığı görülmüştür. Bu çalışmada üretilen kiriş numuneleri ölçeklidir. Literatürden de bilindiği üzere hem beton hem de betonarme davranışı ölçekli numunelerde değişmekte ve ölçeksiz numunelerin gerçek

davranışını yansıtamamaktadır(Şekil 3.10. a). Ayrıca öngörülen mesnet detayı ve imal edilmiş mesnetler de basit mesnet koşullarını sağlamakta yetersiz kalmaktadır(Şekil 3.10. b).



Şekil 3.10. a) Çarpma deneylerinde kullanılan deney düzeneği b) Mesnet detayı

Erkan Kantar ve Özgür Anıl'ın 2012 yılında yaptığı çalışmada CFRP şeritler ile güçlendirilmiş beton kiriş numunelerinin çarpma yüklemesi altındaki davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada düşük yükleme hızları kullanılarak yapılan çarpma deneylerinde 750, 700, 650, 600 ve 550 mm'lik düşme yükseklikleri kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan CFRP çekme bölgesindeki beton yüzeyine şerit olarak yapıştırılmıştır. Deneylerde 150x150 mm ölçülerinde ve 710 mm uzunluğundaki beton kiriş numuneleri kullanılmıştır. Deneyler iki set üzerinden planlanmış ve deney setleri arasında beton dayanımı ve çarpma hızları üzerinden parametrik çalışma yapılmıştır. Deneylerde kullanılan deney düzeneği, deney numunelerinin geometrisi ve deney matrisi şekil 3.11.'de gösterilmiştir.

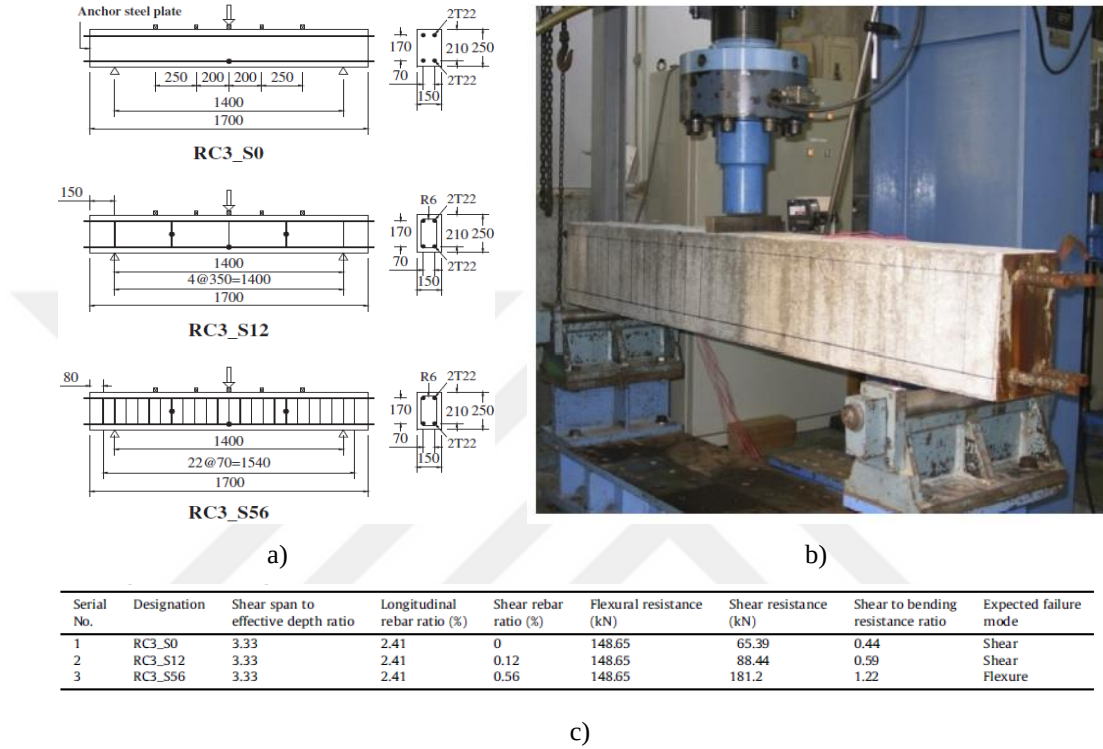


Şekil 3.11. a) Deney düzeneği b) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi c) Deney matrisi

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre CFRP ile güçlendirilmiş beton kiriş numunelerinin davranışının ve göçme modlarının değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca deneylerdeki tekrarlı çarpma sayısı ve beton dayanımındaki değişimin de davranışı doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Ancak deneylerde kullanılan beton kiriş numunelerin ölçekli olması elde edilen sonuçların ölçeksiz deneylerle doğrulanmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte deneylerde kullanılan mesnet detayı, tanımlanan sabit mesnet koşulları için yetersizdir.

Satadru Adhikary ve ark. 2012’de yaptıkları çalışmada 150x250 mm boyutlarında sabit boyuna donatılı betonarme kirişlerde 3 farklı kayma donatısı konfigürasyonu ile yaptıkları dinamik deneylerde betonarme kirişlerin dinamik dayanımındaki değişimi araştırmışlardır. Sabit a/d (3,33) ve boyuna donatı oranı (%2,41) ile üretilmiş betonarme kirişlerin dinamik etkiler altındaki göçme mekanizmaları ve betonarme davranışları incelenmiştir. Şekil 3.12. a’da deney numunelerine ait kesit özellikleri, 3.12. b’de deney düzeneği ve 3.12. c’de numunelere ait moment ve kesme kuvveti taşıma kapasiteleri verilmiştir. Bu çalışma kapsamında tasarımı yapılan betonarme kirişlere 4 farklı yükleme hızı (statik, düşük, orta ve yüksek) uygulanmıştır. Farklı yükleme hızları altında dayanımdaki ve betonarme davranıştaki değişim ile dinamik

büyütme çarpanı olarak tanımlanan katsayısının değişimi incelenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmaya ek olarak yeni bir a/d (4,4) oranı seçilerek parametrik çalışma nümerik model üzerinden yapılmıştır. Bu aşamada boyuna donatı oranı da yaklaşık yarıya indirilerek dinamik davranıştaki değişim incelenmiştir.

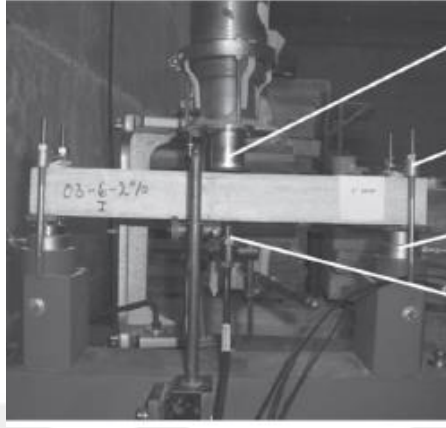


Şekil 3.12. a) Çarpma deneylerinde kullanılan numunelerinin geometrisi b) Deney düzeneği c) Numunelere ait moment ve kesme kuvveti taşıma kapasiteleri

Bu çalışmada kullanılan numune boyutları tam ölçekli deneyler için öngörülen geometrik ölçüleri sağlayamamaktadır. Ayrıca basit kirişe ait mesnet koşulları deneylerde anlatıldığı gibi sadece numune alt ucunda sağlanmış, üst başlık kısmı serbest bırakılmıştır. Bu nedenle basit kiriş için öngörülen mesnet koşullarının tam temsil edilemediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte nümerik çalışmada kullanılan yeni a/d oranı çalışmadaki boyutları değiştirdiğinden nümerik modelin deneysel bir çalışma ile doğrulanması gerektiği tespit edilmiştir.

Avraham N. Dancygier ve ark. 2012 yılında yaptığı çalışmada 25x40 mm boyutlarında, 320 mm uzunluğundaki ölçekli betonarme fiber kompozit kirişlere düşük enerjili çarpma deneyleri yapmıştır. Bu deneylerde farklı oranlarda çimento ve

fiber kullanılarak üretilen betonarme kirişlerin davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği ve deney matrisi Şekil 3.13.'te verilmiştir.



a)

Mixture ID	w/c ratio {1}	Fiber length (mm)	Fiber diameter (mm)	Fiber content (by volume)	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Toughness (N-mm)
03-0-0%	0.3	—	—	0{2}	84.0	12.5	99.6
03-6-1%	0.3	6	0.16	1%	85.2	11.5	1780.0
03-6-2%	0.3	6	0.16	2%	88.8	12.0	2121.1
03-35-1%	0.3	35	0.5	1%	71.9	9.4	1629.2
03-35-2%	0.3	35	0.5	2%	79.2	14.8	2388.5
03-35-05%-6-05%	0.3	Hybrid	Hybrid	1%{3}	71.6	13.5	1993.7
03-35-1%-6-1%	0.3	Hybrid	Hybrid	2%{4}	84.6	16.9	2882.2
06-0-0%	0.6	—	—	0{2}	37.3	6.4	39.3
06-6-1%	0.6	6	0.16	1%	39.8	7.8	1288.0
06-6-2%	0.6	6	0.16	2%	43.7	10.1	1639.4
06-35-1%	0.6	35	0.5	1%	35.0	7.8	1663.1
06-35-2%	0.6	35	0.5	2%	37.2	11.9	2202.4
06-35-05%-6-05%	0.6	Hybrid	Hybrid	1%{3}	33.4	7.9	1024.4
06-35-1%-6-1%	0.6	Hybrid	Hybrid	2%{4}	37.7	9.2	1944.8

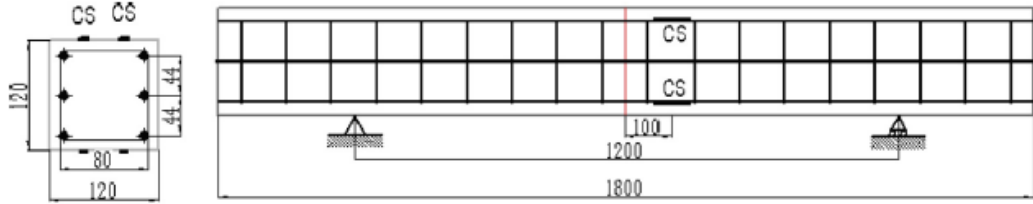
b)

Şekil 3.13. a) Deney düzeneği b) Numunelere çimento ve fiber karışım oranları

Çimento ve fiber karışım oranları kullanılarak üretilen betonarme kirişlerin davranışındaki değişim çarpma yükleri altında incelenmiştir. Elde edilen deneyler ile fiberin betonarme davranışa olumlu yönde katkı yaptığı, süneklik ve dayanımda önemli artışlar gösterdiği görülmüştür. Ayrıca hibrit teknoloji kullanarak üretilen betonarme kirişlerin davranışında da önemli iyileşmeler olduğu belirtilmiştir. Ancak deneylerde kullanılan numunelerin boyutları betonarme davranışın değişimini doğrulayamayacak niteliktedir. Ölçekli numunelerde belirlenen betonarme davranışın gerçek davranışı temsil etmediği literatürden bilinmektedir. Bu nedenle bu çalışmadaki deney sonuçlarının ölçeksiz olarak üretilmiş betonarme numunelerin deney sonuçları ile doğrulanması çalışmayı destekler nitelikte olacaktır. Ayrıca çarpma sonrası fiberin statik davranışa yani kalıcı dayanıma etkisi hakkında herhangi bir veriye çalışmada yer verilmemiştir.

Tingbian Zhan ve ark. 2015 yılında yaptıkları çalışmada farklı basınç dayanımına sahip (C27-C40) iki farklı sınıf betondan üretilmiş betonarme numunelerine (120x120 mm) çarpma testi uygulamışlardır. Tasarımı üç farklı boyuna donatı oranı kullanılarak yapılan bu 2 farklı numune grubu 6 mm çapında 100 mm sıklığında kayma donatısı ile boyutlandırılmıştır. Deneylerde kullanılan beton kirişlerin serbest açıklığı 1,2 m'dir. Bu çalışmada kullanılan deney numunelerinin geometrisi Şekil 3.14.'te deney matrisi

ise Şekil 3.15.'te verilmiştir. Deneylerde kullanılan betonarme kirişlere ait göçme yükü ve davranışı incelenmiş betonarme davranışın farklı boyuna donatı oranları ve beton dayanımı ile değişimi karşılaştırılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre boyuna donatı oranı, beton dayanımı, çarpma enerjileri betonarme davranışı ve betonarme kirişlerdeki hasarı doğrudan etkilemiştir.



Şekil 3.14. Deney numunelerinin geometrisi

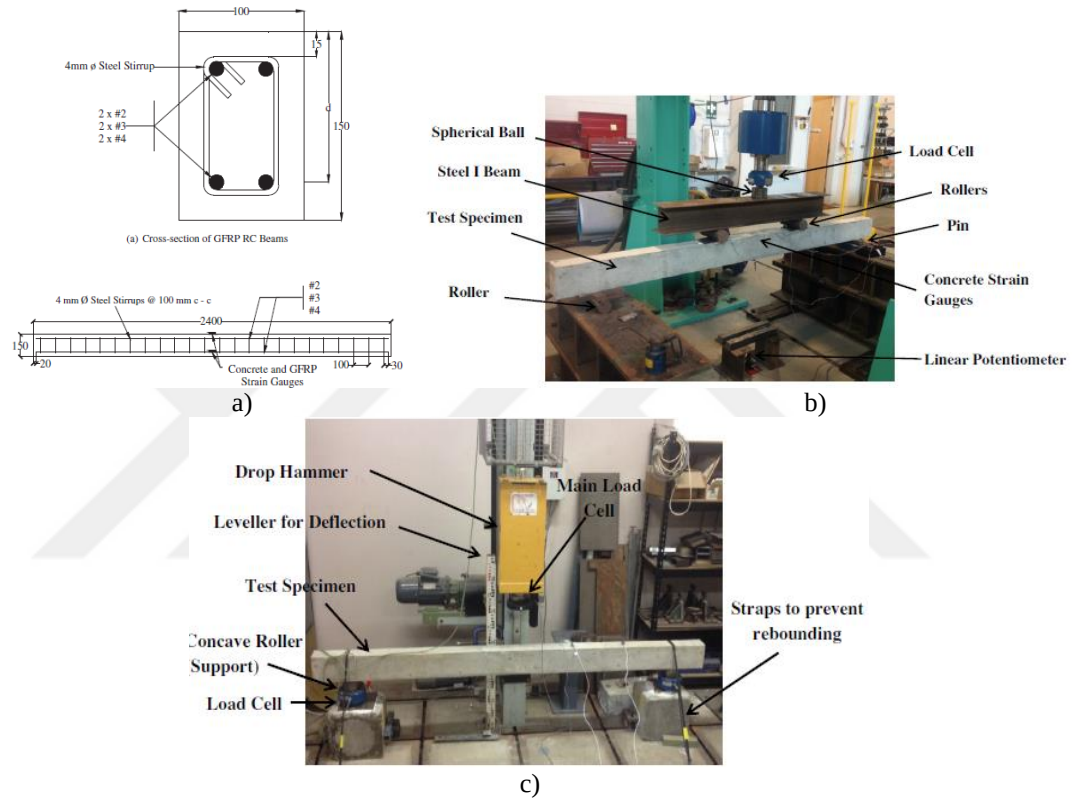
Designation of beams and static characteristics of reinforced concrete.

No.	Beam type	Compressive strength of concrete f'_c (MPa)	Longitudinal bar number and size (mm)	Static flexural load-carrying capacity P_u (kN)	Static maximum deflection D_{max} (mm)	Static maximum compressive strain ϵ_{cmax}
1	6-C27	27	6- Φ 6	13.9	15.25	0.00194
2	8-C27	27	6- Φ 8	15.6	13.94	0.00201
3	10-C27	27	6- Φ 10	27.2	10.2	0.00166
4	6-C40	40	6- Φ 6	15.8	13.95	0.00170
5	8-C40	40	6- Φ 8	19.35	11.28	-
6	10-C40	40	6- Φ 10	29.9	9.71	0.00178

Şekil 3.15. Deney matrisi

Yapılan testlerde 33,6 kg vurma başlığı kullanılmıştır. Kirişler göçme moduna gelene kadar tekrar vuruşlar gerçekleştirilmiştir. Vurma başlığının hafifliği nedeniyle tek seferde büyük impuls enerjisi yakalanamamıştır. Tekrar yüklemelerde hasarlı numuneye vurulduğundan başlangıç rijitliği değişecektir. Oysa statik deneylerdeki başlangıç rijitliği ile karşılaştırma yapabilmek için, numuneleri tek seferde göçmeye götüren çarpma enerjilerinin kullanılması daha gerçekçi değerlendirme yapma olanağı vermektedir. Numune boyutları tam ölçekli testler için yetersizdir. Deneysel çalışmada beton basınç dayanımının, betonarme davranışa etkisinin daha doğru yorumlanabilmesi için en az üç farklı beton dayanımı incelenmelidir. Böylelikle beton dayanımının çarpma deneylerinde betonarme kirişlerin davranışı üzerindeki etkisi daha net anlaşılabilir.

M. Goldston, A. Remennikov, M. Neaz Sheikh 2016 yılındaki araştırmalarında GFRP'nin betonarme kirişlerde dinamik dayanıma katkısı araştırılmıştır. Bu deneysel çalışmada kullanılan betonarme kirişler 100x150 mm boyutlarında ve 2000 mm uzunluğundadır. Deneysel çalışmada statik deneylerde 4 noktalı dinamik deneylere ise 3 noktalı yükleme prosedürü uygulanmıştır. Deney numunelerine ait kesit geometrisi ve yükleme şeması şekil 3.16.'da, deney matrisi ise şekil 3.17.'de verilmiştir.



şekil 3.16. a) Deney numunelerinin geometrisi b) Statik deney düzeneği c) Statik deney düzeneği

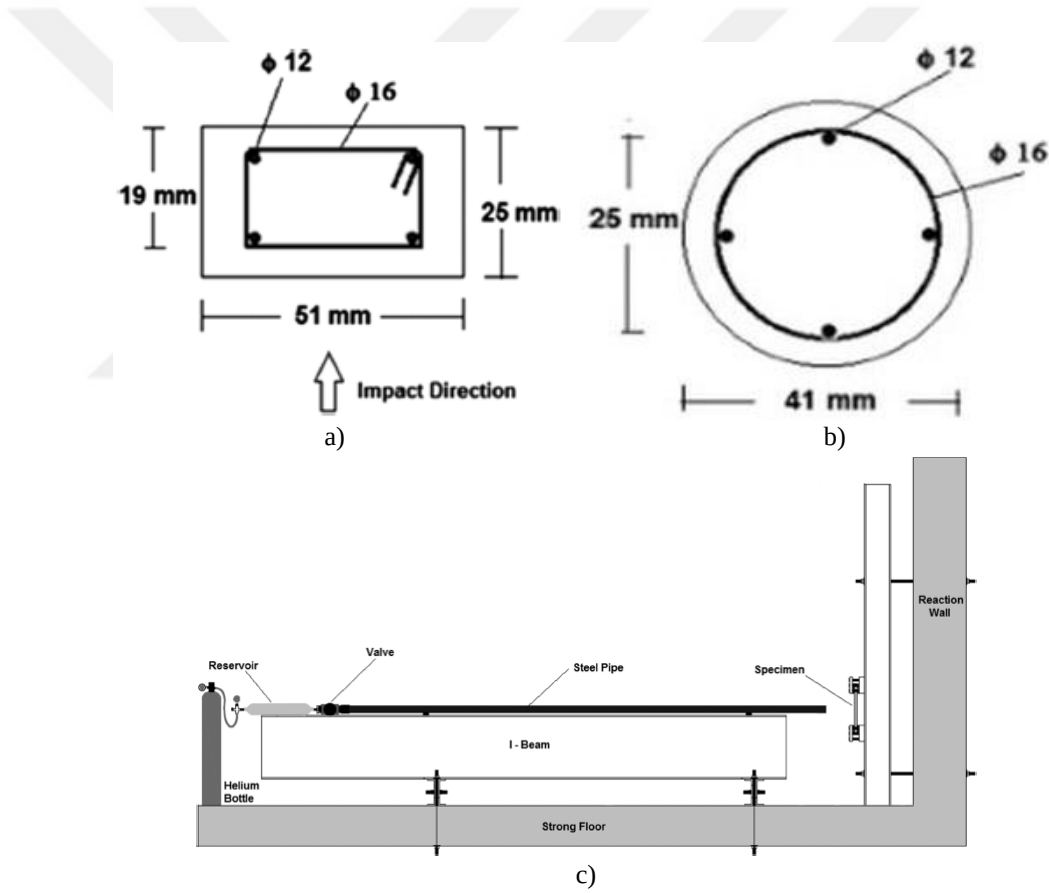
Beam	A_f (mm ²)	M_n (kN m)	ρ_f / ρ_{fb}	d (mm)	Design failure mode
40-#2-0.5-S	63.4	5.70	0.90	127.8	Balanced
40-#3-1.0-S	142.6	9.93	7.53	126.2	Concrete crushing
40-#4-2.0-S	253.4	11.6	12.7	124.7	Concrete crushing
40-#2-0.5-I	63.4	5.68	0.86	127.8	Balanced
40-#3-1.0-I	142.6	10.1	7.27	126.2	Concrete crushing
40-#4-2.0-I	253.4	11.8	12.4	124.7	Concrete crushing
80-#2-0.5-S	63.4	5.68	0.70	127.8	GFRP rupture
80-#3-1.0-S	142.6	11.5	5.65	126.2	Concrete crushing
80-#4-2.0-S	253.4	13.4	10.2	124.7	Concrete crushing
80-#2-0.5-I	63.4	5.68	0.68	127.8	GFRP rupture
80-#3-1.0-I	142.6	11.6	5.77	126.2	Concrete crushing
80-#4-2.0-I	253.4	13.6	9.81	124.7	Concrete crushing

şekil 3.17. Deney matrisi

Deneysel çalışmada iki farklı beton sınıfı (C40-C80) ile üç farklı boyuna donatı oranı kullanılarak üretilen, güçlendirilen betonarme numunelerin statik ve dinamik yükler altındaki davranışı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre beton dayanımındaki değişim, boyuna donatı oranı ve GFRP hem statik hem de dinamik yükler altında betonarme kirişlerin davranışını doğrudan etkilemiştir. Ancak deneylerde kullanılan ve ölçekli olarak üretilmiş numune boyutları betonarme davranışın belirlenmesi için yetersizdir. Ayrıca dinamik deneylerde 3 noktalı statik deneylerde 4 noktalı yükleme tercih edilmiştir. Bununla birlikte tasarımda öngörülen ve deneylerde kullanılan mesnet koşulları basit kiriş teorisine uygun olarak oluşturulamamıştır.

Literatürde betonarme kirişler hakkında diğer betonarme elemanlara göre daha fazla çalışma yapılmıştır. Çalışma konusu olan betonarme kirişlerin, çarpma etkisi altındaki davranışları incelenirken farklı çarpma hızları, farklı beton sınıfları, farklı çarpma yükseklikleri, farklı kütleler, değişken çarpma sayıları, farklı boyuna ve donatı oranları gibi değişkenler kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda genel olarak betonarme kirişlerde dinamik davranışın değişimi veya statik ve dinamik karakteristikli deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sadece dinamik davranışın incelendiği deneylerde dinamik yük kapasitesi, çatlak ve göçme mekanizmaları incelenmiştir. Statik ve dinamik deneylerin karşılaştırıldığı durumlarda dinamik büyütme çarpanı, kirişleri mekanizmaya götüren göçme modu, statik ve dinamik davranış arasındaki farklar kıyaslanmıştır. Deney sonuçları incelenirken yük, yerdeğiştirme, çatlak gibi parametrelerde hareketle davranışın değişimi karşılaştırılmıştır. Bu yapılan çalışmaların tamamında hiçbir betonarme eleman için çarpma etkisi sonrası taşıma gücünde oluşan (eğilme ve kesme) değişimler incelenmemiştir. Ancak bu tez çalışması kapsamında yapılan literatür araştırmasından elde edilen bilgiler dahilinde, sadece son birkaç yılda yapılan çok az sayıda çalışmada betonarme elemanların ve özellikle de kirişlerin çarpma veya darbe sonrası artık yük taşıma gücündeki değişim incelenmiştir. Bu çalışmaların kapsamının ise çok sınırlı sayıda olduğu ve bu alanda daha fazla deneysel çalışmanın yapılması gerektiğine ulaşılmıştır. Bu amaçla yapılan literatür araştırmasında, yapılan az sayıdaki deneysel çalışmaların son iki yılda olduğu dikkat çekmektedir.

Hasan Korucu ve Ayhan İrfanlıoğlu 2017 yılında yaptıkları deneysel çalışmada 8 farklı gruptan oluşan dikdörtgen ve dairesel kesitli betonarme kirişlere çarpma testleri uygulamıştır. Tüm dairesel ve dikdörtgen kesitlerde boyuna donatı oranı 0,0018 iken, kayma donatı oranı olarak 4 farklı değer kullanılmıştır. Dikdörtgen kesitler 51x25 mm boyutlarında ve 508 mm uzunluğunda olup, dairesel kesitlerde dışa çap 41 iç çap ise 25 mm'dir. Tüm kesitlerde kayma donatı çapı 16 mm boyuna donatı çapı 12 mm'dir. Deneysel çalışmada kirişler deney düzeneğine dik olarak yerleştirilmiş ve mesnetlenmiş olup, çarpma etkisini oluşturacak yükleme yatayda uygulanmıştır. Şekil 3.18. a ve 3.18. b'de kesit geometrisini, 3.18. c'de ise deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.

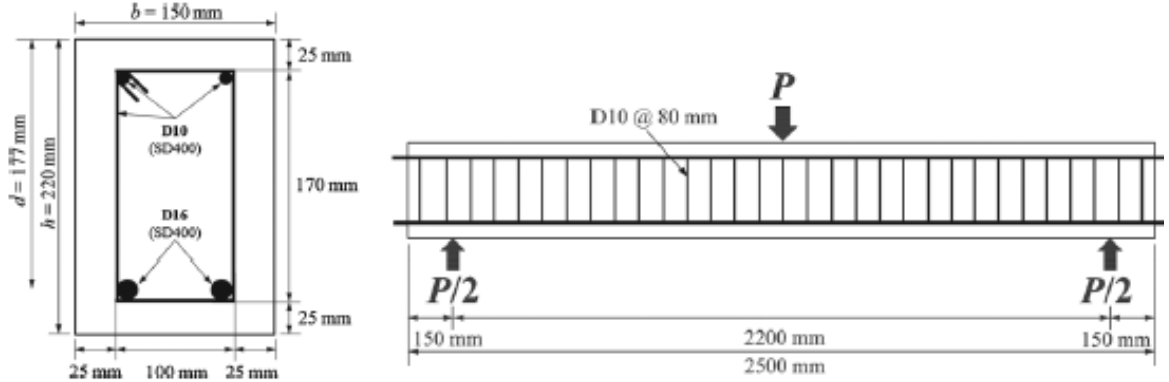


Şekil 3.18. a) Dikdörtgen deney numunelerinin geometrisi b) Dairesel deney numunelerinin geometrisi c) Deney düzeneği

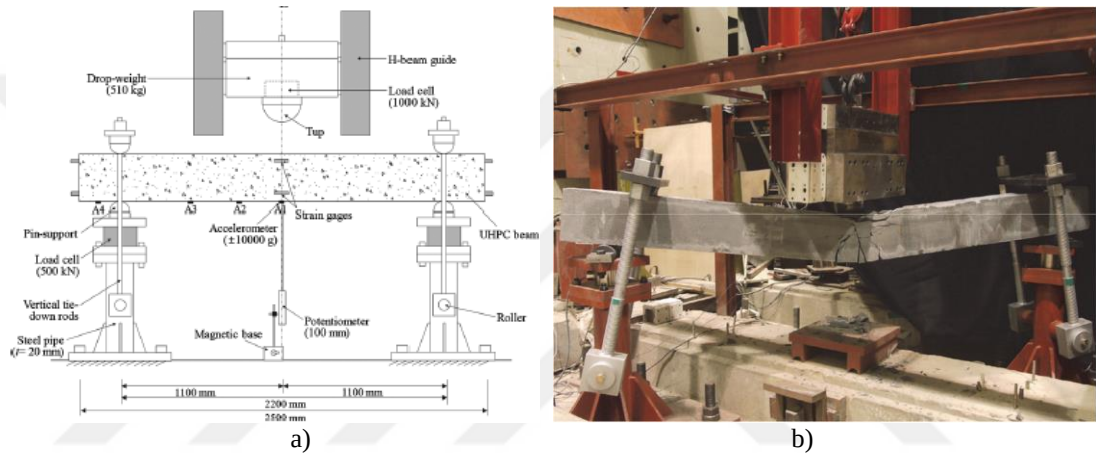
Çarpma deneyleri sonucunda kayma donatısının betonarme elemanların davranışı etkilediği, uygulanan çarpma hızına bağlı olarak göçme modlarının eğilmeden kesmeye doğru değişebileceği ve spiral kayma donatısının dikdörtgen kayma

donatısına göre betonarme davranışa daha olumlu katkılar yaptığı gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmada kullanılan betonarme elamanların ölçekli numuneler olarak tasarlanmış olması betonarme davranışı doğrudan ve gerçekçi bir şekilde temsil edemeyeceği ihmal edilmiştir. Bu davranışı tespit ederken kullanılan ölçekli deney numuneleri veya nümerik modellerin kullanımı nedeniyle davranışın gerçekçi bir şekilde temsil edilemediği literatürden bilinmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların ölçeksiz deney numuneleri ile test edilerek doğrulanması çalışmayı destekler nitelikte olacaktır. Ayrıca kalıcı kapasite için statik deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri için kullanılan mesnet koşullarının tam olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan betonarme kirişlerin çoğunluğu eğilme davranışı göstermiştir. Bu nedenle tamamen kesme davranışı gösteren kirişler için çalışma yapılması çalışmayı tamamlayıcı nitelikte olacaktır. Bununla birlikte deneysel çalışmada kullanılan numuneler uygulanan çarpma enerjileri numune boyutlarına göre çok büyük ve çoğunlukla betonarme kirişlere ağır hasar aldırarak veya göçmeye götürecek şekilde seçilmiştir. Ancak kirişleri tamamen göçmeye götürmeyen daha düşük enerjiler için deneyler yapılması ve sonrasında artık yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi yapılmış mevcut çalışmayı içerik yönünden zenginleştirebilir.

Doo-Yeol Yoo ve ark. 2017 yılında yaptıkları deneysel çalışmada ultra yüksek performanslı betondan üretilmiş fiber katkılı betonarme kirişlerin çarpma dayanımı incelenmiştir. Bu çalışmada 4 farklı tip çelik fiberler takviyeli betonarme kirişlere 510 kg'lık kütle kullanılarak elde edilen 4,5 ve 5,35 kJ'luk 2 farklı çarpma enerjisi uygulanmıştır. Deneysel çalışmadaki betonarme numuneler 150 x 220 mm boyutlarında ve 2500 mm uzunluğundadır. Bu çalışmadaki betonarme numuneler içeriğinde çelik fiberlerin oranı, tipi ve uzunluğuna göre üç farklı seri olarak gruplandırılmıştır. Bu betonarme numunelere 510 kg'lık kütle 0,9 ve 1,15m'den serbest düşmesiyle elde edilen tek bir vuruşluk çarpma enerjileri uygulanmıştır. Çalışmada çelik fiberlerin çarpma dayanımına katkısı ve çarpma sonrası artık yük taşıma kapasitesinin bulunması amaçlanmıştır. Şekil 3.19. deneylerde kullanılan betonarme numunelerin geometrisi, Şekil 3.20.'de ise deney düzeneğinin şematik gösterimi ve örnek deney uygulaması verilmiştir.



Şekil 3.19. Deney numunelerinin geometrisi



Şekil 3.20. a) Deney Düzenəğinin şematik gösterimi b) Deney düzenəğinde örnek deney uygulaması

Deneylerde elde edilen sonuçlara göre çelik fiberin çarpma yükleri altında dayanıma katkısı, çarpma yükleri sonrasında ise farklı oranlarda moment taşıma kapasitesine ve sünekliliğe katkısı görülmüştür. Ancak deneylerde kullanılan betonarme numunelerin boyutları ölçekli bir betonarme eleman davranışını yansıtabilmektedir. Literatürden bilindiği gibi betonarmede elemanların ölçekli olarak boyutlandırılması davranışı doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle deney sonuçlarının ölçeksiz olarak üretilen betonarme kirişlerin için yapılması çalışmayı destekler nitelikte olacaktır. Ayrıca çalışmada göçme modu tamamen eğilme olan kirişler incelenmiştir. Bu çalışmaya ek olarak kesme kritik elemanların incelemesi de çalışmaya önemli katkılar sunacaktır. Deneysel çalışmada çelik fiber malzeme için 4 farklı oran, tip ve boy seçilmiştir ancak çarpma enerjileri için aynı durum söz konusu olmamış ve sadece 2 farklı enerji için çalışma tamamlanmıştır. Parametrik çalışmaya ilgili çıkarımların yapılması için

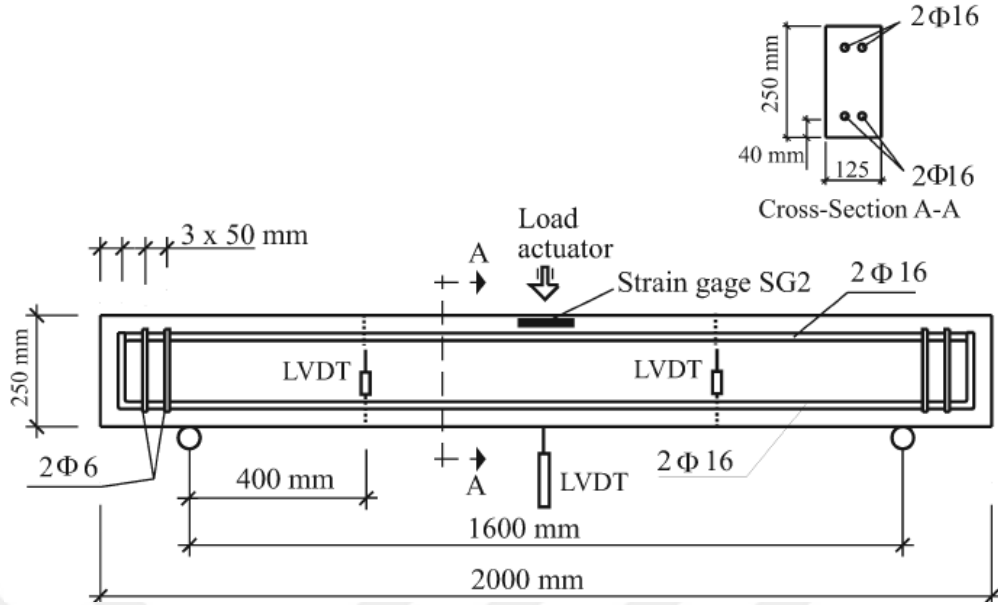
kullanılan çarpma enerji seviyelerinin arttırılması da deney sonuçlarından elde edilen bulguları güçlendirecektir.

Betonarme elamanların çarpma sonrasında kalıcı dayanımlarını inceleyen sınırlı sayıdaki çalışmaların büyük çoğunluğunda da literatürdeki diğer çalışmalar gibi ölçekli deney numuneleri ve normal dayanımlı beton malzemesi kullanılmıştır (Park, 2014; Adhikary 2015; Ulzurrin ve ark., 2017; Zanuy ve ark., 2018).

Carlos Zanuy ve Gonzalo S. D. Ulzurrin 2017 ve 2018 yıllarında yaptıkları çalışmalarda etriye düzeni farklı, çelik fiberli betonarme kirişlerin çarpma yükleri altındaki davranışları ve artık yük taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Bu deneysel çalışmada kullanılan betonarme numuneler 3 farklı tipte ve oranda çelik fiber kullanılarak, sabit boyuna donatılı ve etriyesiz şekilde tasarlanmış ve çarpma yükleri altında betonarme davranışı incelenmiştir. Deneylerde kullanılan betonarme kirişler 125x250 mm boyutlarında ve 2000 mm uzunluğunda olup, malzeme ve kesit özellikleri Şekil 3.21. ve Şekil 3.22.'de verilmiştir.

Series ID	Volume fraction (%)	Fiber type	Fiber length/diameter (mm)	Fiber yield strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
A	0	—	—	—	48.5
B	0.5	Prismatic	60/1	830	59.4
C	0.5	Hooked	60/0.75	1,200	61.4
D	0.5	Smooth	10/0.16	3,000	64.0
E	1.0	Prismatic	60/1	830	52.1
F	1.0	Hooked	60/0.75	1,200	61.3
G	1.0	Smooth	10/0.16	3,000	64.7

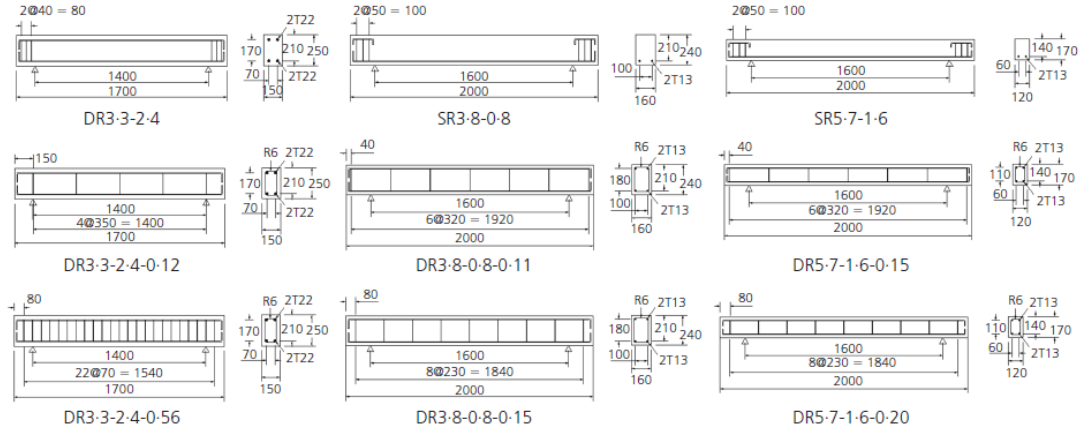
Şekil 3.21. Deney numunelerine ait malzeme özellikleri



Şekil 3.22. Deney numunelerine ait kesit özellikleri

Çarpma deneyleri 200 kg'lık çelik kütlenin 2 tekrar ile 1750 mm yükseklikten serbest düşmesiyle yapılmış ve çarpma enerjisi 3,4 kJ olarak belirlenmiştir. Çarpma deneyleri sonrasında artık yük taşıma kapasitesini belirlemek için statik deneyler yapılmış sonuçlar çarpmaya maruz kalmamış betonarme numuneye ait statik deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çelik fiber oranının, kullanılan fiber tipinin etriyesiz betonarme kirişlerin davranışına olum katkılar yaptığı tespit edilmiştir.

Satadru Das Adhikary ve ark. 2015 yılında yaptığı çalışmada 2 farklı a/d oranı ve 3 farklı boyuna donatı oranı kullanılarak normal dayanımlı ölçekli olarak üretilmiş betonarme kırşiler üzerinde çarpma deneyleri yapmıştır. Bununla birlikte çarpma deneyleri sonrası eğilme deneyleri yapılarak betonarme kırşilerin kalıcı yük taşıma kapasitesi incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan deney numuneleri Şekil 3.23.'te ve deney matrisi Şekil 3.24.'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Deney numunelerine ait kesit özellikleri

Specimen	a/d	ρ_L %	ρ_T %	Bending resistance: kN	Shear resistance: kN	Shear to bending resistance ratio
DR3-3-2-4	3.3	2.4	—	203.70	66.20	0.33
DR3-3-2-4-0-12	3.3	2.4	0.12	203.70	87.10	0.43
DR3-3-2-4-0-56	3.3	2.4	0.56	203.70	170.40	0.84
SR3-8-0-8	3.8	0.8	—	70.45	67.83	0.96
DR3-8-0-8-0-11	3.8	0.8	0.11	67.83	93.32	1.38
DR3-8-0-8-0-15	3.8	0.8	0.15	67.83	102.30	1.51
SR5-7-1-6	5.7	1.6	—	42.40	35.32	0.83
DR5-7-1-6-0-15	5.7	1.6	0.15	42.40	50.52	1.19
DR5-7-1-6-0-20	5.7	1.6	0.20	42.40	56.40	1.33

Şekil 3.24. Deney matrisi

Deneylerde kullanılan betonarme kirişlerin genişliği 120-160 mm arasında değişirken yüksekliği ise sabit ve 170 mm'dir. Çarpma deneyleri 300 kg'lık çelik kütlelerin 0,15-1,2 m yükseklikten serbest düşmesiyle yapılmış ve çarpma enerjisi 0,44-3,53 kJ olarak belirlenmiştir. Çarpma deneyleri sonrasında artık yük taşıma kapasitesini belirlemek için statik deneyler yapılmış sonuçlar çarpmaya maruz kalmamış betonarme numuneye ait statik deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre artık yük taşıma kapasitesi nümerik analizler ile doğrulanarak formülize edilmiştir.

Ancak bu çalışmalarda kullanılan betonarme kirişler boyutları bakımından incelendiğinde, ölçekli olarak boyutlandırıldığı ve bu durumun davranışı doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Literatürden de bilindiği gibi boyut etkisi yani betonarme elemanlarda ölçek kullanımı, homojen bir malzeme olmayan betonarmenin davranışını daha karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle bu çalışmadaki deney sonuçlarının ölçeksiz numunelerle desteklenmesi çalışmaya katkı sunacaktır. Ayrıca deneysel

çalışmada farklı tip ve oranlardaki fiber malzemesi için parametrik çalışma yapılmış, ancak farklı çarpma yükleri ve enerjilerinde etriyesiz betonarme kirişlerin davranışı bu çalışmada incelenmemiştir. Bununla birlikte farklı çarpma enerjileri altında etriyeli ve etriyesiz kirişlerin betonarme davranışının incelenmesi ve daha sonra artık yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi deneysel çalışmayı destekleyici nitelikte olacaktır.

3.2. Amaç ve Hedef

Bu çalışmanın amacı, farklı yük taşıma ve süneklik kapasitelerine sahip ölçeksiz olarak üretilmiş yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin dinamik ve dinamik etkiler sonrası artık yük taşıma kapasitesinin belirlenmesidir. Böylelikle farklı çarpma enerjilerine maruz kalmış ancak taşıma gücünü tamamen kaybetmemiş betonarme elemanlardaki betonarme davranışın değişimi ve artık (kalıcı) yük ve moment taşıma kapasiteleri bulunmuş olacaktır. Bu sayede çarpma sonrasında elemanların hasar durumunu ve yük taşıma kapasitelerine göre onarım güçlendirme veya yeniden üretim gibi süreçlere karar vermek adına literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracaktır.

Bu yönüyle tez çalışmanın üç temel hedefi vardır:

1. Yüksek dayanımlı ve ölçeksiz olarak tasarlanmış betonarme kirişleri göçme mekanizmasına götüren çarpma enerjilerinin belirlenmesi,
2. Yüksek dayanımlı ve ölçeksiz olarak tasarlanmış betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi,
3. Eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen kaybetmemiş ve ölçeksiz olarak üretilmiş, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çarpma sonrası davranışlarının, artık yük ve moment taşıma kapasiteleri ile (residual load bearing capacity) sünekliklerindeki değişimin belirlenmesidir.

3.3. Özgün Değer

Bu tez çalışmasında, farklı çarpma etkilerine maruz kalmış ancak eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen kaybetmemiş, farklı dayanım ve süneklik kapasitelerine sahip

yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çarpma sonrası davranışları incelenecek olup artık yük taşıma kapasiteleri (residual load bearing capacity) belirlenecektir. Farklı çarpma enerjilerine maruz kalmış betonarme kirişlerin moment ve süneklik kapasiteleri ile göçme mekanizmaları belirlenecektir. Ayrıca bu kirişlerden elde edilen sonuçlar çarpma etkisine maruz bırakılmayan referans betonarme kiriş ile karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Dolayısıyla bu çalışma, çarpma etkilerine maruz kalmış yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çarpma sonrası davranışlarındaki değişimi belirleyecek olan öncü çalışmalardan birisi olacaktır. Literatürden yapılan deneysel çalışmaların büyük çoğunluğunda betonarme elemanların tasarımında ölçek kullanılması ve kalıcı yük taşıma kapasitelerini bulmaya yönelik çalışmanın yeterli sayıda olmayışı çalışmayı özgün kılmaktadır. Ayrıca betonarme kirişlerin çarpma etkisi sonrasında sahip oldukları artık yük taşıma kapasitelerini belirlemeye yönelik çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmada, farklı enerji seviyelerinde çarpma etkilerine maruz kalmış ve göçme mekanizmasına ulaşmamış (eğilme ve/veya kesme kapasitelerini tamamen kaybetmemiş) farklı dayanım ve süneklik kapasitelerine sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişler ölçeksiz olarak üretilmiş ve çarpma sonrası davranışları da incelenmiştir. Ayrıca çalışmaya konu olan betonarme kirişlerin tasarımı için farklı boyuna donatı oranları kullanılarak kirişlerin farklı yük, moment ve süneklik kapasitesine sahip olması durumunda davranışın değişimi de incelenecektir.

Bu çalışma, çarpma etkilerine maruz kalmış yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çarpma sonrası davranışlarındaki değişimi belirleyecek olan öncü çalışmalardan birisi olacak ve tasarımı yapılan kirişler literatürdeki ölçekli kirişlere göre betonarme davranışı daha gerçekçi bir şekilde temsil edecektir.

Bu yönüyle tez çalışmanın özgün değeri şöyle sıralanabilir;

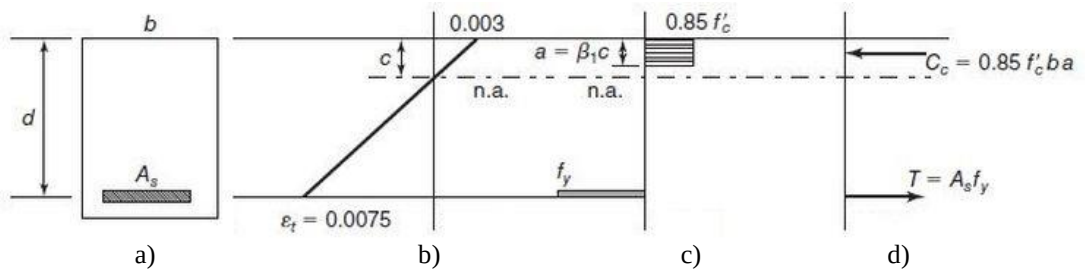
1. Farklı çarpma enerjileri kullanılarak yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin dinamik davranışı belirlenmiş, kirişleri göçmeye götüren çarpma enerjileri ile göçme mekanizmaları incelenmiştir.

2. Farklı süneklik ve yük taşıma kapasitesine sahip ölçeksiz olarak üretilmiş betonarme kirişlerin çarpma etkisi altında ve sonrasında davranışlarının değişimi belirlenmiştir.
3. Eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen kaybetmemiş, farklı süneklik kapasitesine sahip, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin artık yük ve moment taşıma kapasiteleri (residual load bearing capacity) ile sünekliklerindeki değişim incelenmiştir.
4. Çalışmanın sonunda betonarme kirişlerin hasar yoğunluğuna bağlı olarak onarım, güçlendirme veya yeniden imalat gibi önerilerde bulunulmuştur.



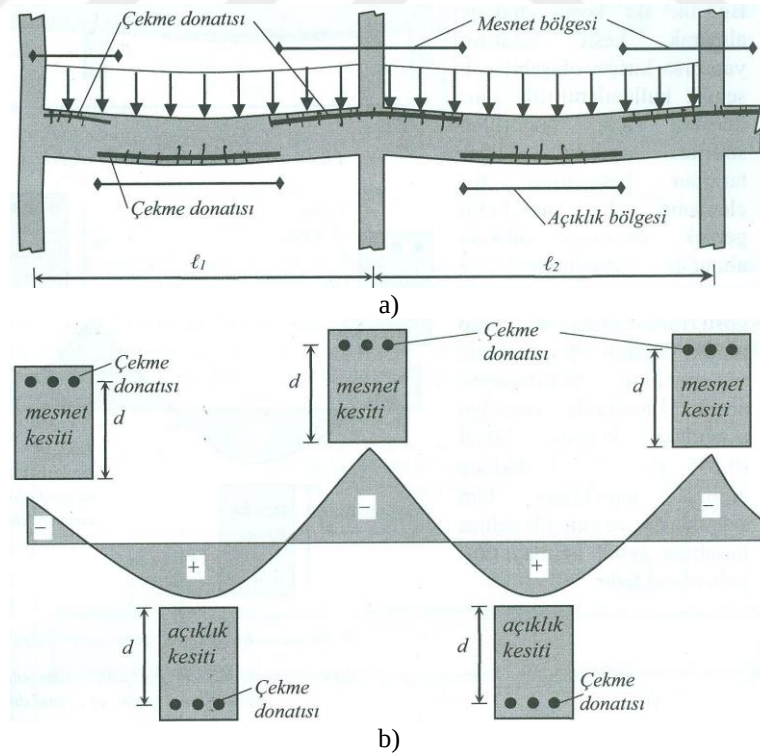
BÖLÜM 4. BETONARME KİRİŞLERİN STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Betonarme elemanlar genellikle gerilme ve birim deformasyonların doğrusal olarak kabul edildiği bir yaklaşım ile betonarme kesit üzerinde oluşan iç kuvvetlere (normal kuvvet, moment ve kesme kuvveti) göre karşı koyacak şekilde tasarlanır (Şekil 4.1.). Betonarme kirişlerde ise bu iç kuvvetler kesme kuvveti ve eğilme momentidir. Betonarme kirişler döşemeler gibi eğilme elemanları olduklarından, bir kirişin farklı karakteristikteki (statik ve dinamik) yükler altındaki betonarme davranışı ince plak teorisi olarak adlandırılan yaklaşım ile açıklanmaktadır. Bu yaklaşım aynı zamanda Bernoulli hipotezi veya klasik kiriş teorisi olarak adlandırılmıştır. Bu hipoteze göre düzlem kesitler herhangi bir yük altında yine düzlem kesit özelliğini koruyarak deformasyona uğrar. Kesit üzerinde elastik ve elastoplastik şekil değiştirmeler sonunda kesit yine düzlem kesit davranışı gösterir. Bu nedenle yapı elemanlarının üzerinde, Bernoulli hipotezinde geçen düzlem kesit davranışının geçerli olduğu bölge, B-bölgesi olarak tanımlanmıştır. B-bölgesi'nde iç kuvvetlerden kaynaklanan gerilmeler, gerilme birim şekil değiştirme arasındaki doğrusal ilişkiden ve betonarme elemanlardaki çatlak mekanizmasından elde edilir. Kesitte oluşan iç kuvvetlere göre B-Bölgesinde klasik kesit tasarımı yapılmaktadır (Ersoy ve ark., 2012).



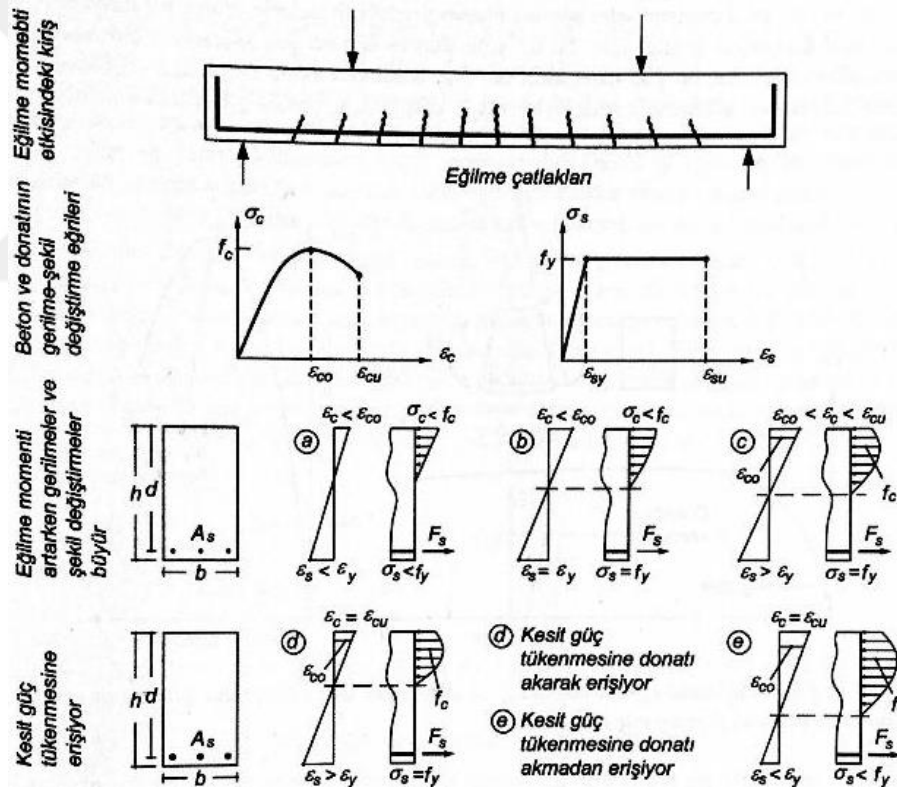
Şekil 4.1. a) Kiriş kesiti b) Birim şekil değiştirme diyagramı c) Gerilme dağılımı d) İç kuvvetler (Ersoy ve ark., 2012)

Kirişlerde oluşan basit eğilme etkisi altında tarafsız eksen, gerilmeler bakımından kiriş kesitini çekme ve basınç bölgesi olmak üzere iki bölgeye ayırmaktadır. Kiriş açıklıklarında çekme bölgeleri kiriş kesitinin alt tarafında, basınç gerilmeleri ise kiriş kesitinin üst tarafında oluşmaktadır. Kirişler için bu gerilme dağılımı mesnet kesitinde açıklık kesitinin tam tersi olarak görülmektedir. Bu durum Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Çok küçük kuvvet değerlerinde elastik şekildeğiştirmeler meydana gelirken; kiriş üstündeki yüklerin artmasıyla önce çekme bölgesinin en dış lifinde yer alan beton, çekme gerilmelerine karşı koyamayarak çatlamaktadır. Çatlağın oluşması çekme bölgesinde yer alan en dış lifteki betonun eğilmede çekme dayanımına ulaşması olarak da tanımlanabilir. Bu durum betonun çekme dayanımının çok düşük (yaklaşık karakteristik basınç dayanımının %10'u) olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle beton malzemesinden üretilmiş bir kirişte çekme gerilmelerini karşılamak adına donatı kullanılarak tasarım yapılması pratiklik ve ekonomiklik sağlayacaktır. Dolayısıyla betonarme bir kesitte kesit içerisine yerleştirilen donatının miktarı, oranı, konumu ve yerleşim düzeni kesit davranışını doğrudan etkileyecektir (Doğangün, 2019).



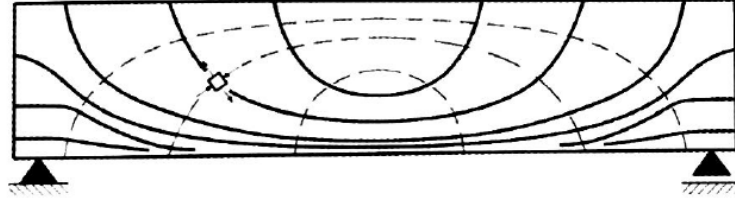
Şekil 4.2. a) Sürekli kirişe ait açıklık ve mesnet bölgelerindeki davranış b) Moment diyagramına göre yerleştirilen donatılar (Doğangün, 2019)

Betonarme elemanlarda kesitteki en büyük çekme ve basınç gerilmelerinin kesitin en dış liflerinde olduğu bilinmektedir bu nedenle tarafsız eksene yakın yerlerdeki çekme gerilmeleri ihmal edilerek kesitteki çekme gerilmelerinin tamamının donatı tarafından taşındığı kabulü ile klasik kesit tasarımı yapılmaktadır. Bu nedenle basit eğilme etkisindeki kirişlerin betonarme davranışını belirleyen en etkili parametrelerin başında boyuna donatı gelmektedir. Betonarme elemanların kesitte deformasyon ve gerilme değişimine bağlı olarak değişen davranışı Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Şekil 4.3.'te açıklanan davranışta sırasıyla a'dan e'ye kadar olan şekillerin tamamı artan yük etkisiyle betondaki birim kısaltmalar ile donatıdaki birim uzamalar arasındaki ilişkiden yararlanılarak kesitin taşıma gücüne ait momentin bir kuvvet çifti ile bulunmasını açıklamaktadır.

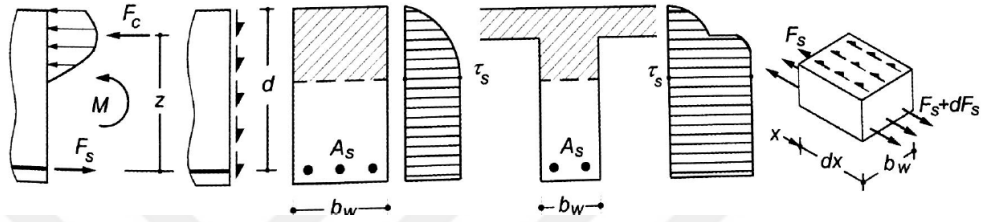


Betonarme kirişler eğilme momentinden oluşan normal gerilmeler ile birlikte kesme kuvveti etkisinden kaynaklanan kayma gerilmelerine de maruz kalmaktadır. Betonarme bir kiriş kesitinde oluşan asal, çekme ve basınç gerilmelerine ait yörüngeler

Şekil 4.4.'te gösterilmiş olup Şekil 4.5.'te gösterilen betonarme eleman üzerinde yazılacak denge denklemi ile kayma gerilmesinin hesabı yapılabilir (Celep, 2018).

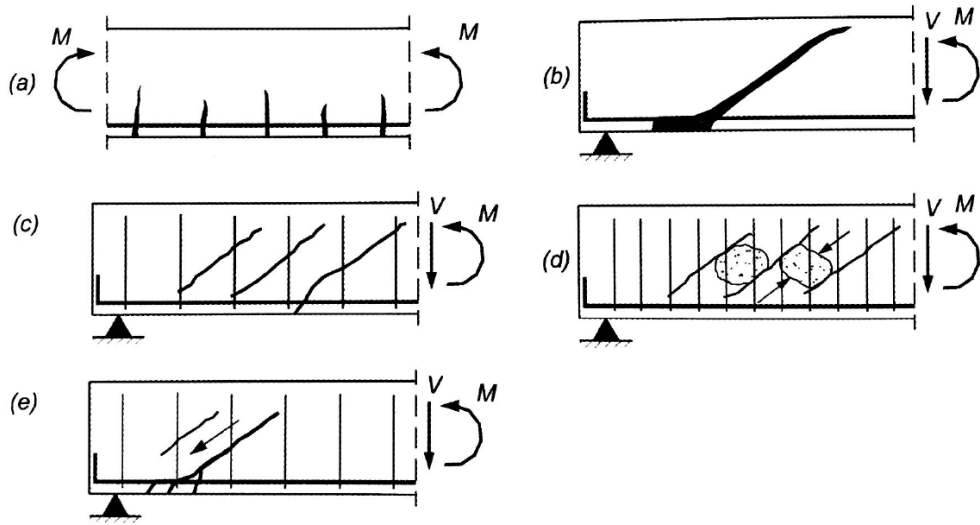


Şekil 4.4. Betonarme kirişlerin üç noktada asal, çekme ve basınç gerilmelerine ait yörüngeler (Celep, 2018)



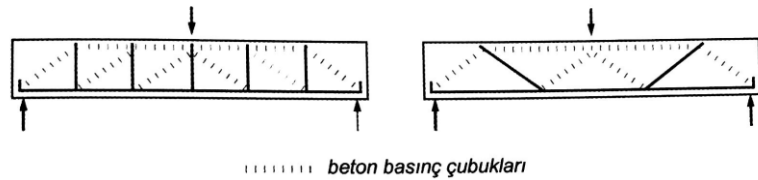
Şekil 4.5. Betonarme kayma gerilmelerinin değişimi (Celep, 2018)

Asal gerilmelerinin yörüngelerinden de anlaşıldığı gibi çekme gerilmeleri kiriş alt yüzeyinde meydana gelir. Bu durumda oluşan gerilmeleri donatı karşılar. Çatlaklar kiriş ekseninde oluşan çekme gerilmelerine dik doğrultuda, kalınlıkları tarafız eksene yaklaştıkça azalan şekilde ve belirli aralıklarla oluşur. Kesme kuvveti ve eğilme momenti ile birlikte oluştuğunda ise kiriş orta bölgesinden (3 noktalı yükleme ise tam orta noktasından) asal basınç ve çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu durumda ise oluşan asal çekme ve basınç gerilmelerinin mertebeleri birbirine yakındır. Betonun çekme mukavemeti basınç mukavemetine göre çok daha az olduğundan asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda kiriş gövdesinde eğik çatlaklar görülmektedir. Bu çatlaklar eğilme etkisi altında oluşan eğilme çatlakların devamı olarak kiriş alt yüzeyinde görülür. Asal çekme gerilmelerini karşılayacak donatının bulunmaması durumunda yani sadece eğilme donatısının olduğu elemanlarda betonun eğik çekme gerilmelerine yenilmesiyle sünek olmayan ani ve gevrek olan kesme kırılması meydana gelir. Şekil 4.6.'da betonarme kirişlere ait farklı göçme (güç tükenmesi) durumları gösterilmiştir (Celep, 2018).



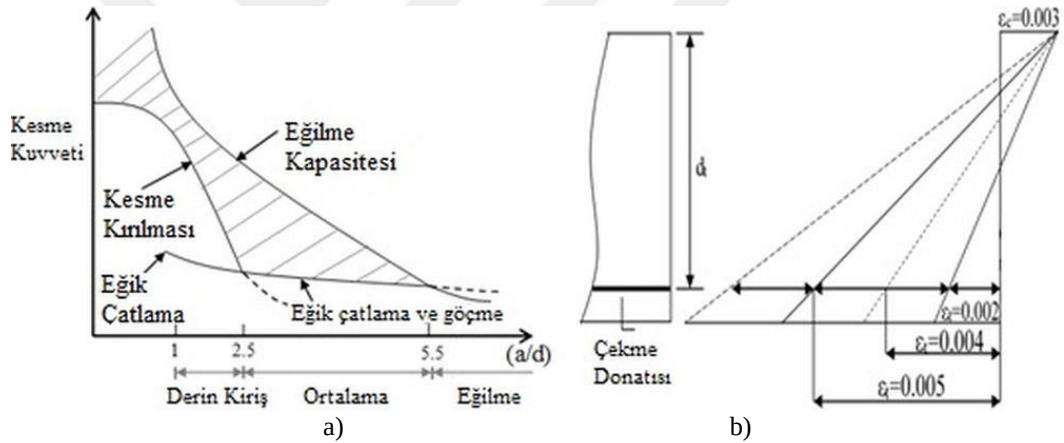
Şekil 4.6. Betonarme kirişlerin göçme durumları a) Eğilme b) Kesme kuvveti ve eğilme c) Eğik çekme d) Gövde basınç e) Kenetlenme güç tükenmesi durumları (Celep, 2018)

Betonarme kirişlerin davranışını, artan yük etkisi altında oluşan asal çekme ve basınç gerilmeleri, kesme kuvveti altında oluşan kayma gerilmelerine göre daha iyi temsil etmektedir. Bu durum Mörsh (1909) tarafından tanımlanan kafes sistem yaklaşımı ile açıklanabilmektedir. Kirişleri gevrek kırılmaya götüren eğik çekme gerilmelerine karşılayabilecek ve boyuna donatıya dik doğrultuda kesme donatısı (etriye) tasarımı yapılarak gevrek kırılma önlenir. Böylelikle Mörsh tarafından kafes sistem yaklaşımında da anlatıldığı gibi asal çekme gerilmelerini etriye güvenle taşıırken asal basınç gerilmeleri etriyeler arasında kalan beton basınç çubukları tarafından karşılanmaktadır. Bu durumda oluşabilecek herhangi bir gevrek kırılma etriyeler arasındaki beton basınç çubuklarının ezilmesi ile meydana gelmektedir. Şekil 4.7.'de kafes sistem yaklaşımı ve beton basınç çubukları şematik olarak gösterilmiştir (Mörsh, 1909).

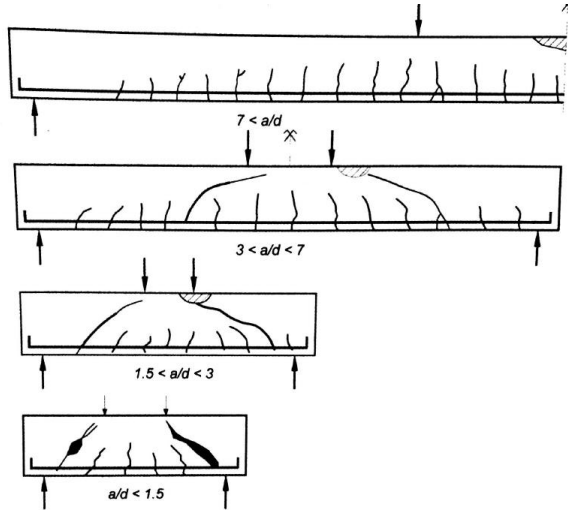


Şekil 4.7. Betonarme kirişte kafes sistem yaklaşımı (Mörsh, 1909)

Betonarme kirişlerin davranışı açıklayan diğer bir parametre ise kiriş kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranı olarak tanımlanan a/d oranıdır. Özellikle kesme açıklığının çok küçük olduğunda yükün önemli bir kısmı kemerleme etkisiyle taşınır. Bu durum kirişte oluşacak basınç ekseninin dike yakın (neredeyse 90 derece) olmasından kaynaklanmaktadır. Kemerleme etkisiyle etriyeler arası beton basınç çubuklarında büyük asal basınç gerilmeleri oluşur ve kiriş güç tükenmesine gevrek bir şekilde ulaşır. Bu nedenle a/d oranı betonarme kirişlerde davranışı etkileyen çok önemli parametrelerdir. Genellikle a/d 'nin değeri beton kirişler için geçerli olsa da tasarım yapılırken betonarme kirişlerin de davranışını açıklamakta önemli bir öngörü sunmaktadır. Şekil 4.8.'de a/d oranı ve boyuna donatı ile değişen betonarme davranış açıklanmakta, Şekil 4.9.'da ise farklı a/d oranları için güç tükenmesi durumları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. a) A/d 'nin davranışa etkisi b) Çekme donatısına bağlı eğilme davranışı (Wight, 2016)

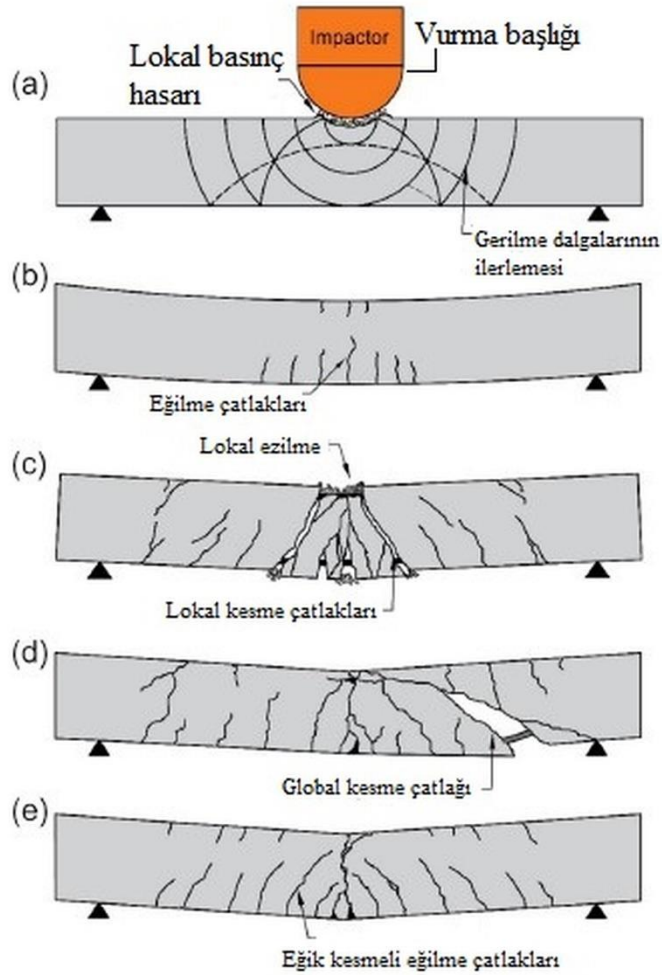


Şekil 4.9. Farklı a/d oranları için güç tükenmesi durumları (Celep, 2018)

A/d oranının 2'nin altında olduğu durumlarda kirişlerin derin kiriş davranışı göstererek kesme kırılması görüleceği, 5,5'in üstünde ise klasik eğilme davranışı gösterdiği bilinmektedir. Şekil 4.8. ve 4.9.'da da açıklandığı gibi a/d 'nin diğer değerleri, kesme ve eğilmenin birlikte görüldüğü betonarme davranışı temsil etmektedir (Wight, 2016). Betonarme davranışı temsil eden bir diğer parametre ise kesme kapasitesinin (V_r) eğilme kapasitesine (M_r) oranıdır. Bu oran birden büyük ($V_r/M_r > 1$) olduğu durumlarda betonarme kirişler eğilme davranışı aksi durumlarda kesme davranışı göstermektedir.

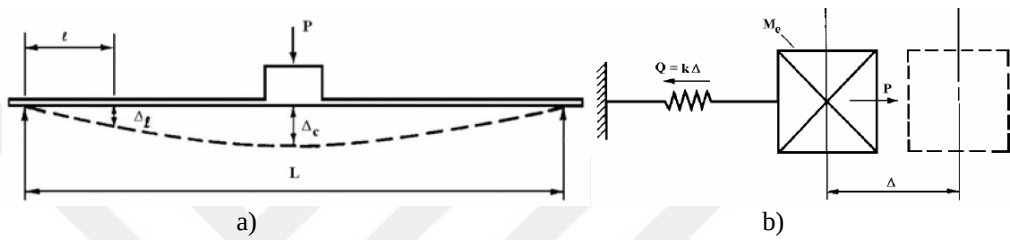
Betonarme davranışın değişimine etki eden ve betonarme elemanların taşıma gücünü değiştiren faktörlerden biri de yükleme hızıdır. Yükleme hızına bağlı olarak artan malzeme (beton ve donatı çeliği) dayanımını belirlemek için çeşitli kabuller yapılmaktadır. Literatürden de bilindiği üzere yükleme hızının artmasıyla özellikle de betonda önemli derecede dayanım artışı gerçekleşmektedir (Abrams, 1917; Watstein, 1953). Aynı zamanda yükleme hızından bağlı olarak betonarme elemanlarda oluşan hasar ve göçme mekanizmaları da değişmektedir. Şekil 4.10.'da çarpma gibi yükleme hızı çok yüksek olan yükleme durumunda betonarme bir kirişin hasar durumları gösterilmiştir. Çarpma gibi yükleme hızının statik yüklemelere göre çok büyük olduğu durumlarda, betonarme elemanların taşıma gücünün dinamik yükler altında statik yüklemelere göre daha büyük olabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte dinamik yükler altındaki gerçekleşen taşıma gücündeki bu artış en çok çarpma veya darbe yüklemesi gibi anlık impuls etkileri altında çok daha belirgin hale gelmektedir. Bu

nedenle dinamik ve statik yüklemeler altında oluşan taşıma gücü değerleri arasındaki fark bir katsayı tanımlanmıştır. Bu katsayı dinamik yük taşıma kapasitesinin statik yük taşıma kapasitesine oranı olarak tanımlanan dinamik büyütme çarpanı (Dynamic Increase Factor, DIF) olarak isimlendirilmiştir. Literatürde dinamik büyütme çarpanı için birçok formül önerilmiştir. Bu formüller boyuna donatı oranı, enine donatı oranı, beton dayanımı, elemandaki yerdeğiştirme, yükleme hızı vb. gibi birçok parametreye bağlı olarak tanımlanmıştır. Dinamik büyütme çarpanı henüz kesinleşmiş bir tanımla literatürde yer almasa da dinamik yükler altındaki davranışı ve taşıma gücünü belirlemek adına etkili parametrelerden biridir.



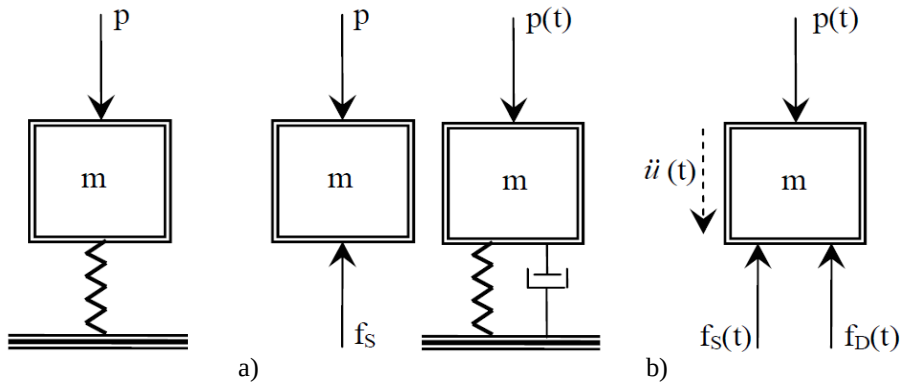
Şekil 4.10. Çarpma yüklemesi ait yükleme şeması ve hasar tipleri a) Çarpma yüklemesi ve lokal hasarlar b) Eğilme çatlakları c) Lokal ezilme ve kesme hasarı d) Kesme hakim davranış e) Kesmeli eğilme davranışı (Zhang ve ark., 2019)

Betonarme elemanların davranışına ait bu klasik tasarım yaklaşımı statik yüklerden ve deprem gibi dinamik yüklerden oluşan iç kuvvetlere karşı yapılacak tasarımı doğrudan temsil edebilmektedir. Ancak çarpma veya darbe gibi kısa süreli ve büyük yoğunluklu anlık impuls etkileri için dinamik büyütme çarpanı gibi katsayılar ifade edilmiştir. Ancak bu etkiler altında betonarme elemanların veya sistemlerin hareket denkleminin oluşturulması elemanlarda oluşacak iç kuvvetleri bulmakta daha gerçekçi bir yaklaşımdır. Sönümsüz tek serbestlik dereceli sistemin şematik gösterimi Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. a) Kiriş davranışı b) Sönümsüz tek serbestlik dereceli sistem davranışı (Feldman ve Siess 1956)

Bu yaklaşımla betonarme elemanlarda oluşan ivme, yerdeğiştirme ve sönüm gibi değerler zaman bağlı oluşturulacak ve zamana bağlı dış yük ile sistemde bir kuvvet eşitliği elde edilmiş olacaktır. Böylece betonarme elemanlardaki davranış zamanın bir fonksiyonu olarak çözümlenebilecektir. Burada yapı dinamiğinden bilinen toplu kütleli sistem yaklaşımı ile sistem, zaman bağlı adi diferansiyel denklem ile çözümlenebilir. Bu yaklaşım ve sistemin hareket denklemi Şekil 4.12.'de ve Denklem 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. a) Statik yükleme b) Dinamik yükleme (Saatçi, 2009)

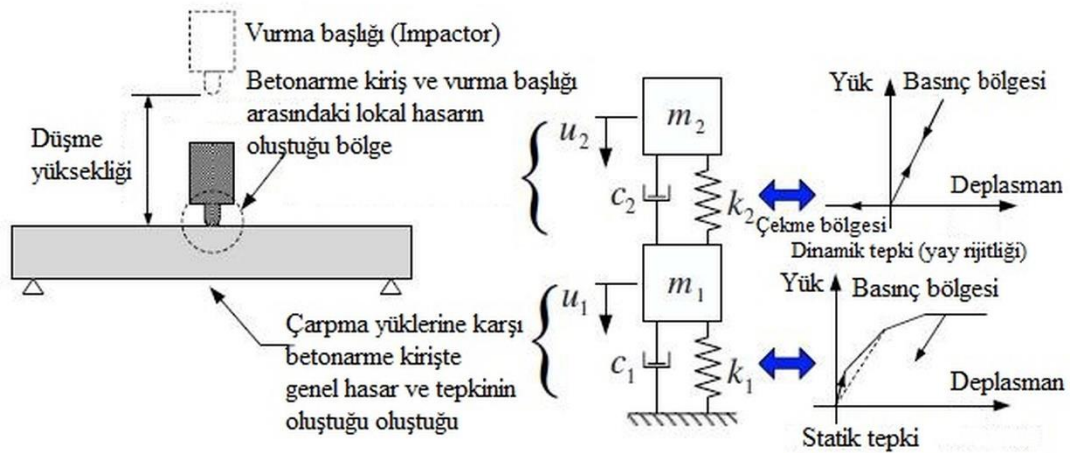
Şekil 4.12. a’da gösterilen statik yüklemde m elemanın kütleini, p statik dış yükü temsil etmektedir. Şekil 4.12. b’de ise sırasıyla m elemanın kütleini, $\ddot{u}(t)$ eleman üzerinde oluşan ivmeyi, $f_s(t)$ elemanın rijitliğini, $f_d(t)$ sönüm kuvvetini ve $p(t)$ dış yükü zamana bağılı olarak temsil etmektedir.

Ancak daha gerçekçi bir yaklaşım için betonarme elemanlar tek serbestlik dereceli bir sistemde yayılı kütleli sistem kabulü ile elemanın herhangi bir konumundaki (x konumu) yerdeğiştirme için t zamana bağılı kısmi bir diferansiyel denklem ile çözümlenmelidir (Chopra 2001). Bu durum Denklem 4.2’de gösterilmiştir. Denklem 4.1 ve 4.2’de m elemanın kütleini, $\ddot{u}(t)$ eleman üzerinde oluşan ivme, $\dot{u}(t)$ eleman üzerindeki hız, $u(t)$ ise zamana bağılı yerdeğiştirme değerleridir. Elemanın, kütleini m, sönümünü c, rijitliğini ise k temsil etmektedir. $P(t)$ impulstan (çarpma veya darbe) oluşan dış yükü zamana bağılı olarak ifade etmektedir.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) \quad (4.1)$$

$$m\ddot{u}(x, t) + c\dot{u}(x, t) + ku(x, t) = P(t) \quad (4.2)$$

Fujikake ve ark. 2009 yılında yaptıkları çalışmada benzer bir yaklaşımla betonarme bir kirişe ait hareket denkleminin Şekil 4.13.’te gösterildiği gibi Denklem 4.1’e benzer şekilde toplu kütleli sistem yaklaşımı ile yazılabileceğini belirtmiştir. Bu yaklaşımda çarpan kütleyle ait hareket de göz önünde bulundurularak çok serbestlik dereceli (2 serbestlikli) bir hareket denklemi elde edilmiş ve sistemin hareketi temsil edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.13. İki serbestlik dereceli sönümlü sistemin dinamik modeli (Fujikake ve ark., 2009)

Bu yaklaşım ile oluşturulan denklem takımı ve sistemi temsil eden matris ifadesi Denklem 4.1'e göre oluşturulmuştur. Denklem 4.1'e göre oluşturulan matris ve denklem takımı ise Denklem 4.3'te gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_2 g \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Betonarme elemanlar için yapılan klasik tasarım yaklaşımı, dinamik büyütme çarpanı katsayılarının kullanımı ve sistemin hareket denkleminin oluşturulması betonarme elemanların taşıma gücünü elde etmek ve davranışını belirleyebilmek için kullanılmaktadır. Böylece dış yükten kaynaklanan sistemde oluşan iç kuvvetlerin, elastik ve elastoplastik yerdeğiştirmelerin hesaplaması kolaylaşacaktır. Bu sayede kiriş mesnetinde ve herhangi bir kesitinde oluşan plastik dönmeler ve bu dönmelere sebep olan statik veya dinamik yükün mertebesi belirlenebilir. Bununla birlikte kirişte plastik mafsal boyu, taşıma gücü, süneklik gibi betonarme davranışını doğrudan temsil eden kavramlar gerçekçi bir şekilde hesaplanabilir. Betonarme basit bir kirişe ait yerdeğiştirme (Δ), dönme (θ) ve süneklik (μ) gibi kavramlar Şekil 4.14.'te gösterilmiştir. Basit kirişte Δ ya da u yerdeğiştirmeyi, θ orta nokta yerdeğiştirmesinin kiriş kesme açıklığının yarısına bölünmesi ile bulunan ve rad cinsinden dönmeyi, süneklik μ ile gösterilen ve maksimum yerdeğiştirmenin (Δ_u) akma yerdeğiştirmesine (Δ_y) bölünmesiyle bulunan katsayıyı temsil etmektedir. Akma yerdeğiştirmesi ise

sayede betonarme kirişlerin çarpma sonrasında onarım, güçlendirme veya yeniden imalat gibi süreçlerine daha net belirlenebilmiştir. Bununla birlikte literatürde çarpmaya maruz kalmış kirişlerin, artık yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi konusunda yapılan çok az sayıda çalışmaya ve uygulamadaki çarpmaya maruz kalmış kirişlerin tasarımı ile ilgili yönetmelik kurallarına önemli bir katkı sağlanmıştır.



BÖLÜM 5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çarpma gibi dinamik etkiler altında ve sonrasında davranışları 3 aşamalı bir çalışma ile incelenmiştir. Deneysel çalışmanın birinci aşamasında pilot deneyler yapılarak düşme yüksekliği ve düşürülen kütlenin büyüklüğüne bağlı olarak enerji düzeyleri tanımlanmıştır. Enerji düzeylerinin tanımlanabilmesi amacıyla 7 adet betonarme kiriş numunesi ile pilot çarpma deneyleri yapılmıştır. Literatürde enerji düzeyleri belirlenirken ya düşme yüksekliği ya da düşürülen kütlenin büyüklüğü değiştirilmiştir. Bu tez çalışmasında ise düşme yüksekliği sabit tutulmuş ve düşürülen kütlenin büyüklüğü değiştirilerek farklı “çarpma enerji düzeyleri” elde edilmiştir. Düşme yüksekliği 3 m ve düşürülen kütlenin büyüklüğü (vurma başlığının kütlesi) ise 240 kg olarak seçilmiştir. Bu vurma başlığına eklenen değişik kalınlıklardaki çelik plakalar ile kütle arttırılmış ve 3 farklı enerji düzeyi elde edilmiştir (Tablo 5.1.). Enerji düzeyleri belirlenirken kirişlerde oluşan elastik ve plastik şekildeğiştirmeler dikkate alınmıştır. E1 enerji düzeyi elastik şekil değiştirmeye E2 ve E3 enerji düzeyleri ise plastik şekil değiştirmelere karşılık gelmektedir. Enerji düzeyleri belirlenirken “ASCE Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities” yönetmeliğinde tanımlanan düşük, orta ve yüksek olarak belirlenmiş enerji ve hasar seviyeleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışmada kullanılan çarpma enerjileri ve bu enerjilere bağlı bulunan çarpma hızları Denklem 5.1’den hesaplanmıştır. Denklem 5.1’de betonarme kirişlere uygulanan enerjiyi, m çarpma kütlesini, H serbest düşme yüksekliğini, g yerçekimi ivmesini ($9,81\text{m/s}^2$), V_i ise çarpma hızını temsil etmektedir.

$$E_i = mgH = \frac{1}{2} m V_i^2 \quad (5.1)$$

Tablo 5.1. Deneysel çalışmada kullanılacak çarpma enerjileri

Enerji Seviyesi	Hasar Düzeyi	Hasar Tipi ve Yoğunluğu	Çarpma Kütlesi (kg)	Çarpma Hızı (m/s)	Çarpma Enerjisi, E_i (kJ)
E1	Düşük	Hafif hasar, görünür, kalıcı	240		6,95
E2	Orta	Orta hasar, ekonomik onarım veya güçlendirme	360	7,67	10,42
E3	Yüksek	Ağır hasar, kalıcı büyük yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmeler, onarılamaz	480		13,90

Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında pilot deney sonuçları dikkate alınarak deney numunelerinin boyutları ve donatı oranları belirlenmiş ve çarpma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak betonarme kirişlerin boyutları (b ve h), beton basınç dayanımları (f_{ck}), basınç donatıları (A_s'), enine donatılar için etriye aralığı (s) ve $a/d=3,3$ oranı sabit tutulmuş sadece boyuna donatı oranları değiştirilmiştir. Boyuna donatı oranları a) ρ_{min} b) $2\rho_{min}$ c) $4\rho_{min}$ d) $6\rho_{min}$ ve e) $\rho_{max} = 0,85\rho_b$ olacak şekilde seçilerek süneklik düzeyleri farklı (eğilme, eğilme kritik, kesmeli eğilme, kesme kritik ve kesme) beş farklı deney numune tipi oluşturulmuştur. Bu deney numunelerinin eğilmeden kesmeye doğru gevrekleşen davranış göstermeleri amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılacak betonarme numuneler Tablo 5.2.'deki deney matrisinde gösterilmiştir. Ayrıca betonarme kirişlerin davranışlarındaki değişim ile çarpma etkisi arasındaki ilişkiyi incelenecek ve dinamik yük taşıma kapasitesinin statik yük taşıma kapasitesine oranı olarak tanımlanan “dinamik büyütme çarpanı” (Dynamic Increase Factor-DIF) katsayısındaki değişimi belirlenecektir.

Tablo 5.2. Öngörülen deney matrisi

Numune Sayısı			Davranış	Boyuna Donatı Oranı
Çarpma Deneyi	Eğilme Deneyi			
	Çarpma Sonrası	Referans		
3	3	1	Eğilme	$\rho_{\min}$
1	1	1	Eğilme Kritik	$2\rho_{\min}$
1	1	1	Eğilme+Kesme	$4\rho_{\min}$
1	1	1	Kesme Kritik	$6\rho_{\min}$
3	3	1	Kesme	$\rho_{\max}$

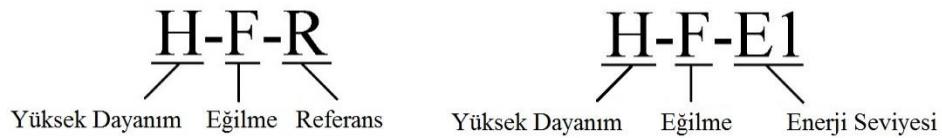
Deneysel çalışmanın son aşamasında çarpmaya maruz kalmış numunelerin ve referans numunesinin eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonunda çarpmaya maruz kalmış

betonarme kirişlerin davranışlarındaki değişim ile çarpma etkisi arasındaki ilişki belirlenmiştir.

Bu çalışmada toplamda 18 adet yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Bunlardan 11 adedi çarpma deneylerinde ve statik deneylerde ortak olarak kullanılmıştır. Davranışın değişimini kontrol etmek amacıyla 5 adet numune referans numunesi olarak seçilmiştir. Geriye kalan 2 adet numune tamamen eğilme ve tamamen kesme davranışı gösteren ve tasarımın kontrol edilmesi amacıyla statik deneyde pilot olarak kullanılan numunelerdir. Böylelikle tasarım ve kirişlerin betonarme davranışı doğrudan deneysel yol ile test edilmiştir. Bununla birlikte ön tasarımlar bir sonlu eleman programı ile kontrol edilmiş ve öngörülen betonarme davranış doğrulanmıştır.

5.1. Parametrik Çalışma ve Deney Matrisi

Deneysel çalışmada süneklik düzeyleri farklı 16 adet yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunesi kullanılmıştır. Bu kiriş numuneleri geometrik (b ve h) olarak aynı ölçülere sahip, basınç donatıları ve beton dayanımları aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Bununla birlikte yüksek dayanımlı betonarme kirişlerdeki etriye aralığı (s) ve a/d oranları sabit tutulmuş sadece boyuna donatı oranları ile çarpma enerjileri değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır. Deney numuneleri için öngörülen donatı oranları, pilot deneylerde ve nümerik modelle doğrulanmış ve öngörülen betonarme davranışı temsil edecek şekilde seçilmiştir. Deneysel çalışmada öngörülen süneklik düzeyleri farklı beş adet betonarme davranışı temsil edecek şekilde (eğilme, eğilme kritik, kesmeli eğilme, kesme kritik ve kesme) belirlenmiştir. Deneylerde kullanılacak bu beş adet farklı numune için isimlendirme ve notasyon bilgileri ise Şekil 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Numune isimlendirmesi ve notasyonu

Deney numunelerine ait deney matrisi ve numune özellikleri Tablo 5.3. ve 5.4.'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Deney numuneleri ve çarpma enerjileri

Betonarme Davranış	Numune Adı	Açıklama	Yükleme Tipi		Çarpma Kütlesi (kg)	Çarpma Yüksekliği (m)
			Çarpma	Statik		
Eğilme	H-F-R	Referans	-	√	-	3
	H-F-E1	E1	√	√	240	
	H-F-E2	E2	√	√	360	
	H-F-E3	E3	√	√	480	
Eğilme Kritik	H-FC-R	Referans	-	√	-	3
	H-FC-E2	E2	√	√	360	2
	H-FC-E2-2	E2	√	√	360	
Kesmeli Eğilme	H-FS-R	Referans	-	√	-	3
	H-FS-E2	E2	√	√	360	1,5
	H-FS-E2-1.5	E2	√	√	360	
Kesme Kritik	H-SC-R	Referans	-	√	-	3
	H-SC-E2	E2	√	√	360	
Kesme	H-S-R	Referans	-	√	-	3
	H-S-E1	E1	√	√	240	
	H-S-E2	E2	√	√	360	
	H-S-E3	E3	√	√	480	

Deney numunelerinin isimlendirmesinde H yüksek dayanımı (High strength), F eğilme (Flexure) davranışını, R referans numuneyi, E1 ise çarpmaya maruz kalmış kirişler için enerji seviyesini göstermektedir. Aynı kurgu ile FC eğilme kritik (Flexural Critical), FS kesmeli eğilme (Flexural Shear), SC kesme kritik (Shear Critical), S kesme (Shear) davranışını temsil etmektedir.

Bu çalışmada deneysel çalışmaya ait betonarme kirişlerin tasarımını yapabilmek ve çarpma deneylerinde kullanılacak çarpma enerjilerini belirlemek amacıyla 7 adet pilot çarpma deneyi ile 2 adet pilot statik deney yapılmıştır. Bununla birlikte değişen boyuna donatı oranları kullanılarak sonlu elaman modelinde betonarme kirişlere ait davranış doğrulanmıştır. Bu bölümde, deney matrisi ve deney numunelerinin özellikleri (malzeme, kesit vb.), çarpma ve statik deney düzeneği ile kullanılan yöntemler, ölçüm cihazları ve pilot deneyleri yer almaktadır.

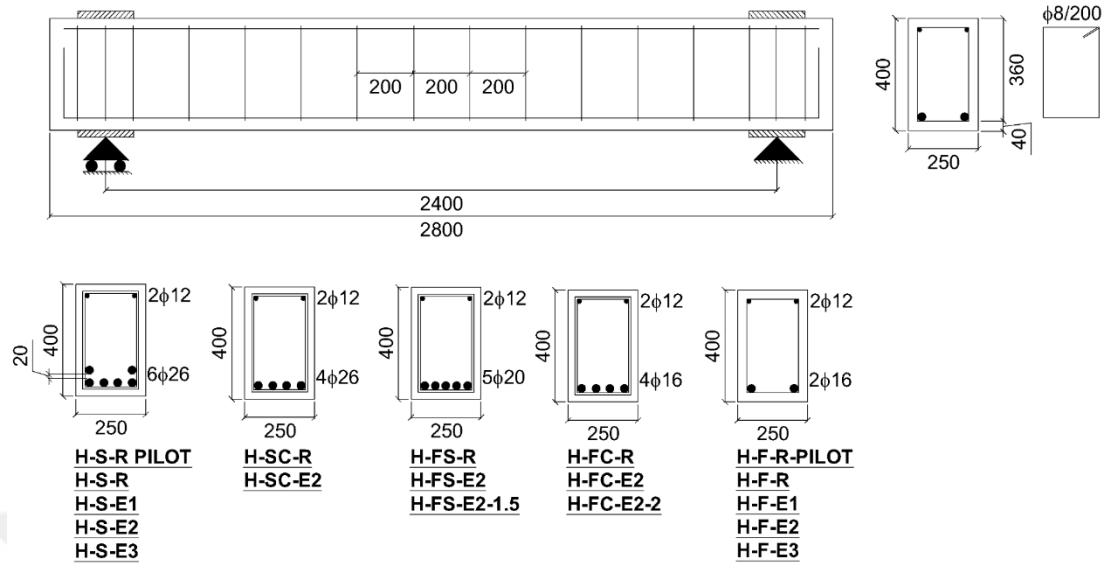
Tablo 5.4. Deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi

Betonarme Davranış	Numune Adı	Açıklama	Çarpma Kütlesi (kg)	Çarpma Yüksekliği (m)	Boyuna Donatı Oranı	Donatı		
						Çekme	Basınç	Kesme
Eğilme	H-F-R	Referans	-					
	H-F-E1	E1	240	3	ρ_{min}	2 ϕ 16	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-F-E2	E2	360		(0,125 ρ_b)			
	H-F-E3	E3	480					
Eğilme Kritik	H-FC-R	Referans	-	3	$2\rho_{min}$	4 ϕ 16	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-FC-E2	E2	360		(0,25 ρ_b)			
	H-FC-E2-2	E2	360	2				
Kesmeli Eğilme	H-FS-R	Referans	-	3	$4\rho_{min}$	5 ϕ 20	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-FS-E2	E2	360		(0,49 ρ_b)			
	H-FS-E2-1.5	E2	360	1,5				
Kesme Kritik	H-SC-R	Referans	-	3	$6\rho_{min}$	4 ϕ 26	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-SC-E2	E2	360		(0,67 ρ_b)			
Kesme	H-S-R	Referans	-		$7\rho_{min}$			
	H-S-E1	E1	240	3	(0,85 ρ_b)	6 ϕ 26	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-S-E2	E2	360		($\rho_{maks.}$)			
	H-S-E3	E3	480					

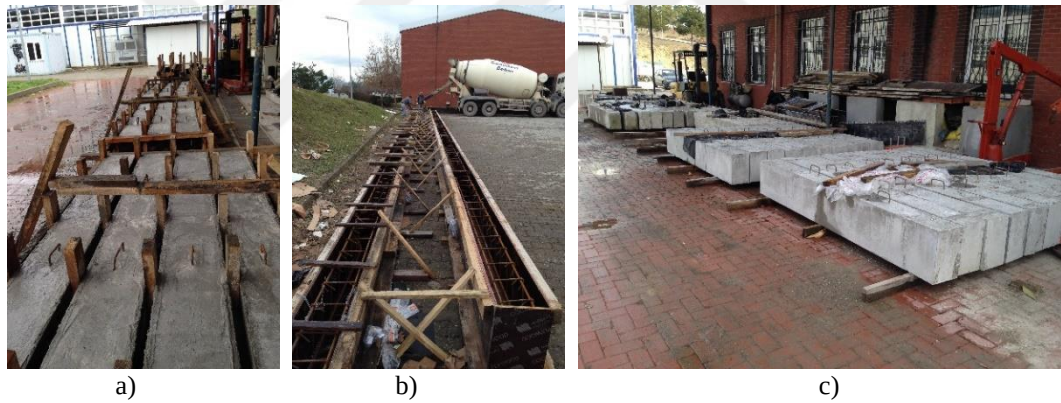
5.2. Deney Numunelerinin Tasarımı

Deneyssel çalışmada kullanılacak yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunelerine kesit özellikleri ve donatı detayları, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) ve Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları 2000'de (TS 500) tanımlanan kurallar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Deney numunelerinin tamamında a/d oranı 3,3 olarak hesaplanmış ve geometrik kesit özellikleri 250x400 mm olarak, numune boyu ise 2800 mm olarak seçilmiştir. Tüm numunelerde C60 sınıfı beton ile S420 donatı çeliği kullanılmıştır. Sabit basınç ve kayma donatısı ile üretilen yüksek dayanımlı numunelerin geometrik özellikleri Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.

Deneyssel olarak planlanan bu tez çalışmasında 16 adet yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunesi ile tamamlanmıştır. Bu numunelerde iki adedi statik pilot deneyler için kullanılmıştır. Pilot çarpma deneyleri için ise 7 adet betonarme kiriş numunesi daha üretilerek pilot deneyler tamamlanmıştır. Pilot çarpma deneylerinde kiriş boyu 2500 mm'dir. Pilot deney sonuçları incelendiğinde, eğilme ve çarpma deney düzeneklerindeki aynı standartta deney yapabilmek için numune boyu daha sonra 2800 mm'ye kadar arttırılmıştır. Şekil 5.3.'te deneyssel çalışmaya esas betonarme kiriş numuneleri ile pilot deney numunelerinin imalat resimleri gösterilmiştir.

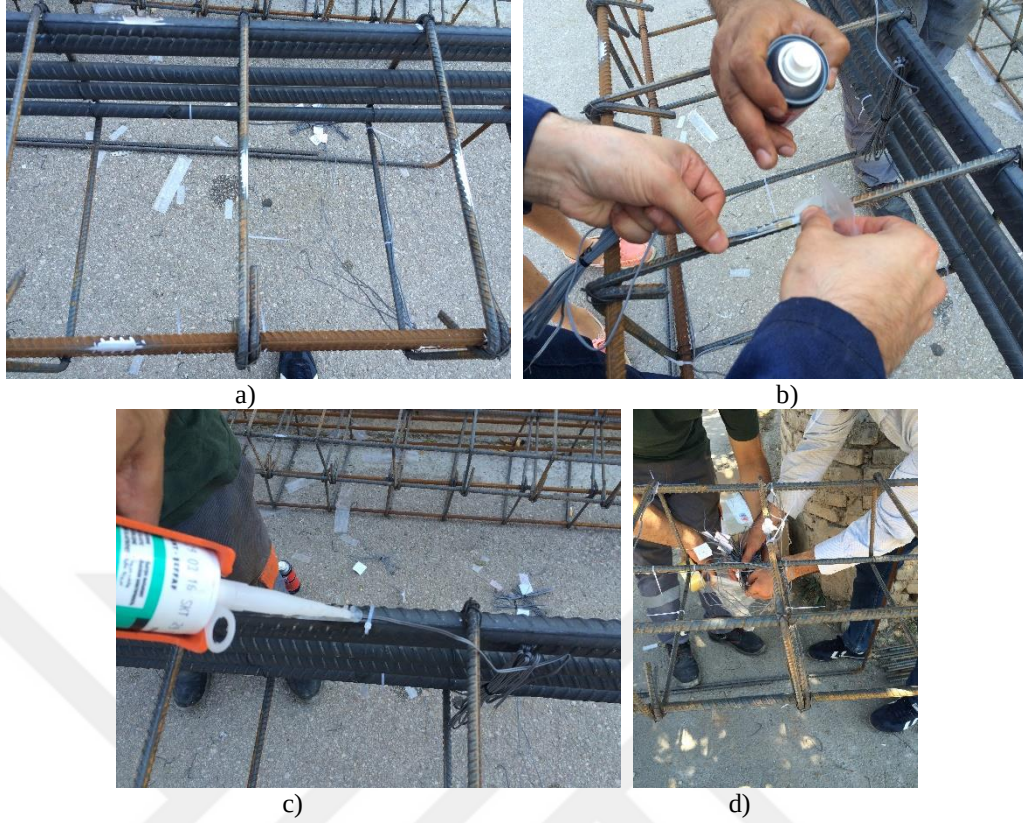


Şekil 5.2. Numunelerin geometrik özellikleri ve donatı detayları



Şekil 5.3. a) Pilot deney numunelerinin üretilmesi b) Deneysel çalışmaya ait numunelerin imalatı c) Tüm numunelerin genel görüntüsü

Deneysel çalışmada kullanılacak kirişlerin üzerinde her bir kirişte 2 adedi çekme donatılarında, 2 adedi basınç donatılarında ve 4 adedi etriyelerde olmak üzere toplamda 8 adet gerinim pulu (strain gauge) kullanılmıştır. Gerinim pulları ile donatılar üzerindeki birim uzama ve kısalmaları okumak amaçlanmıştır. Böylelikle donatıların akma şekildeğiştirmesine ve gerilmesine ulaşip ulaşmadığı deformasyonun boyutu ölçülecektir. Donatılar üzerine yerleştirilen gerinim pullarına ait imalat Şekil 5.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. a) Donatıların taşlanması ve zımparalanması b) Gerinim pulu yapıştırma işlemi c) Gerinim pulu üzerine silikon uygulaması d) Gerinim pullarının genel görüntüsü

Şekil 5.4.'te de görüldüğü gibi öncelikle donatılar üzerine taşlama işlemi uygulanmış daha sonra zımparalanarak pürüzsüz bir yüzey oluşturulmuştur. Bu aşamadan sonra aseton yardımıyla donatı üzerindeki demir tozları temizlenmiş ve kuvvetli bir yapıştırıcı yardımıyla gerinim pulları yapıştırılmıştır. En son aşamada ise beton dökümü sırasında, beton içindeki su içeriğinden kaynaklı olumsuzlukları engellemek adına yapıştırma işlemi yapılan bölgeye silikon uygulanmıştır. Bu işlemler tüm betonarme kirişlerinde 8 adet olarak belirlenen gerinim pullarının tamamına uygulanarak devam etmiştir. Toplamda 23 adet (16 adet esas+7 adet pilot) numune için bu işlemler tamamlanmıştır.

5.3. Deney Numunelerine Ait Malzeme Özellikleri

Betonarme yüksek dayanımlı kiriş numunelerinin tamamında yüksek mukavemetli C60/75 sınıfı beton, donatılar için ise S420 donatı çeliği kullanılmıştır. C60/75 beton sınıfı için karışım oranları Tablo 5.5.'te verilmiştir.

Tablo 5.5. Beton karışım oranları

C60/75 1 m3 Beton için	
Çimento Cem 42.5r	475 Kg
Kimyasal Katkı (Hiper Akış.) Ekan	5 Kg
Labbet	
0-3 mm Doğal Kum	300 Kg
0-5 mm Taş Tozu	460 Kg
5,6-11,2 mm Agrega	561 Kg
11,2-22,4 Agrega	428 Kg
Su	156 Kg
Toplam	2385 Kg

Beton dökümü gerçekleştirilirken 12 adet 150*150*150 mm boyutlarında küp numune alınarak beton basınç dayanımları kontrol edilmiştir. Ayrıca 28 günlük beton basınç dayanımı da beton tedarikçisi firma tarafından 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki silindir numuneler ile kontrol edilerek raporlanmıştır. Bununla birlikte farklı çaplardaki donatılar (Ø8, Ø12, Ø16, Ø20 ve Ø26) için donatı çekme testleri yapılmıştır. Donatılar için akma ve kopma dayanımları ile akma ve kopma uzamaları belirlenerek gerilme şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Malzeme deneyleri Şekil 5.4.'te gösterilen cihaz ve ekipmanlar kullanılarak Sakarya Üniversitesi yapı malzemesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.5. a) Beton basınç dayanım testi b) Donatı çekme testi

Malzemeler için elde edilen dayanımlar kullanılan her bir farklı malzeme için üçerli gruptan elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen ortalama çekme ve basınç dayanımları ise Tablo 5.6.'da verilmiştir. Malzeme deneyleri ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ulusal ve uluslararası yönetmeliklerdeki tasarım ve değerlendirme kriterlerine göre yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre malzeme özelliklerine ait karakteristikler ve malzeme sınıfları kategorize edilmiştir (TS EN 206, TS 708, EN 12390-1, EN 12390-2, EN 12390-3, EN 12390-4)

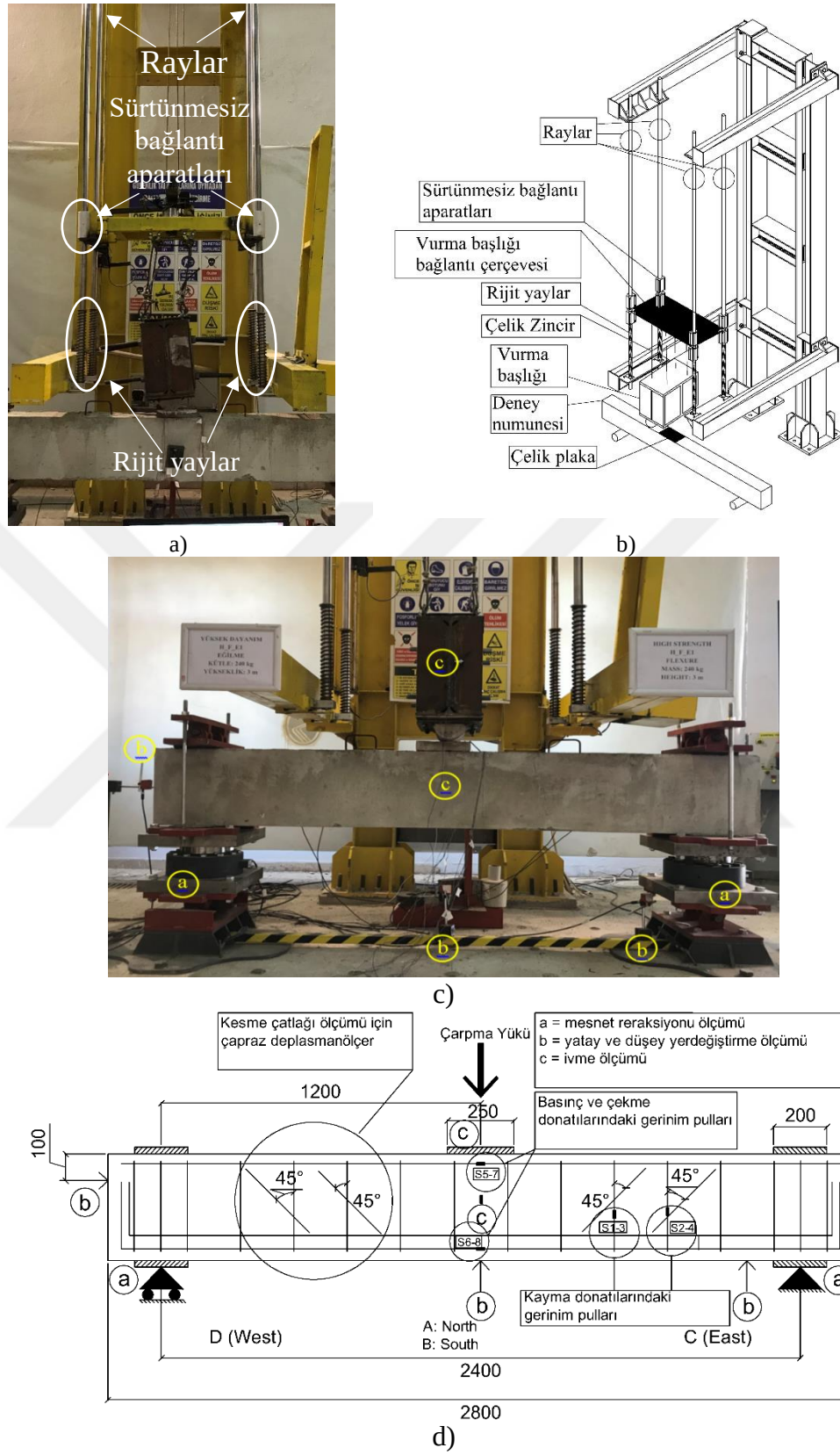
Tablo 5.6. Malzeme deneyi sonuçları

Beton Numunesi	Basınç Dayanımı (28 günlük silindir)	Beton Numunesi	Basınç Dayanımı (28 günlük küp)	Donatı Çapı	Akma/Kopma Dayanımı
1	62,3 MPa	1	78,2 MPa	Ø8	420/550 MPa
2	63,1 MPa	2	79,4 MPa	Ø12	440/550 MPa
3	60,1 MPa	3	77,6 MPa	Ø16	490/590 MPa
Stand. sapma	0,75-0,92 MPa	Stand. sapma	1,27-1,55 MPa	Ø20	440/600 MPa
Ortalama	61,3 MPa	Ortalama	78,4 MPa	Ø26	500/670 MPa

5.4. Çarpma (Darbe) Deney Düzeneği ve Ölçüm Cihazları

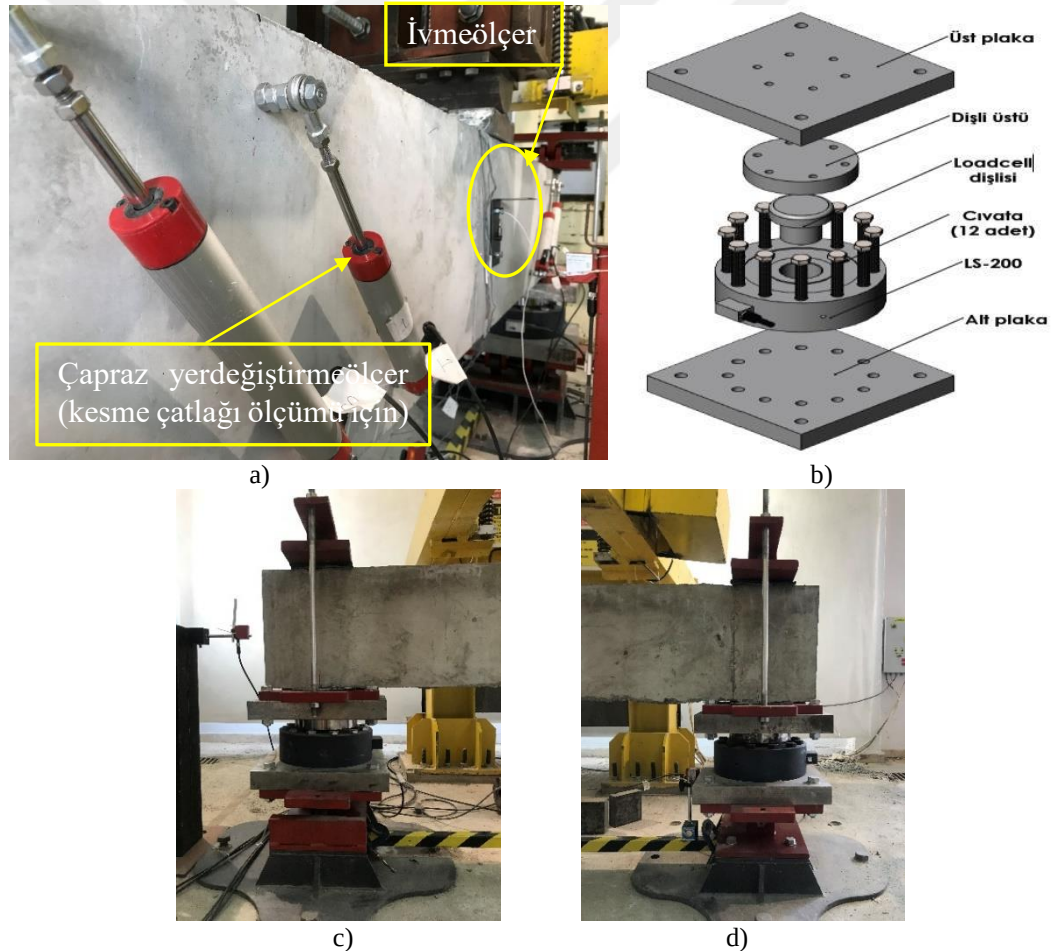
Çarpma deneyleri Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği laboratuvarında bulunan çarpma (darbe) çerçevesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çarpma çerçevesi, mevcut laboratuvarda titreşim oluşturmamak üzere yeniden imal edilen rijit bir temel üzerine monte edilmiştir. Deney düzeneğinin temeline ait detay çizimleri ve ait imalat süreci Şekil 5.6.'da gösterilmiştir.

Bu rijit temel yaklaşık olarak 4200x2900 mm ve 600 mm kalınlıkta olacak şekilde, C30 beton sınıfı ve S420 donatı çeliği kullanılarak mevcut laboratuvar binasında yerinde döküm işlemi ile üretilmiştir. Temelde deney düzeneğinde oluşabilecek büyük kuvvetlere altında sıyrılmayı engelleyecek plaka detayı ve temel çevresinde sönümleyici malzemeler kullanılmıştır. Çarpma çerçevesi, maksimum 1 ton vurma başlığı ağırlığı ile 3 m yükseklikten serbest düşme ile çarpma deneyleri gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5.7. a) Çarpma deney düzeneği b) Çarpma deney düzeneği 3 boyutlu çizimi c) Ölçüm cihazları şematik gösterimi

Çarpma kütlesi Şekil 5.7.'de de görüldüğü gibi düşürme platformuna dört adet rijit yay ile bağlıdır. Çarpma deneylerinde kullanılacak cihazlar Şekil 5.7. c ve 5.7. d'de gösterilmiş olup, (a) yük hücresi, (b) lazermetre ve (c) ivmeölçerler verilmiştir. Ayrıca donatılardaki deformasyonları ölçmek için numune orta noktasındaki basınç ve çekme donatılarına, kesme açıklığında ise beton çatlamasından sonra diyagonal çekme gerilmelerini karşılamada önemli olacak enine donatılara gerinim pulları yapıştırılmıştır. Tüm cihazların ve gerinim pullarına ait yerleşim planı ile yükleme şeması Şekil 5.7. d'de gösterilmiştir. Yükleme esnasında oluşan çatlak genişliklerini belirlemek için numunenin arka yüzeylerine yerdeğiştirme ölçerler yaklaşık 45 derece açıyla yerleştirilmiştir. Mesnet detayı ve çatlak ölçümü için kullanılan mafsallı yerdeğiştirme ölçerler Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. a) Çatlak genişliği ölçmek için kullanılan mafsallı yer değıştirme ölçerler b) Mesnet bağlantı detayı c) Hareketli mesnet detayı d) Sabit mesnet detayı

Deneysel çalışmada çarpma çerçevesi ile uyumlu çalışabilecek ve basit kirişe ait mesnet koşullarını sağlayan bir mesnet tasarımı yapılmıştır. Bu mesnetlerde hem çekme hem de basınç kuvvetlerini ölçebilen, 200 ton-kuvvet kapasiteli yük hücreleri kullanılmıştır.

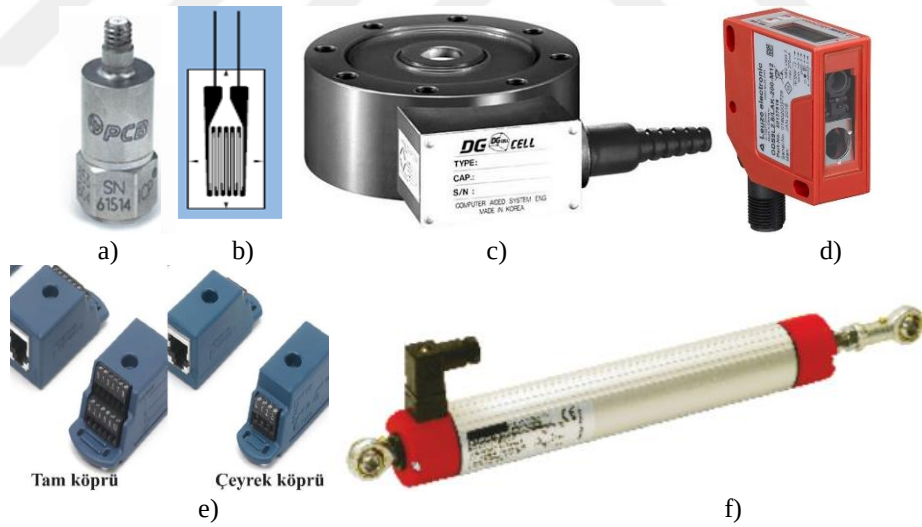
Çarpma deneylerinde biri vurma başlığında biri numunede olmak üzere 2 adet ivmeölçer kullanılmıştır. Basınç, çekme ve kayma donatılarında toplam 8 adet gerinim pulu ile donatılardaki birim şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Ayrıca kiriş orta noktası, düzlem dışı ve kayıcı mesnetteki yanal yer değiştirme ile sabit mesnete çok yakın bir noktadan yer değiştirme ölçümü 4 adet lazer metre ile yapılmıştır. Bununla birlikte çatlak genişliği ölçümü için 4 adet mafsallı yer değiştirme ölçerler ve mesnete reaksiyonları yük mesnetlerdeki 2 adet yük hücresiyle ölçülmüştür. Tüm bu ölçüm cihazları NI-cDAQ ana şaseye bazı okuyucu kartlar yardımıyla bağlanmıştır. Bu ana şase ve okuyucu kartlar sayesinde oluşturulan veri toplama sistemi ile deneylerde ölçümler yapılmıştır. Bu deney düzeneği için tamamı Sakarya Üniversitesi Bapk desteğiyle temin edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan veri toplama sistemi ve ölçüm cihazları ise aşağıda sıralanmış, Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da gösterilmiştir. Deneylerde kullanılacak cihazlar;

İvmeölçer: Deney kapsamında iki adet üretimli ± 5000 g kapasiteli PCB 350C04 model ICP tipi şok ve tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerlerden biri deney numunesi üzerine, diğeri ise çarpma kütlesi üzerine yerleştirilmiştir. (Şekil 5.9. a). İvmeölçerlerin veri toplama sistemine bağlantısı NI 9234 (Şekil 5.9. b) bağlantı kartı yardımıyla yapılmıştır. Bu bağlantı ivmeölçerlerin hassas ölçüm yapabilmesini sağlayan quaksel tipi özel bir kablo ile bağlanmıştır.

Gerinim pulu: Her bir numunede 4 adet 3 m kablolu FLA (120 ohm), 4 adet 3 m kablolu YFLA (120 ohm) tipi gerinim pulu kullanılmıştır. YFLA tipi gerinim pulları enine donatılarda oluşan, FLA tipi gerinim pulları ise boyuna donatılarda oluşan şekildeğiştirmeleri ölçmek için kullanılmıştır (Şekil 5.10. b). Gerinim pullarının veri toplama sistemine bağlantısı NI 9237 (Şekil 5.10. c) bağlantı kartı ve çeyrek köprü (Şekil 5.9. e) yardımıyla yapılmıştır.

Yük Hücresi: Numune mesnetlerinde, mesnet reaksiyonları ölçmek için 200 ton-kuvvet kapasiteli yük hücresi kullanılacaktır. LS200 (Şekil 5.9. c) yassı tipi yük hücresi hem çekme hem de basınç kuvvetlerini ölçebilen yük hücreleri olup NI 9237 (Şekil 5.10. c) bağlantı kartıyla ve tam köprü (Şekil 5.9. e) desteğiyle veri toplama sistemine bağlantısı yapılmıştır.

Lazermetre: Nesneye karşı duyarlı olan ve kırmızı lazer ışığı ile ölçüm yapan bu sensör analog çıkışlıdır. Lazer sınıfı 1, IEC/EN 60825-1:2007 olup, ışık spotunun büyüklüğü (sensör mesafesinde) 1 milimetredir. Ölçüm aralığı 50-450 mm olup 0.1 mm geometrik çözünürlüğe, %1 ölçüm hassasiyetine, %0.5 tekrar edilebilirliğe, 4ms ölçüm süresine sahiptir. Voltaj analog çıkışına sahip bu sensör 18-30 Volt arasında besleme gerilimi ile çalışmaktadır. Bu bağlantı kablosu 13 mm anahtar genişliğine sahip olup -25 ve +50 derece arasında ölçüm yapabilmektedir (Şekil 5.9. d). Lazermetrelerin veri toplama sistemine bağlantısı NI 9215 (Şekil 5.10. e) bağlantı kartı yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 5.9. a) İvmeölçer b) Gerinim pulu c) Yük hücresi d) Lazermetre e) Tam ve çeyrek köprü f) Mafsallı potansiyometre

Mafsallı Potansiyometre: Betonarme kirişlerde eğik çekme gerilmelerinden oluşan kesme çatlaklarının ölçümü için kullanılmıştır (Şekil 5.9. f). Mafsallı potansiyometreler veri toplama sistemine bağlantısı NI 9215 (Şekil 5.10. e) bağlantı kartı yardımıyla yapılmıştır.

Deney düzeneğinde bu cihazların bağlandığı ana şase ve bağlantı için gerekli kart okuyucuları ise aşağıdaki gibidir.

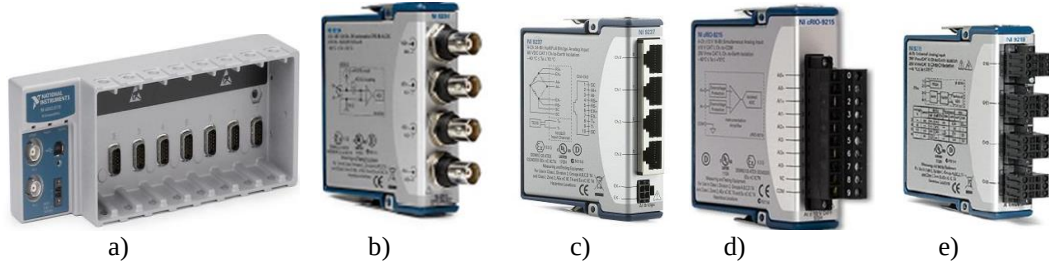
NI cDAQ: Bütün veri toplama cihazlarının toplandığı ana şasedir. Bu birime, cihazlar soket biçiminde yerleştirilerek veri akışı sağlanır (Şekil 5.10. a). Bu ana şase 8 adet kart okuyucu bağlanabilmekte ve 25 kHz veri sıklığıyla ölçüm yapılabilmektedir.

NI 9234: National Instrument üretimi NI 9234 (Şekil 5.10. b) ara kart modülü ile ivmeölçerlerden alınan veriler toplanacaktır. Bu kart dört kanallı olup ± 5 volt ve 0-2 miliamper çıkışlı olacak şekilde çalışmaktadır. Ayrıca veri alma sıklığı bakımından da veri toplama sistemi ana şasesi ile uyumlu çalışabilmektedir. Her bir deney numunesi için iki adet kullanılmıştır. Biri deney numunesi üzerine diğeri çarpma kütlesi üzerine yerleştirilecektir. Yerçekimi doğrultusunda kayıt alınmıştır.

NI 9237: National Instrument üretimi NI 9237 (Şekil 5.10. c) kart ve çeyrek köprü desteği ile donatı üzerindeki gerinim pullarından alınan değerler elde edilmiştir. Mesnetteki yük hücreleri de bu kart aracılığıyla veri toplama sistemine bağlanmış ve tam köprü desteğiyle mesnet reaksiyonları veri olarak kaydedilmiştir. Cihaz dört kanaldan oluşmakta ve ± 25 volt çıkışlı olarak çalışmaktadır. Bu kart okuyucu çeyrek ve tam köprüler Ethernet kablosu ile bağlanmaktadır.

NI 9219: Yerdeğiştirme ölçümü için kullanılan +50/450 mm kapasiteli lazermetrelerin veri toplama sistemine bağlanması için gerekli ara kart modülüdür (Şekil 5.10. d). Cihaz dört kanaldan oluşmakta ve ± 10 volt çıkışlı olarak çalışmaktadır. Lazermetreler 18-30 volt arasında çalışmakta ve bu nedenle veri toplama sistemine bağlı bu kart dışardan 24 volt çıkışlı bir güç kaynağı beslenerek kullanılmıştır.

NI 9215: Lineer potansiyometrik cetvel ve yerdeğiştirme ölçerlerin veri toplama sistemine uyumlu olabilmesi için gerekli ara kart modülüdür. NI 9215 (Şekil 5.10. e) kartı dört kanaldan oluşmakta ve ± 25 volt çıkışlı olarak çalışmaktadır.

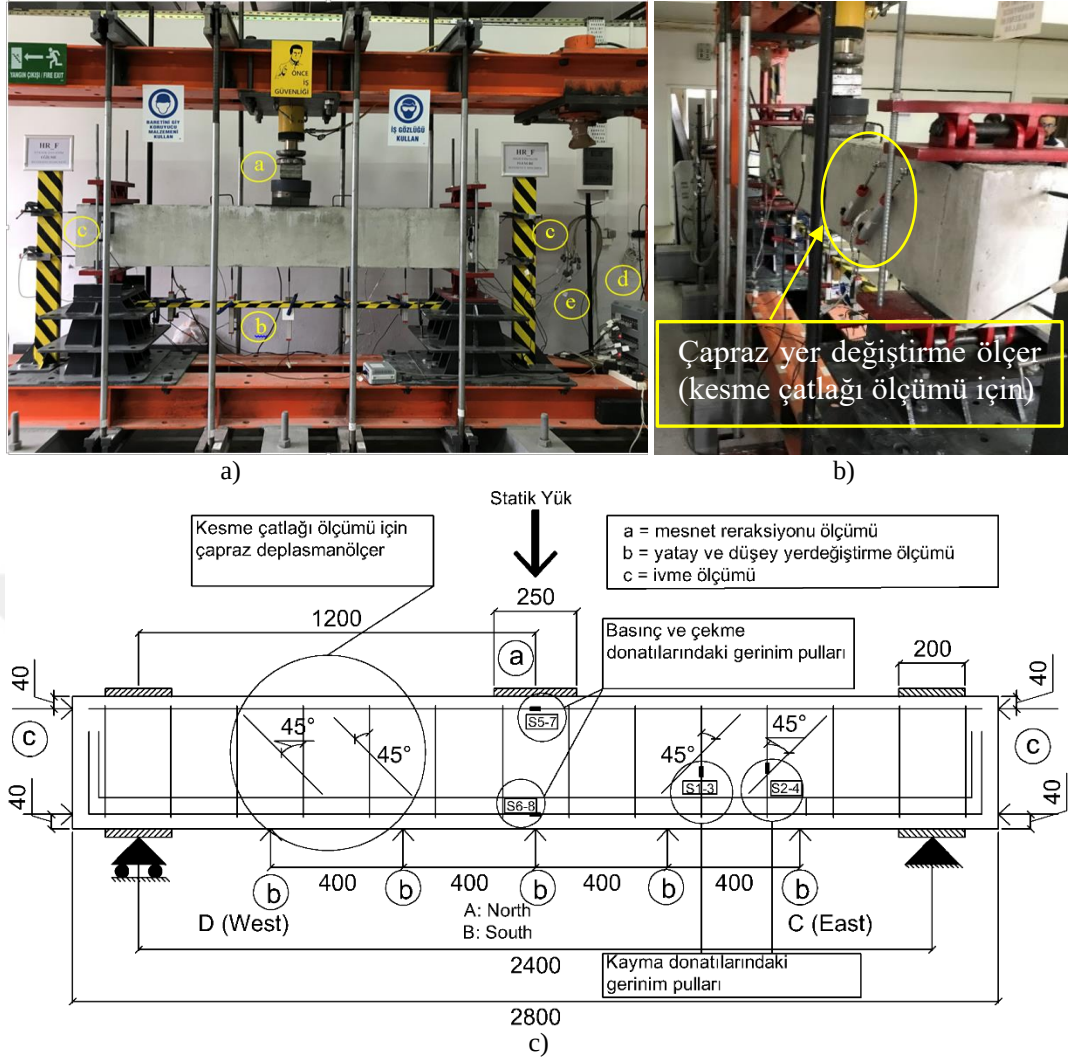


Şekil 5.10. a) NI cDAQ b) NI 9234 c) NI 9237 d) NI 9219 e) NI 9215

Deneyssel olarak tamamlanan bu doktora tez çalışmasında yapılan çarpma testlerinden bu veri toplama sistemiyle her bir deney numunesi için toplamda 20 farklı noktadan 5 farklı türde ölçüm yapılmıştır.

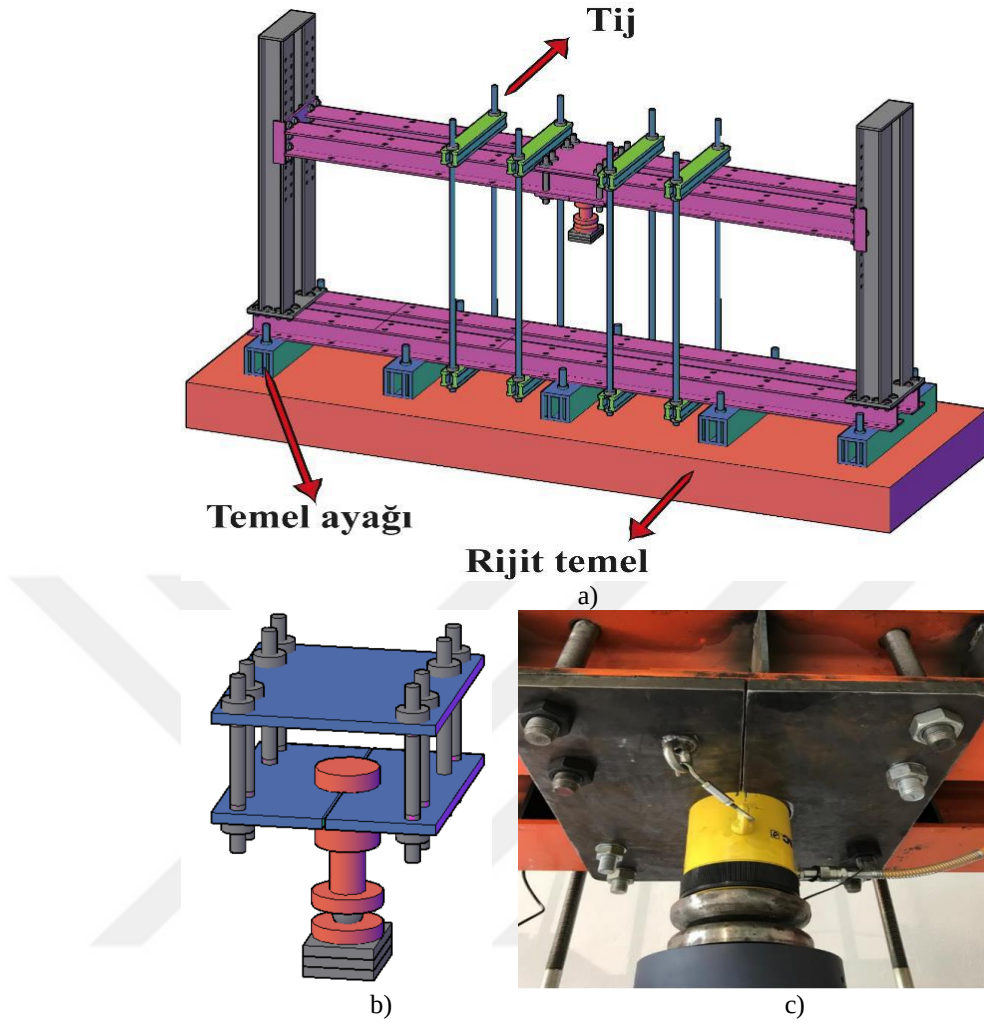
5.5. Eğilme (Statik) Deney Düzeneği ve Ölçüm Cihazları

Statik eğilme deneyleri Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği laboratuvarında bulunan eğilme çerçevesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğilme Çerçevesi, maksimum 5 m açıklığa sahip çelik veya betonarme numunelerinin deneylerinin yapılabilirdiği, 1000 kN eksenel yük kapasitesine sahip, üç ve dört noktalı yükleme yapılabilen çelik bir çerçeve sistemden oluşmaktadır. Deneyler sırasında Şekil 5.11. a ve 5.11. c’de de görüldüğü gibi, (a) uygulanan yük, (b) kiriş altındaki beş farklı noktadan düşey yerdeğiştirme, kayıcı ve sabit mesnedin alt ve üst uçlarından olmak üzere 4 farklı noktadan (c) yatay yerdeğiştirme değerleri (d) statik veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. Betonarme kiriş numunelerinde Şekil 5.11. b’de gösterilen ve yaklaşık 45 derece açıyla yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerler ile kesme çatlak genişlikleri ölçülmüştür. Ayrıca Şekil 5.11. c’de verilen yükleme şemasında ise enine ve boyuna donatılardaki şekildeğiştirmeler ölçmek için kullanılan gerinim pullarının yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 5.11. a) Eğilme çerçevesi b) Çatlak genişliği ölçmek için kullanılan mafsallı yer değiştirme ölçerler c) Eğilme çerçevesinde yükleme şeması

Eğilme çerçevesi mevcut laboratuvar temelinden ayrı olarak imal edilmiş rijit bir temele ankrajı yapılarak kullanılmaktadır. Böylelikle eğilme çerçevesinde oluşan büyük yükler altında oluşan gerilmeler, rijit temele düzgün bir şekilde iletilmektedir. Deneyler gerçekleştirilirken, büyük yükler altında eğilme çerçevesinin sehim yapabilme ihtimaline karşılık stabiliteyi korumak ve düzlem hareketi engellemek için çerçevede 4 adet önde 4 adet arkada olmak üzere sekiz adet tij çubuk kullanılmıştır. Ayrıca piston bağlantı noktasında bağlantı plakasındaki deformasyonları engellemek ve yükün doğru uygulanması amacıyla bağlantı plakaları da güçlendirilmiştir. Eğilme çerçevesinin stabilitesi için önemli detaylar Şekil 5.12.'de verilmiştir.



Şekil 5.12. a) Eğilme çerçevesi temel ve bağlantı detayı b) Piston için bağlantı detayı c) Bağlantı plakasının montajı (Yılmaz ve ark., 2017)

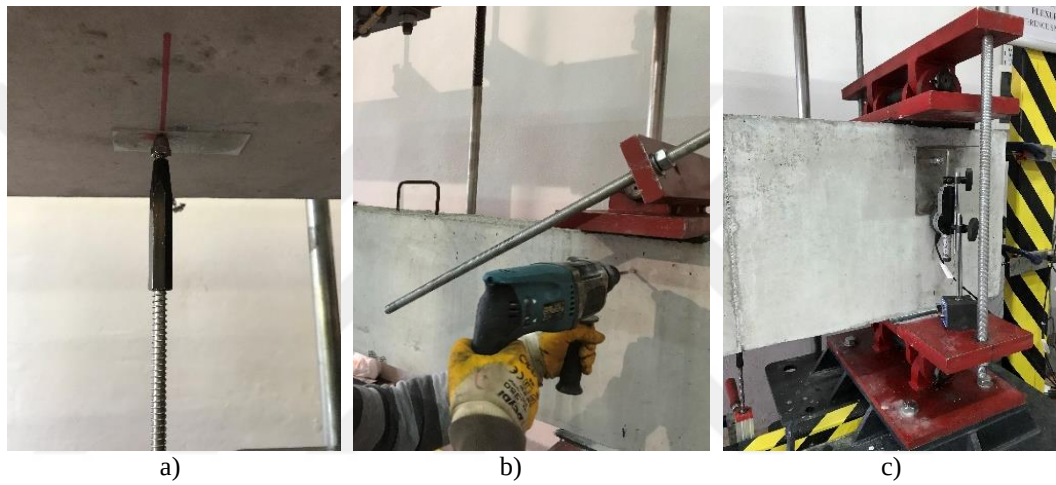
Statik eğilme deneylerinde ise kirişe ait yük-yerdeğiştirme, moment-dönme, yatay ve düşey ötelenmeler, kesme çatlağı ölçümleri, mesnet çökmeleri ile boyuna ve enine donatılardaki şekildeğiştirmeler veri olarak kaydedilmiştir. Deneyler esnasında yük, numuneye hidrolik bir piston yardımı ile sabit hızla manuel olarak uygulanmıştır. Uygulanan kuvvet, numune ile hidrolik piston arasına yerleştirilecek bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Numune alt bölgesinde, eleman açıklığının 5 farklı noktasına yerleştirilen ve farklı dirençlerde çalışan potansiyometrik cetveller yardımıyla, numunede oluşacak düşey yer değiştirme değerleri belirlenmiştir. Kiriş orta bölgesindeki dönmeyi belirlemek amacıyla basınç ve çekme bölgesine iki adet farklı dirençlerde çalışabilen potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Deney esnasında çekme, basınç ve kayma donatılarında oluşacak birim şekildeğiştirme değerleri

numune üretimi aşamasında donatılara yapıştırılan gerinim pulları ile ölçülmüştür. Deneyler süresince cihazlardan ölçülen veriler, hassasiyeti (saniyede 8 veri veya 0.125 kHz) statik deneylere uygun 32 kanallı ve 4 kanallı, birlikte uyumlu çalışan, 2 farklı veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. 4 kanallı veri toplama sistemi 2 adet 50 mm kapasiteli mititoyo (yerdeğiştirme ölçer) bağlanarak mesnet çökmeleri ölçülmüştür. Statik deneylerde kullanılan tüm ölçüm cihazları ve veri toplama sistemi 5.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. a) Yük hücresi b) Gerinim pulu c) Potansiyometre d) Mititoyo (yerdeğiştirme ölçer) e) 32 kanallı veri toplama sistemi f) 4 kanallı veri toplama sistemi

Deneysel olarak tamamlanan bu doktora tez çalışmasında yapılan eğilme testlerinden bu veri toplama sistemiyle her bir deney numunesi için toplamda 23 farklı noktadan 5 farklı türde ölçüm yapılmıştır. Deneysel çalışma sırasında ve pilot deneyler yapılırken ölçüm yüzeylerinin pürüzsüz olması için cam lam uygulaması kiriş yüzeylerinde yer değiştirme alınacak noktalarda kullanılmıştır. Bununla birlikte mesnetlerde mesnet çökmesi ve kesme çatlağı ölçümleri için farklı noktalardaki açılan montaj delikleri ile cihaz montajı sağlanmıştır. Şekil 5.14.'te cam lam uygulaması, mesnet çökmeleri ile çatlak genişliği ölçümünde yapılan delik açma ve cihaz montajı gösterilmiştir.



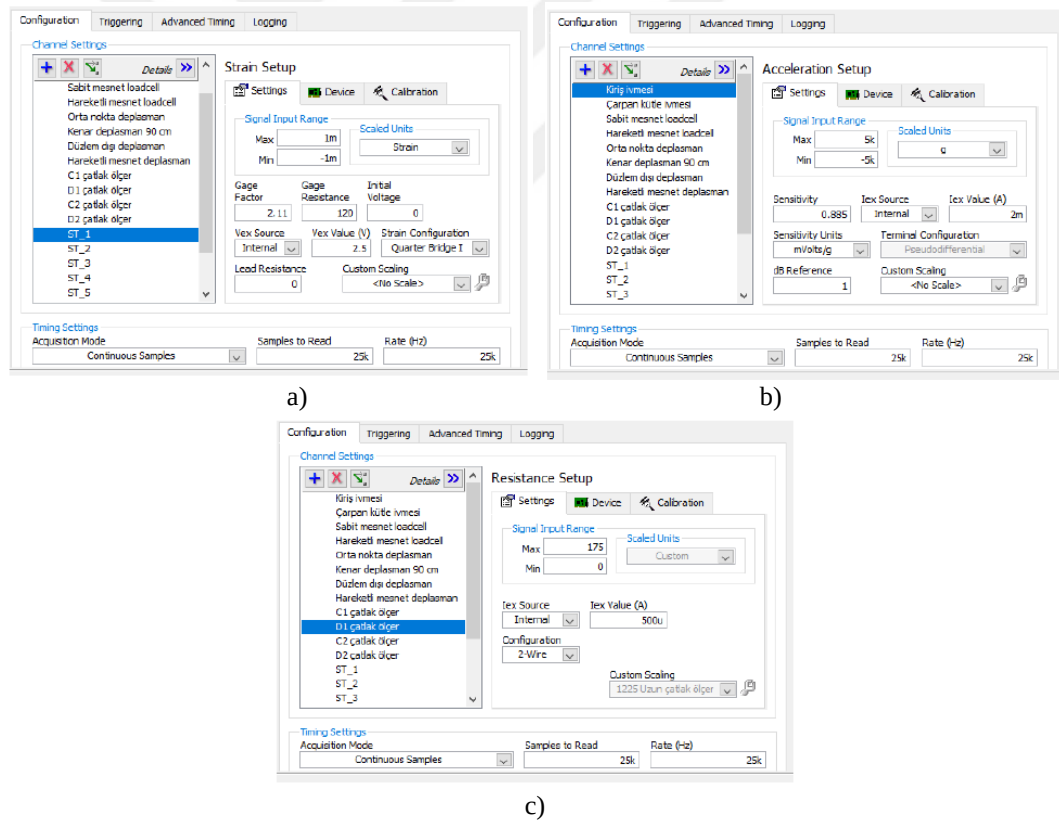
Şekil 5.14. a) Cam lam uygulaması b) Mesnet çökmesi ölçümü için bağlantı hazırlıkları c) Mesnet çökmesi ölçümü

Bu ölçüm tüm deneylerde tekrarlanmıştır ve deneysel veriler incelendiğinde mesnet çökmesi değerlerinin tüm deney sonuçlarını etkilemeyecek düzeyde olduğu görülmüştür.

5.6. Veri Analiz Yöntemi

Çarpma deneylerinde veriler NI SignalExpress 2015 aracılığıyla, eğilme deneylerinde ise veriler Teknik Destek Grup tarafından geliştirilen TestLAB programı aracılığıyla kaydedilmiştir. Verilerin işlenmesi için mevcut programların yetersiz kaldığı aşamalarda filtreleme vb. işlemler için Excel ve MATLAB programı kullanılarak verilerin işlenmesi sağlanmıştır.

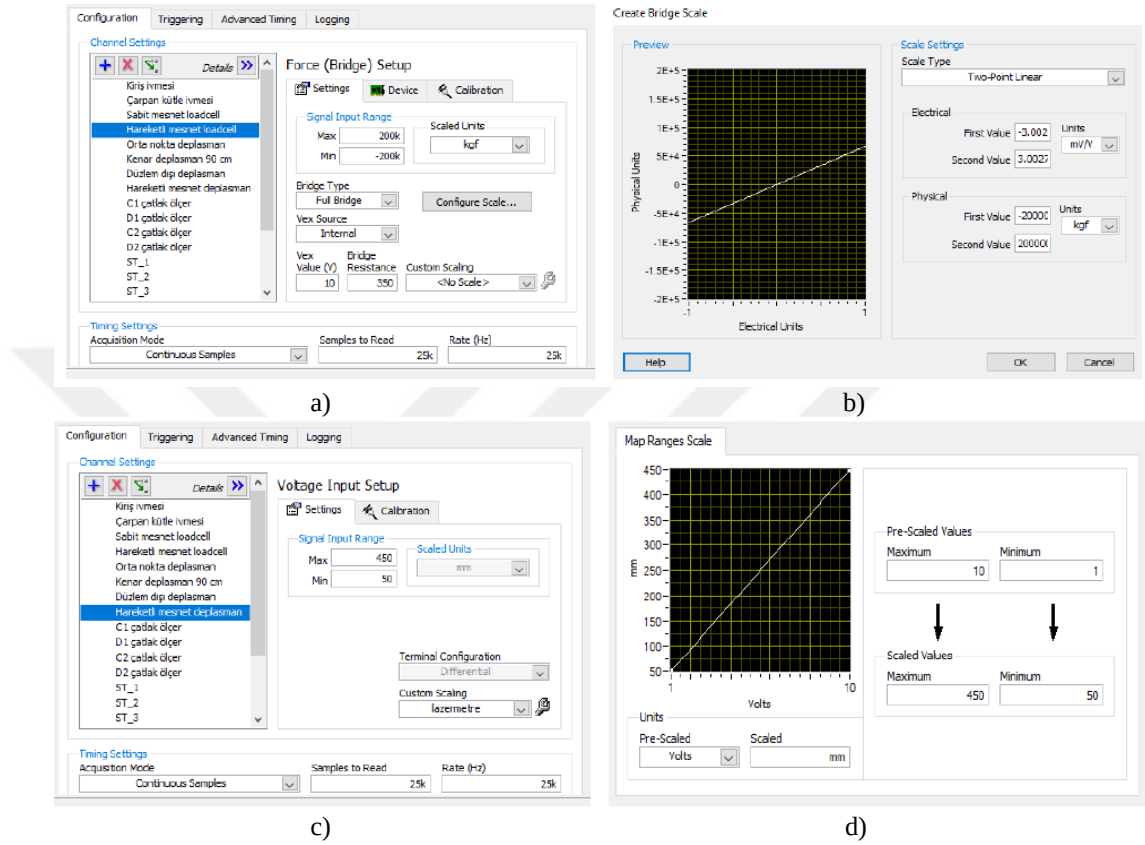
Signal Express programında 20 noktada 5 farklı tipte ölçüm alınmıştır. Bu programda her bir farklı tip ölçüm için program ara yüzünde cihazların hassasiyeti ve çalışma aralığına göre ayarlar yapılmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu ara yüzde mevcut çalışma aralıkları ve hassasiyetleri “Analog Input” modülü olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlamadan sonra bazı ölçümler için ölçeklendirme yapılması gerekmektedir. Lazermetre, yük hücresi ve mafsallı potansiyometrik cetveller için ölçeklendirme işlemleri program ara yüzünde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.15.’te program ara yüzü ilgili örnekler gösterilmiştir. İvmeölçerler için “acceleration”, gerinim pulları için “strain”, yük hücresi için “force bridge”, lazermetreler için ise “voltage” şeklinde ayarlar yapılarak veriler kaydedilmiştir. Bununla birlikte ivmeölçerlerin hassasiyeti ve gerinim pullarına ait “gauge factor” gibi katsayılar da doğru ölçüm yapabilmek adına programa tanımlanmıştır.



Şekil 5.15. a) İvmeölçer ayarları b) Gerinim pulu ayarları c) Mafsallı potansiyometre ayarları

Ayrıca gerinim pulları için yapılan çeyrek köprü ve yük hücreleri için yapılan tam köprü desteği de yine program ara yüzünde tanımlanarak verilerin doğruluğu

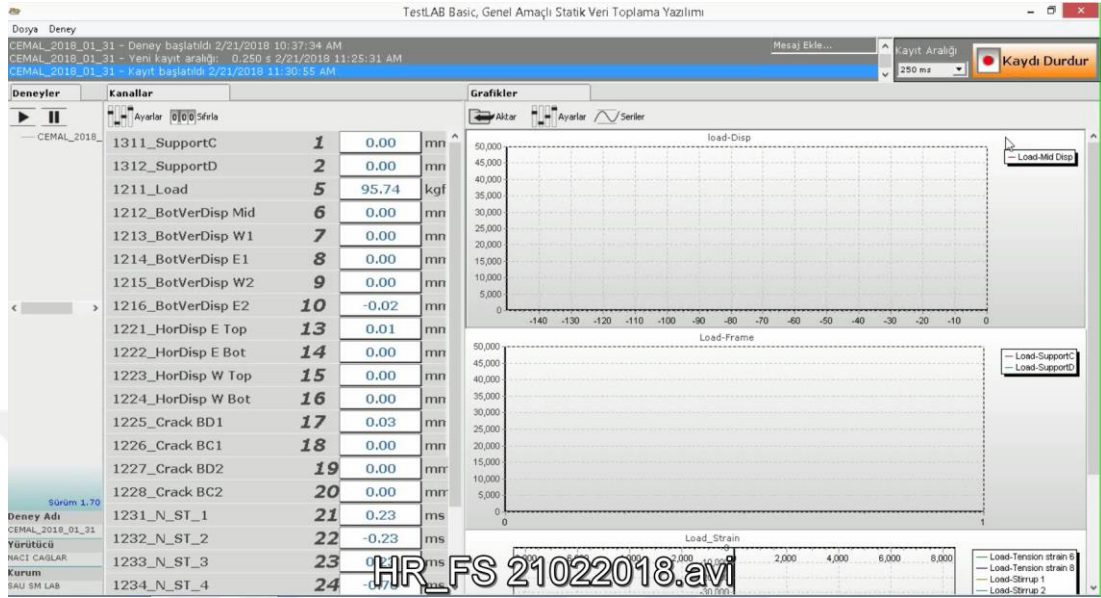
sağlanmıştır. Bu ayarlar tüm cihazlar için kontrol edilip kalibre edilmiş ve daha sonra deneysel çalışma tamamlanmıştır. Şekil 5.16.'da program ara yüzünde yapılan ölçeklendirmeler ile ilgili örnekler gösterilmiştir.



Şekil 5.16. a) Yük hücresi ayarları b) Yük hücresi için ölçeklendirme örneği c) Lazermetre ayarları d) Lazermetre için ölçeklendirme örneği

Statik eğilme deneylerinde kullanılan TestLAB programında ise kullanılan potansiyometrik cetveller (mafsallı ve mafsalsız olmak üzere 2 grup), gerinim pulları ve yük hücresi için kalibrasyon yapıp, program ara yüzünde bir veri toplama modülü oluşturulmuştur ve sonrasında her deneyde kontrol edilmiştir. TestLAB programında oluşturulan bu ara yüz pilot deneyler sırasında kontrol edilmiş ve sonuçlar doğrulandıktan sonra deneysel çalışmaya başlanmıştır. Mafsallı potansiyometreler kiriş arka yüzeyinde yaklaşık 45 derecelik açıyla kesme çatlak genişliklerini ölçmek için, mafsalsız potansiyometreler ise yatay ve düşey yerdeğiştirmelerin ölçümü için kullanılmıştır. Bu veri toplama sisteminde yük hücresi ve potansiyometrik cetveller bağlantı kabloları ile bağlanırken gerinim pulları için çeyrek köprü desteği

kullanılmıştır. Eğilme çerçevesinde kullanılan TestLAB programına ait ara yüz Şekil 5.17.'de verilmiştir.



Şekil 5.17. TestLAB program arayüzü

5.7. Pilot Deney Sonuçları

Deneyssel çalışmada kullanılacak betonarme kiriş numunelerinin geometrik özelliklerinin belirlenmesi ve numunelere ait donatı detaylarının oluşturulması pilot deney sonuçlarından elde edilen bulgular neticesinde gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda numune mesnetlerinde mesnet reaksiyonu ölçmek ve mesnetlerde oluşan gerilmelerini engellemek amacıyla hem çarpma hem de eğilme deney düzeneklerinde yeni birer mesnet tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımların doğruluğu da pilot deneylerle sağlanmıştır. Ayrıca betonarme kirişler için kullanılacak enerji düzeyleri, kullanılacak çarpma hızı ve çarpma kütlesi de pilot deneylerde oluşan numune davranışına ve hasarına göre belirlenmiştir. Bununla birlikte her iki deney düzeneklerinde (çarpma ve eğilme) kullanılacak cihazların ve veri toplama sistemlerin deney düzenekleri ile uyumlu çalışması ve sonuçların geçerliliği kontrol edilmiştir. Son olarak deney düzeneklerinde deneyler sırasında karşılaşılabilecek problemler görülmüş ve çözüm yöntemleri üretilerek deneylerde süreklilik sağlanmaya çalışılmıştır. Pilot deneylerde ilk aşamada deney numuneleri 250x400 mm boyutlarında ve 2500 mm uzunluğunda

iki farklı boyuna ve enine donatı düzeni ile imal edilmiştir. Sonraki aşamalarda ise kesit özellikleri ve enine donatı aynı tutularak sadece boyuna donatı değiştirilmiş ve her iki deney düzeneğinde eşdeğer bir yükleme prosedürü uygulamak için numune boyu 2800 mm'ye çıkarılmıştır. Tablo 5.7. ve 5.8.'de pilot deneylere ait deney matrisi verilmiştir. Her iki tablodaki numunelerin kesit ölçüleri aynı fakat Tablo 5.7.'de numune uzunluğu 2500 mm iken Tablo 5.8.'de 2800 mm'dir.

Tablo 5.7. Pilot çarpma deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi

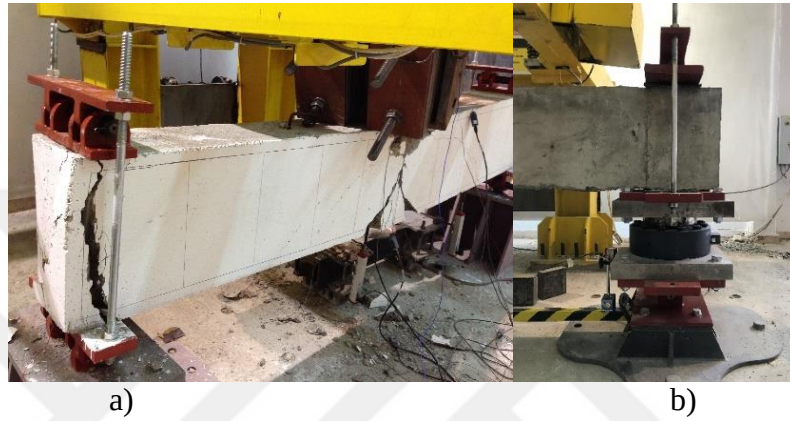
Betonarme Davranış	Numune Adı	Açıklama	Çarpma Kütlesi (kg)	Çarpma Yüksekliği (m)	Boyuna Donatı Oranı	Donatı Çekme	Basınç	Kesme
Eğilme	1	Deneme 1	220	2	$2\rho_{min}$	4 ϕ 16	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	2	Deneme 2	220	3,25				
	3	Deneme 3	345	2				
	4	Deneme 4	505	3,25				
Kesme	5	Deneme 5	505	2	$4\rho_{min}$	5 ϕ 20	2 ϕ 12	ϕ 8/100
	6	Deneme 6	505	3,25				
	7	Deneme 7	820	3,25				

Tablo 5.8. Pilot eğilme deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi

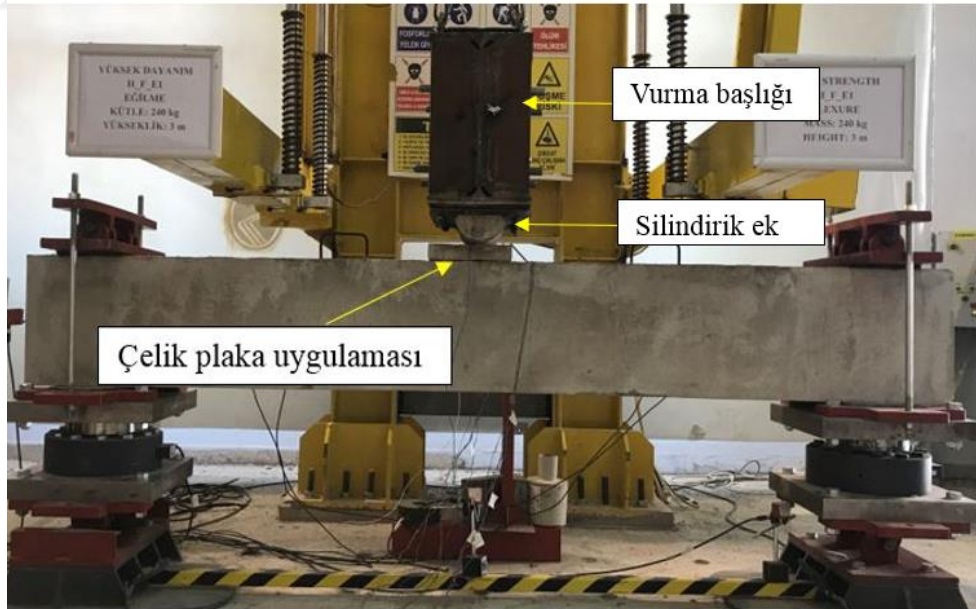
Beklenen Davranış	Numune Adı	Açıklama	Deney Tipi	Gerçekleşen Davranış	Boyuna Donatı Oranı	Donatı Çekme	Basınç	Kesme
Eğilme	H-F-R	Referans	Statik	Eğilme	ρ_{min}	2 ϕ 16	2 ϕ 12	ϕ 8/200
Kesme	H-S-R	Referans	Statik	Kesme	$7\rho_{min}$	6 ϕ 26	2 ϕ 12	ϕ 8/200

Pilot çarpma deneylerinde elde edilen sonuçlara göre deney düzeneğinde bazı aksaklıklar belirlenmiş ve deneylerin doğru şekilde tamamlanması için bu aksaklıklar giderilmiştir. Deney düzeneğinde pilot deneyler sırasında ortaya çıkan önemli problemlerden biri mesnet bölgesinde gerilme yığılmalarıdır. Bu nedenle yüksek enerji seviyelerinde mesnet bölgesinde numune hasar almıştır. Bu durum çarpma sonrası statik deneylerde mesnetlenme problemi yaratacağından mesnet plakasına ait genişlikler arttırılmıştır. Ayrıca mesnet reaksiyonu ölçümü içi temin edilen yük hücreleri için yeni bir mesnet tasarımı oluşturulmuştur. Pilot deney sonuçlarına göre mesnetlerin ilk hali ve yenilenen yeni mesnet tasarımı Şekil 5.18.'de verilmiştir. Çarpma yükünün uygulandığı noktada hasarın simetrik olmamasını etkileyen bir diğer faktör ise yükün uygulandığı noktadaki kayma donatısının durumudur. Yükün uygulandığı tam orta noktada etriyenin bulunması olası bir kaçıklık durumunda hasarın simetrik olmayacak şekilde oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle pilot

deneylerden elde edilen bu gözlemlerle numune tasarımında etriyenin tam orta noktaya gelmeyecek şekilde yerleştirilmesine karar verilmiştir. Bununla birlikte deney düzeneğinde de pilot deneylerde elde edilen bulgular neticesinde vurma başlığındaki silindirik ekin sebep olduğu lokal hasarı engellemek için rijit çelik plaka uygulaması yapılmıştır (Şekil 5.19.). Pilot çarpma deneyleri sırasında vurma başlığı ve deney düzeneği arasındaki bağlantı rijit yaylar ile sağlanmıştır.



Şekil 5.18. a) Mesnetlerin ilk hali b) Yenilenen mesnet tasarımı



Şekil 5.19. Çarpma yükü uygulanırken çelik plaka kullanılması

Çarpma deneyleri gerçekleştirilirken bu yayların burkulduğu ve kalıcı şekilde değişime yaptıkları gözlemlenmiştir. Bu nedenle vurma başlığının bağlantısı önce zincir olarak

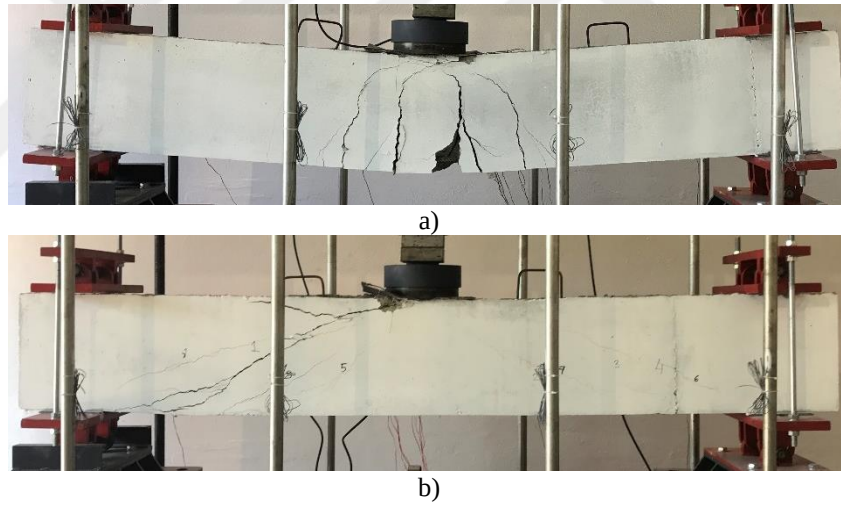
değiştirilmiştir. Büyük çekme kuvvetlerine maruz kalan zincirin de bağlantıda sorun çıkarması nedeniyle son aşamada bağlantı çelik halat ile sağlanarak deney sonunda kontrol edilmiş ve gerekli durumlarda değiştirilmiştir. Ayrıca deney düzeneğinde serbest düşmeyi yapan diğer başlıktaki bağlantılar da her aşamada kontrol edilmiştir. Bu başlığın bağlantıları bulonlarla yapılmış ve bu bulonlar deney esnasında büyük kesme kuvvetlerine maruz kalmıştır. Her deney sonunda bu bulonlar da yenilenerek deneyin güvenliği her aşamada kontrol edilmiştir. Şekil 5.20.'de vurma başlığı bağlantısı ve deney düzeneğindeki bahsi geçen problemler gösterilmektedir.



Şekil 5.20. a) Kullanılan ilk bağlantı detayları b) Tercih edilen bağlantı detayı

Deney düzeneğindeki bu problem ve uygulanan çözüm yöntemlerinin ardından deney numunelerinde uygulanan çarpma enerjileri, uygulanan kütle ve çarpma hızları numunelerde oluşan hasar durumu göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Özellikle deney düzeneğinde 500 kg'lık kütle ile yapılan ve 3 m'lik serbest düşme yüksekliği kullanılan deneylerde numunelerin bu enerji seviyesinden sonra göçmeye gidebileceği öngörülmüştür. Tablo 5.7.'deki deney matrisinden de görüldüğü gibi çok farklı çarpma hızları ve kütleler pilot deneylerde test edilmiştir. Özellikle çarpma sonrası kalıcı yani artık yük taşıma kapasitesinin bulunması amacıyla kirişleri göçmeye götürmeye enerji seviyelerini bulmak için farklı kombinasyonlar denemiştir. Bu deneyler sonucunda vurma başlığının kütlesindeki artışın numune hasarı üzerinde ani ve büyük değişikliklere sebep olduğu görülmüştür. Yükseklik ile ilgili deney düzeneğinde 3,25 m'lik bir sınır olması nedeniyle çalışmada değişken kütleli vurma başlığı tercih edilerek sabit düşme yüksekliği kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan

çarpma kütleleri 240, 360, 480 kg, serbest düşme yüksekliği 3 m ve çarpma hızı teorik olarak 7,67 m/s seçilmiştir. Çarpma deney düzeneğinde olduğu eğilme deney düzeneğinde de pilot deneyler yapılmıştır. Eğilme deney düzeneğinde yapılan 2 adet pilot deneyle numune tasarımı, deneylerde kullanılacak deney düzeneğinin ve mesnetlerin uyumlu çalışması ve deneylerde ölçüm alacak veri toplama sistemi ile ölçüm cihazlarının güvenilirliği kontrol edilmiştir. Tablo 5.8.'de görüldüğü gibi biri eğilme diğeri kesme olan her iki numune de beklenen davranışı göstermiştir. Çarpma deney düzeneğinde kullanılan mesnet tasarımı bu deney düzeneğinde de test edilmiştir. Deney düzeneğinde büyük kuvvetler uygulandığında, numunelerin düzlem dışı hareketi ile deney düzeneğinin düşey yer değiştirme değerleri de kontrol edilmiştir. Bu değerlerin deneylerdeki ölçümleri etkilemeyecek kadar küçük olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.21.'de eğilme ve kesme davranışı gösteren numunelerin deney tamamlandığı andaki durumları verilmiştir.



Şekil 5.21. a) Eğilme numunesi b) Kesme numunesi

Bununla birlikte son aşamada eğilme ve kesme davranışları deneysel olarak doğrulanan betonarme yüksek dayanımlı kiriş numuneleri, enine donatı oranları sabit tutulup farklı boyuna donatı oranları kullanılarak Abaqus sonlu eleman programında modellenmiş ve bu numunelerin statik yükleme altındaki eğilme ve kesme davranışları nümerik olarak da kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır. Böylece ön tasarımı teorik, nümerik ve deneysel olarak doğrulanarak deneysel çalışma aşamasına geçilmiştir.

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Bu tez çalışması kapsamında, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çarpma gibi dinamik etkiler altında ve sonrasında davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çarpma deneylerinde kullanılacak çarpma hızı ve kütlelerine yapılan pilot deneylerle karar verilmiştir. Bu aşamada kullanılan çarpma enerjilerinin kirişleri göçmeye götürmeyen ve taşıma gücünü etkileyen çarpma enerjileri olmasına özen gösterilmiştir. Böylelikle çarpma etkilerine maruz kalmış ancak dayanımını ve taşıma gücünü tamamen kaybetmemiş yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin davranışları ve artık yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Pilot çarpma deneyleri yapılırken deney düzeneğinde oluşan aksaklıklar, numunelerin hasar durumları ve göçme mekanizmalarına göre deney numuneleri de yeniden boyutlandırılmıştır. Bununla birlikte yeni yapılan tasarım da statik eğilme deneyi ile test edilmiştir. Davranış bakımından kesme ve eğilme numuneleri üzerinde yapılan pilot eğilme deneyleri ile davranış doğrulanmıştır. Bu bölümde sırası ile önce yapılan pilot çarpma ve statik deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Daha sonra çalışmaya esas yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çarpma deneyi sonuçları sunulmuştur. Son olarak çarpmaya maruz kalmış ancak taşıma gücünü tamamen kaybetmemiş yüksek dayanımlı betonarme kirişler ile referans kirişlerin eğilme deney sonuçları açıklanmıştır.

Deneysel çalışmadaki dinamik davranış çarpma deneylerinde zaman bağılı olarak elde ivme, yerdeğiştirme, toplam mesnet reaksiyonları, donatılardaki birim şekildeğiştirmeler ve kesme çatlak genişlikleri üzerinden açıklanmıştır. Çarpma deneylerinden elde edilen tüm veriler zaman bağılı çizilen grafikler, elde edilen maksimum ve kalıcı değerler olarak tablolar ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Statik (eğilme deneylerinde ise betonarme davranış ise kiriş orta noktasından uygulanan kuvvete bağılı olarak elde edilen yerdeğiştirme, mesnet çökmeleri,

donatılardaki şekildeğişiklikler ve kesme çatlak genişlikleri ile moment-dönme ilişkileri ile ifade edilmiştir. Çarpmaya maruz kalmış ancak taşıma gücünü tamamen yitirmemiş betonarme numunelere ait eğilme deneyi sonuçları, referans kirişlere ait eğilme deneyi sonuçları ile karşılaştırılarak davranıştaki değişim incelenmiştir. Böylelikle çarpma etkisiyle betonarme numunelerdeki artık yük taşıma kapasitesi, rijitlik, yerdeğiştirme ve dönme sünekliklerinin referans numuneye göre değişimi belirlenmiştir.

6.1. Pilot Deney Sonuçları

Pilot çarpma deneylerinde deney numuneleri 250x400 mm boyutlarında ve 2500 mm uzunluğunda iki farklı boyuna ve enine donatı düzeni ile imal edilmiştir. Bu deneylerde Tablo 6.1.'deki deney matrisinde açıklanan çarpma kütleleri ve hızları ile düşme yükseklikleri kullanılmıştır.

Tablo 6.1. Pilot çarpma deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi

Betonarme Davranış	Numune Adı	Çarpma Kütlesi (kg)	Çarpma Yüksekliği (m)	Çarpma Hızı m/s	Boyuna Donatı Oranı	Donatı Çekme	Basınç	Kesme
Eğilme	1	220	2	6,26	2 ρ_{min}	4 ϕ 16	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	2	220	3,25	7,99				
	3	345	2	6,26				ϕ 8/100
	4	505	3,25	7,99				
Kesme	5	505	2	6,26	4 ρ_{min}	5 ϕ 20	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	6	505	3,25	7,99				
	7	820	3,25	7,99				

Pilot çarpma deneylerinde oluşturulan deney numuneleri kesme ve eğilme davranışı gösterecek şekilde farklı enine ve boyuna donatı düzenleriyle tasarlanmıştır. Bu numunelerde elde edilen hasar durumu ve göçme mekanizmaları betonarme kirişlerin dinamik davranışı konusunda önemli bilgiler vermiştir. Eğilme numuneleri için 220 ve 345 kg kütleler 2 m ve 3,25 yüksekliklerden serbest bırakılarak deneyler yapılmıştır. Kesme numuneleri için ise kütleler artırılarak 505 kg ve 820 kg'lık kütleler 2 m ve 3,25 m'den serbest düşme yaptırılarak deneyler tamamlanmıştır. Bu deneylerde farklı tip ve büyüklükte hasar alan kirişlerin davranışı ve deney sonuçları Tablo 6.2.'de özetlenmiştir.

Tablo 6.2. Pilot çarpma deney sonuçları

Deney adı	İvme (g)	Orta nokta yerdeğiştirmesi (mm)	Kesme çatlak genişliği (mm)	Davranış	Hasar durumu
Deney 1	308,77	4,56	-	Elastik	Hasar Yok
Deney 2	317,48	5,00	0,26	Plastik	Hafif Hasar
Deney 3	763,34	27,43	0,82	Plastik	Orta Hasar
Deney 4	722,55	83,85	1,63	Plastik	Ağır Hasar
Deney 5	1191,68	88,42	3,19	Plastik	Ağır Hasar
Deney 6	-	-	-	-	Göçme
Deney 7	-	-	-	-	Göçme

Pilot çarpma deneylerine ait numunelerde arta enerji seviyesi ile hasarın yoğunlaştığı ve lokalize olduğu görülmüştür. Aynı zamanda vurma başlığının çarpma yükünü uyguladığı noktada etriye olması numunede oluşan hasarı etkilemiştir. Kiriş orta noktasında yükün uygulandığı noktadaki olası herhangi bir kaçıklık oluşması hasarın asimetrik oluşmasına sebep olmuştur. Bu nedenle betonarme numune tasarımı gözden geçirilerek etriyelerin çarpma yükünün uygulandığı orta noktada olmayacak şekilde düzenlenmesi sağlanmıştır. Deney 1’de uygulanan çarpma enerjisi (E_i) altında betonarme kirişlerde elastik davranış oluşmuş ve kalıcı şekildeğiştirmeler veya betonda hasar gözlemlenmemiştir. Ancak enerji arttıkça eğilme kirişleri de dâhil olmak üzere kirişlerde kesme hasarının oluşabildiği belirlenmiştir. Deney 2’de eğilme çatlakları ile gözlemlenebilen asimetrik kesme çatlakları da tespit edilmiştir. Ayrıca silindirik vurma başlığının yükü uygulandığı noktada neden olduğu lokal hasarla beton basınç bölgesinin ezilmesine neden olmuştur. Bu nedenle planlanan asıl çalışmada beton basınç bölgesinde yükün rijit bir plaka yardımıyla uygulanmasına karar verilmiştir. Bununla birlikte Deney 3’te artan çarpma enerjisiyle derin eğilme çatlakları görülmüş hasarın artan çarpma enerjisiyle lokalize olmasını ispatlar nitelikte gerçekleşmiştir. Kesme çatlakları ise kiriş gövdesinde, uygulanan çarpma enerjisi arttıkça belirgin hale gelerek daha büyük genişliklere ulaşmıştır. Pilot çarpma deneylerinde Deney 4 ve Deney 5’te çarpma enerjisine bağlı olarak artmıştır. Şekil 6.1.’de pilot çarpma deneylerinde elde edilen bazı hasar örnekleri verilmiştir. Bu hasarların dışında pilot deneylerde kullanılan mesnet genişliklerin yetersiz kaldığı ve mesnet bölgelerinde oluşan büyük gerilme yığılmaları nedeniyle büyük çatlakların oluştuğu görülmüştür.



a) Deney 1



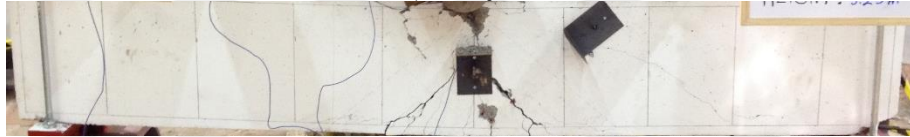
b) Deney 2



c) Deney 3



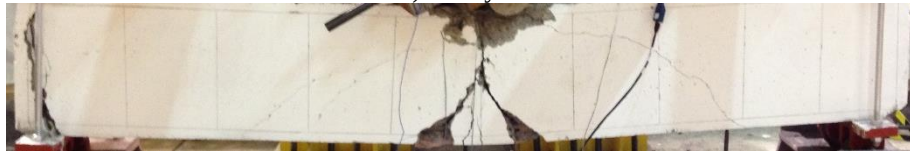
d) Deney 4



e) Deney 5



f) Deney 6



g) Deney 7



h) Deney 6 mesnet hasarı



i) Deney 7 mesnet hasarı

Şekil 6.1. Pilot çarpma deneylerinde oluşan hasarlar

Bu nedenle çalışmada mesnet tasarımı yenilenmiş, mesnet genişlikleri arttırılmış ve mesnet reaksiyonu ölçümleri için kullanılacak yük hücreleri ile uyum çalışacak hale getirilmiştir. Yenilenen mesnet tasarımı ile birlikte hem statik hem de çarpma deneylerinde üç noktalı, eşit bir yük prosedürü uygulamak adına numune boyu 2800 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca oluşan hasarın büyüklüğü ve numunelerin mekanizma durumuna gelmesi nedeniyle Deney 6 ve Deney 7’deki numunelerin göçme durumuna geldiği belirlenmiştir. Çarpma pilot deney sonuçları incelendiğinde 250x400 mm geometrik ölçülere sahip 2800 mm uzunluğunda ve 5 farklı donatı konfigürasyonlu ile oluşturulmuş betonarme kiriş numuneleri için Tablo 6.3.’teki çarpma enerjilerinin ve Tablo 6.4.’teki deney matrisinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 6.3. Deneyisel çalışmada kullanılacak çarpma enerjileri

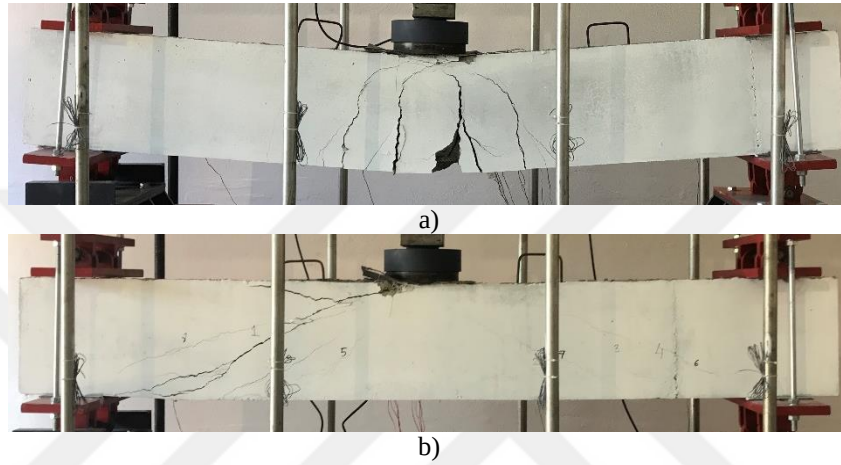
Enerji Seviyesi	Hasar Düzeyi	Çarpma kütlesi (kg)	Çarpma Yüksekliği (m)	Çarpma Hızı (m/s)	Çarpma Enerjisi, E_i (kJ)
E1	Düşük	240	3	7,67	6,95
E2	Orta	360			10,42
E3	Yüksek	480			13,90

Tablo 6.4. Deney numunelerinin özellikleri ve deney matrisi

Betonarme Davranış	Numune Adı	Açıklama	Çarpma Kütlesi (kg)	Çarpma Yüksekliği (m)	Boyuna Donatı Oranı	Donatı		
						Çekme	Basınç	Kesme
Eğilme	H-F-R	Referans	-	3	ρ_{min} (0,125 ρ_b)	2 ϕ 16	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-F-E1	E1	240					
	H-F-E2	E2	360					
	H-F-E3	E3	480					
Eğilme Kritik	H-FC-R	Referans	-	3	$2\rho_{min}$ (0,25 ρ_b)	4 ϕ 16	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-FC-E2	E2	360					
	H-FC-E2-2	E2	360					
	H-FC-E2-2	E2	360					
Kesmeli Eğilme	H-FS-R	Referans	-	3	$4\rho_{min}$ (0,49 ρ_b)	5 ϕ 20	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-FS-E2	E2	360					
	H-FS-E2-1.5	E2	360					
	H-FS-E2-1.5	E2	360					
Kesme Kritik	H-SC-R	Referans	-	3	$6\rho_{min}$ (0,67 ρ_b)	4 ϕ 26	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-SC-E2	E2	360					
	H-S-R	Referans	-					
	H-S-E1	E1	240					
Kesme	H-S-E2	E2	360	3	$7\rho_{min}$ (0,85 ρ_b) ($\rho_{maks.}$)	6 ϕ 26	2 ϕ 12	ϕ 8/200
	H-S-E3	E3	480					
	H-S-E3	E3	480					

Pilot çarpma deneyleri sonunda tasarımına karar verilen betonarme kirişler aynı zamanda pilot eğilme deneyleri yapılarak da davranışları doğrulanmıştır. Bu aşmada

en düşük ve en yüksek boyuna donatı oranına sahip eğilme ve kesme numuneleri için deneyler yapılmıştır. Eğilme deney düzeneğinde yapılan 2 adet pilot deneyle numune tasarımı kontrol edilmiştir. Eğilme ve kesme davranışını temsil eden deney numuneleri için güç tükenmesi durumunu gösteren deney sonu durum Şekil 6.2.'de verilmiştir. Şekil 6.2.'den görüldüğü gibi biri eğilme diğeri kesme olan her iki numune de beklenen davranışı göstermiştir.



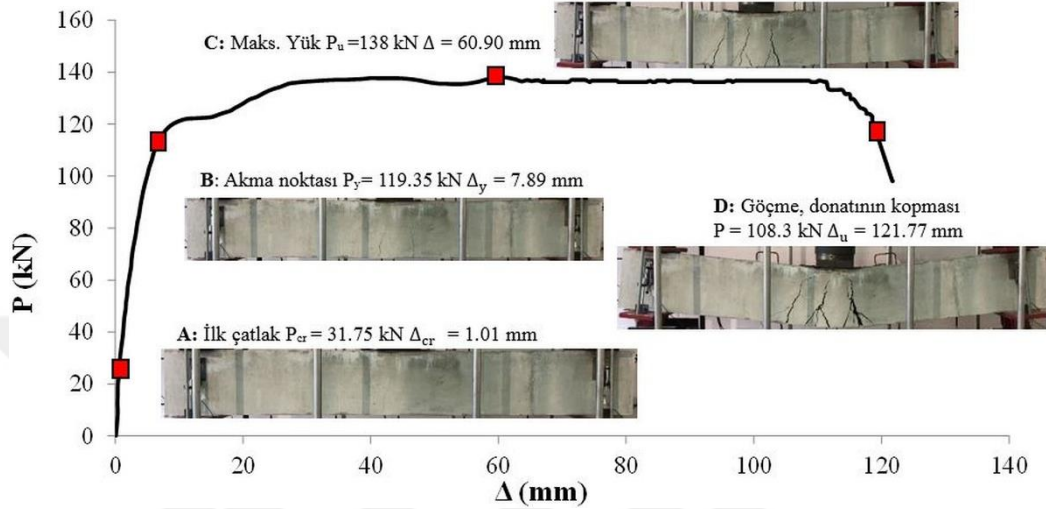
Şekil 6.2. a) Eğilme numunesi b) Kesme numunesi

6.2. Referans Numunelerine ait Eğilme Deneyi Sonuçları

Deneyisel çalışmada kullanılacak yüksek dayanımlı betonarme kirişler farklı dayanımlara ve süneklik kapasitelerine sahip olacak şekilde tasarlanmış ve sadece boyuna donatıları değiştirilerek üretilmiştir. Referans numuneler olarak seçilen H-F-R, H-FC-R, H-FS-R, H-SC-R, H-S-R betonarme kirişlere ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri sırasıyla Şekil 6.3., 6.4., 6.5., 6.6. ve 6.7.'de verilmiştir.

H-F-R numunesi için verilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi eğri üzerinde gösterilen dört farklı nokta (A, B, C, D) ile açıklanmıştır. Statik yükleme altında sünek davranış gösteren eğilme numunesi H-F-R için, tanımlanan bu noktalar ile farklı büyüklükteki eleman hasarına bağlı olarak kirişe ait yük yerdeğiştirme ilişkisi elde edilmiştir. Kirişte çekme bölgesindeki betonda ilk çatlak oluşana kadar elde edilen, yük-yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç eğimi, başlangıç rijitliği olarak adlandırılabilir ve değeri 31436 kN/m'dir. Bu ilk çatlakın oluştuğu, A noktasındaki kuvvet değeri $P_{cr} = 31,75$ kN, bu

kuvvete karşılık betonarme kirişte meydana gelen yerdeğiştirme değeri $\Delta_{cr} = 1,01$ mm'dir. Kiriş üstünde yükün artmasıyla betonarme kiriş yük-yerdeğiştirme eğrisinde akma noktası olarak tanımlanan B noktasına ulaşır.

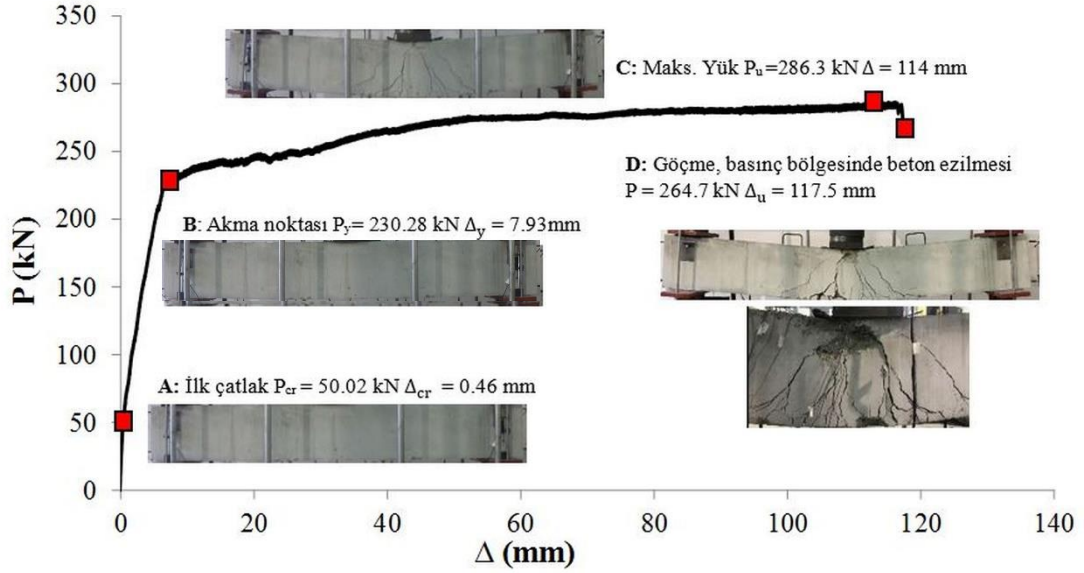


Şekil 6.3. H-F-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Bu noktada çekme bölgesindeki boyuna donatı üstündeki gerilme akma gerilmesine, donatılardaki deformasyon akma şekildeğiştirmesine ulaşmıştır. Eğilme numunesi H-F-R için akma noktasında yük $P_y=119,35$ kN yerdeğiştirme $\Delta_y=7,89$ mm'dir. Bu yük ve yerdeğiştirme değerinde çekme bölgesinde belirgin eğilme çatlakları görülmüştür. Eğilme numunesi C noktasında maksimum yük kapasitesi değeri $P_u=138$ kN'a ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme değeri $\Delta = 60,90$ mm'ye ulaşmıştır. Eğilme deneyinde kiriş maksimum yük taşıma kapasitesinde ulaştıktan sonra yük değerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. Statik eğilme testi betonarme kirişte çok geniş eğilme çatlaklarının görüldüğü D noktasında donatının kopmasıyla tamamlanmıştır. Bu noktada maksimum yerdeğiştirme değeri $\Delta_u=121,77$ mm. Bununla birlikte donatının kopmasıyla betonarme kirişte ani bir yük kaybı yaşanmış ve elde edilen yük değeri maksimum yüke göre %23 azalma ile 108,3 kN olarak elde edilmiştir.

Eğilme kritik ve kesmeli eğilme numuneleri H-FC-R ve H-FS-R için de yük-yerdeğiştirme ilişkisi, çekme bölgesindeki ilk çatlaktan göçmeye kadar olan davranışı temsil eden dört nokta (A, B, C, D) ile açıklanmıştır. Ancak bu numunelerde göçme,

H-F-R numunesindeki gibi donatının kopmasıyla değil basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle gerçekleşmiştir. Şekil 6.4. ve 6.5. H-FC-R ve H-FS-R için yük-yerdeğiştirme ilişkisini göstermektedir.

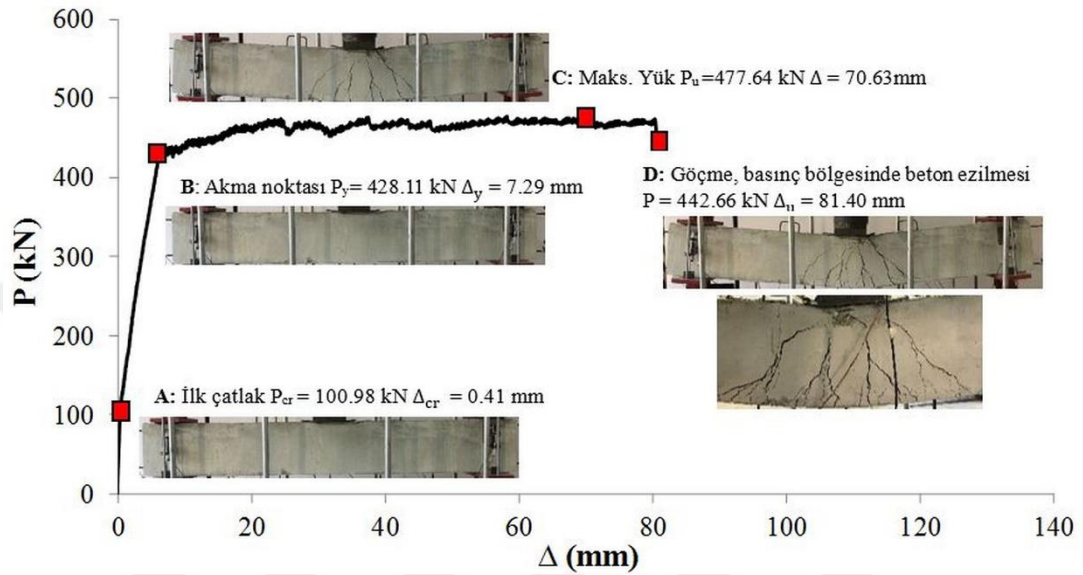


Şekil 6.4. H-FC-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Statik yükleme altında çekme bölgesindeki beton çatladığında H-FC-R numunesinde okunan kuvvet değeri $P_{cr} = 50,02$ kN iken H-FS-R numunesi için $P_{cr} = 100,98$ kN'dur. Bu ilk çatlağın oluştuğu, A noktasındaki, kuvvete karşılık betonarme kirişte meydana gelen yerdeğiştirme değerleri H-FC-R ve H-FS-R numuneleri için sırasıyla $\Delta_{cr} = 0,46$ ve $\Delta_{cr} = 0,41$ mm'dir. Kirişler, eğilme deneyinde uygulanan yükün artmasıyla yük-yerdeğiştirme eğrisinde akma noktası olarak tanımlanan B noktasına ulaşır. Akma noktasında kuvvet değerleri H-FC-R ve H-FS-R numuneleri için sırasıyla $P_y = 230,28$ kN ve $P_y = 428,11$ kN yerdeğiştirme değerleri ise $\Delta_y = 7,93$ ve $\Delta_y = 7,29$ mm olarak ölçülmüştür.

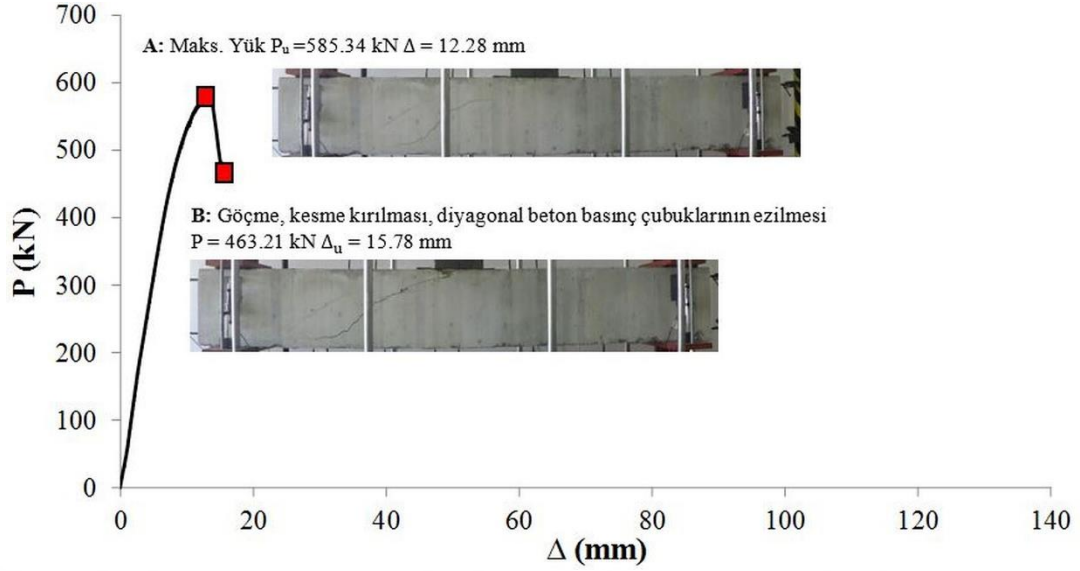
Bu yük ve yerdeğiştirme değerinde çekme bölgesinde belirgin eğilme çatlakları görülmüştür. Numuneler C noktasında maksimum yük kapasitesine ulaşırken kuvvet değerleri sırasıyla H-FC-R ve H-FS-R için $P_u = 286,3$ kN ve $P_u = 477,64$ kN bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme değerleri sırasıyla $\Delta = 114$ mm ve $\Delta = 70,63$ mm ulaşmıştır. Statik eğilme testi betonarme kirişte çok geniş eğilme çatlaklarının görüldüğü D

noktasında basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle tamamlanmıştır. Bu noktada maksimum yerdeğiştirme değeri H-FC-R ve H-FS-R için $\Delta_u = 117,5$ mm ve $\Delta_u = 81,40$ mm olarak belirlenmiş ve bu yerdeğiştirme değerine karşılık gelen kuvvet değerleri ise sırasıyla $P = 264,7$ kN ve $P = 442,66$ kN olarak ölçülmüştür.



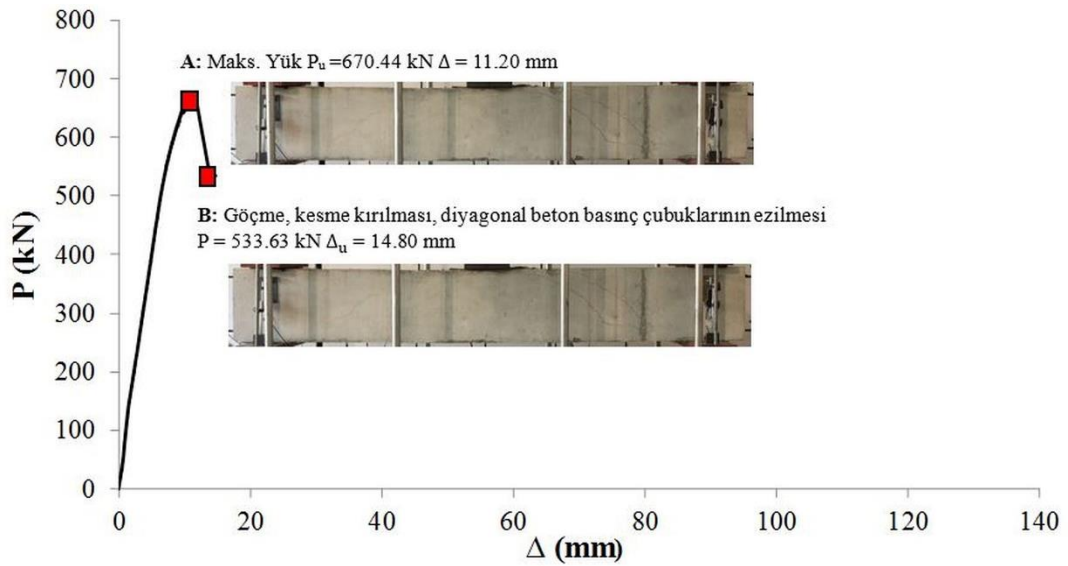
Şekil 6.5. H-FS-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Kesme kritik ve kesme olarak adlandırılan H-SC-R ve H-S-R numunelerinde ise davranış sünek olmadığından çekme bölgesindeki betonun çatlamasını (ilk çatlak) ve akma noktasını temsil eden noktalar çıkarılmış ve yük-yerdeğiştirme eğrisi daha az kritik noktayla açıklanmıştır. Şekil 6.6. ve 6.7. H-SC-R ve H-S-R için yük-yerdeğiştirme ilişkisini göstermektedir. H-SC-R ve H-S-R numuneleri doğrudan kesme davranışı göstererek maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Deneyler sırasında yükün doğrusal olarak artışı sırasında yükün uygulandığı noktadan mesnete kadar uzanan kesme çatlağı belirginleşerek çatlak genişliği artmıştır. Her iki numunede de kesme çatlağına ait genişliğin kirişi göçmeye götürmesiyle numuneler üzerindeki yük ani bir düşüş yaşamış ve bu noktadan sonra yük azalma eğilimine dönmüştür.



Şekil 6.6. H-SC-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

H-SC-R ve H-S-R olarak adlandırılan numunelerinde maksimum yük taşıma kapasitesi sırasıyla $P_u = 585,343 \text{ kN}$ ve $P_u = 670,44 \text{ kN}$ olarak belirlenirken bu değerler için ölçülen yerdeğiştirme değerleri $\Delta = 12,28 \text{ mm}$ ve $\Delta = 11,20 \text{ mm}$ 'dir. Bu kirişler için göçme durumu olarak kabul edilen ve deneyler esnasında son ölçülen kuvvet değerleri $P = 463,21 \text{ kN}$ ve $P = 533,63 \text{ kN}$ yerdeğiştirme değerleri ise $\Delta_u = 15,78 \text{ mm}$ ve $\Delta_u = 14,80 \text{ mm}$ olarak kaydedilmiştir.



Şekil 6.7. H-S-R numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Betonarme elemanların davranışını açıklayan en önemli parametrelerden biri sünekliktir. Süneklik, yapısal elemanların taşıma gücünü kaybetmeden (%15 veya daha fazla olduğunda göçme kabul edilir) sahip olduğu yerdeğiştirme yapabilme yeteneği olarak adlandırılmaktadır. Süneklik özellik de yerdeğiştirme sünekliği bir süneklik katsayısı (μ_{Δ}) ile tanımlanmaktadır. Süneklik katsayısı yapıda veya yapısal elemanda oluşan en büyük yerdeğiştirmenin (Δ_u) akma noktasındaki yerdeğiştirmeye (Δ_y , donatıların akma şekildeğiştirmesine ulaşarak kuvvetin sabit kaldığı yerdeğiştirme değeri) oranı olarak bilinmektedir. Betonarme yapılar veya yapısal elemanların sahip oldukları süneklik ile doğru orantılı olarak üzerine etkiyen yüklerden kaynaklanan enerjiyi sönmüleyebilirler. Bu enerji yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan (E_d) olarak tanımlanır. Böylelikle farklı süneklik kapasitelerine sahip betonarme elemanların enerji yutma kapasitesi hesaplanabilir. Bu çalışmada deneysel olarak incelenen farklı süneklik kapasitelerine sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin, maksimum dayanım (P_u), akma ve göçme yerdeğiştirmeleri (Δ_y ve Δ_u), rijitlikleri (K), süneklik (μ_{Δ}) ve enerji yutma kapasitesi (E_d) ile göçmeye sebep olan betonarme davranışları yük-yerdeğiştirme eğrileri ($P-\Delta$) kullanılarak elde edilmiştir. Deney sonuçlarına ait sayısal değerler Tablo 6.5.'te özetlenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen değerler referans değerler olarak kabul edilerek daha sonra farklı çarpma etkilerine maruz kalmış betonarme kirişlerin deney sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

Tablo 6.5. Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri

Numune	P_u (kN)	Δ_u (mm)	Δ_y (mm)	μ_{Δ}	E_d (kN.m)	K (kN/m)	a/d	V_r/M_r	Davranış
H-F-R	138	121,77	7,89	15,43	15,86	31436	3,3	3,55	Eğilme
H-FC-R	286,3	117,51	7,93	14,82	30,72	33313	3,3	2,41	Eğilme
H-FS-R	477,78	81,40	7,29	11,17	36,51	45928	3,3	1,21	Eğilme
H-SC-R	585,34	15,78	-	-	6,10	47666	3,3	0,86	Kesme
H-S-R	670,44	14,80	-	-	6,66	59860	3,3	0,63	Kesme

6.3. Çarpma (Dinamik) Deneyleri Sonuçları

Bu tez çalışmasında ise düşme yüksekliği sabit tutulmuş ve düşürülen kütlenin büyüklüğü değiştirilerek farklı çarpma enerji düzeyleri elde edilmiştir. Düşme yüksekliği 3 m ve teorik çarpma hızı 7,67 m/s olarak belirlenmiştir. Teorik çarpma hızı

ise Denklem 6.1’deki bağıntı yardımıyla hesap edilmiştir. Serbest düşme yaptırılan kütlenin büyüklüğü (vurma başlığının kütlesi) ise 240 kg olarak seçilmiştir. Bu vurma başlığına eklenen değişik kalınlıklardaki çelik plakalar ile kütle arttırılmış ve 3 farklı enerji düzeyi elde edilmiştir. Tablo 6.5.’te gösterilen enerji düzeyleri belirlenirken kirişlerde oluşan elastik ve plastik şekildeğiştirmeler dikkate alınmıştır. E1 enerji düzeyi elastik şekil değiştirmeye E2 ve E3 enerji düzeyleri ise plastik şekil değiştirmelere karşılık gelmektedir. Enerji düzeyleri belirlenirken “ASCE Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities” yönetmeliğinde tanımlanan düşük, orta ve yüksek olarak belirlenmiş enerji ve hasar seviyeleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışmada kullanılan çarpma enerjileri ve bu enerjilere bağlı bulunan çarpma hızları Denklem 6.1’den hesaplanmıştır. Betonarme kirişler üzerine etkiyen çarpma yükü ise Denklem 6.2 kullanılarak elde edilmiştir. Denklem 6.1 ve 6.2’de E betonarme kirişlere uygulanan enerjiyi (kJ), m çarpma kütlesini (ton), h serbest düşme yüksekliğini (m), g yerçekimi ivmesini (9,81m/s²), ü betonarme kiriş üstündeki ivme (m/s²), V_i ise çarpma hızını (m/s) temsil etmektedir.

$$E = mgH = \frac{1}{2}mV_i^2 \quad (6.1)$$

$$F = m\ddot{u} \quad (6.2)$$

Tablo 6.5’te bu deneysel çalışmada çarpma deneyleri yapılan yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunelerine uygulanacak enerji seviyelerine göre beklenen hasar durumları ve davranışları ile karşılaştırma parametresi gösterilmiştir.

Bu bölümde Tablo 6.6.’dan da görüldüğü gibi farklı çarpma enerjilerine maruz kalmış eğilme ve kesme davranış göstermesi beklenen numune serilerinin davranışları incelenmiştir. Eğilme ve kesme serileri için üç farklı çarpma enerjisi altında betonarme davranışın değişimi gözlemlenmiştir. Kritik ve kritik 2 serisi olarak adlandırılan serilerde ise farklı süneklik ve yük taşıma kapasitesine sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde sabit bir çarpma enerjisi uygulanmıştır. Bu serilerde ise aynı çarpma enerjisi altında süneklik ve yük taşıma kapasitesi farklı betonarme numunelerdeki davranışın değişimi belirlenmiştir. Sadece kritik 2 serisindeki H-FC-

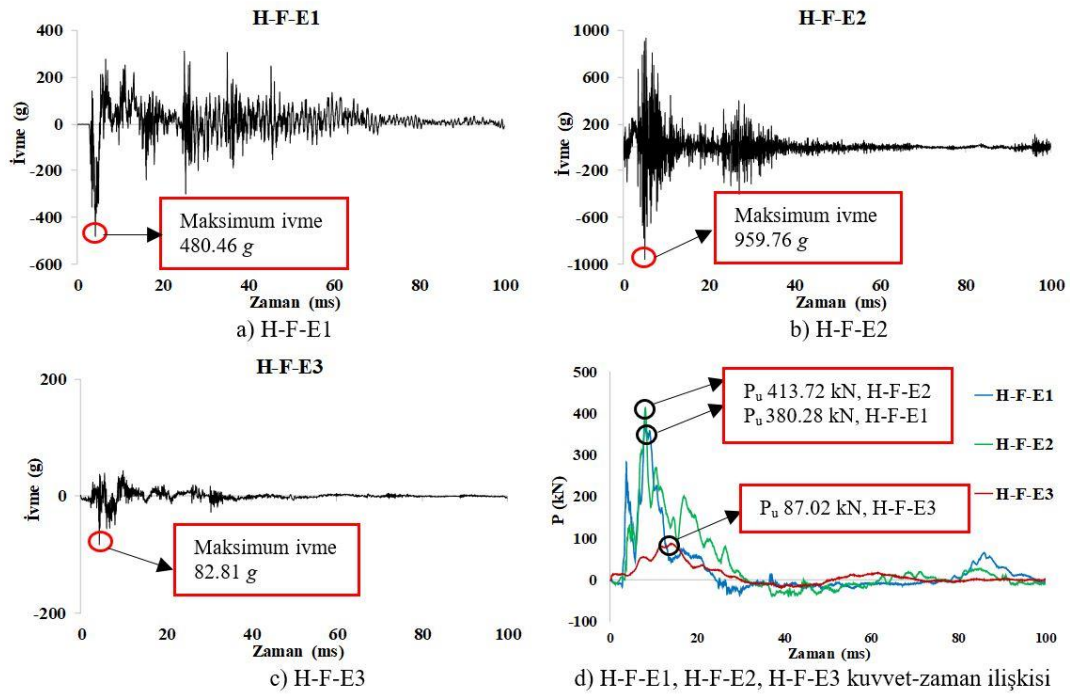
E2-2 ve H-FS-E2-1.5 numunelerinde düşme yüksekliği 2 ve 1,5 m, çarpma hızları 6,26 ve 5,43 m/s, çarpma enerjileri 7,06 ve 5,30 kJ'dur. Elde edilen deney verilerine göre deney numuneleri dinamik açıdan değerlendirilirken çarpma enerjisi ve süneklik kapasiteleri karşılaştırma parametresi olarak seçilmiştir. Böylelikle çarpma etkilerine maruz kalmış yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin davranışları belirlenerek karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına ait veriler, zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Her bir deney numunesi için deney sonuçları ayrı ayrı elde edilmiş ve daha sonra serilere ayrılarak karşılaştırmalı incelenmiştir. Elde edilen harekete ait sinyalleri detaylı incelemek için zaman aralıkları oldukça kısa seçilmiştir.

Tablo 6.6. Deney matrisi ve enerji düzeylerine göre karşılaştırma parametreleri

Seri adı	Karşılaştırma Parametresi	Betonarme Davranış	Numune Adı	Açıklama	Çarpma Kütlesi (kg)	Çarpma Enerjisi, E_i (kJ)	Hasar Seviyesi
Eğilme	Enerji	Eğilme	H-F-E1	E1	240	6,95	Düşük
			H-F-E2	E2	360	10,42	Orta
			H-F-E3	E3	480	13,90	Yüksek
Kritik ve Kritik 2	Süneklik	Eğilme	H-F-E2	E2	360	10,42	Orta
		Eğilme	H-FC-E2			7,06	
		Kritik	H-FC-E2-2			10,42	
		Kesmeli	H-FS-E2			5,30	
		Eğilme	H-FS-E2-1.5			10,42	
		Kesme Kritik Kesme	H-SC-E2			10,42	
Kesme	Enerji	Kesme	H-S-E1	E1	240	6,95	Düşük
			H-S-E2	E2	360	10,42	Orta
			H-S-E3	E3	480	13,90	Yüksek

Çarpma veya darbe gibi anlık impuls etkileri çok kısa bir zaman aralığında gerçekleştiğinden deney verileri küçük bir zaman aralığında hassas bir okuma ile incelenmiştir. Dinamik çarpma deneylerin kayıt süresi ve tamamlanması için deney düzeneğinin kuvveti uygulaması ve deneyin sonlanması toplam 16 saniye sürmüştür. Ancak deneyler 100 ms (milisaniye) gibi bir aralıkta incelenerek karşılaştırılmıştır. İvme-zaman, yerdeğiştirme-zaman, kuvvet-zaman, şekildeğiştirme-zaman olarak elde edilen zamana bağlı tüm veriler 0 – 100 ms için oluşturulmuştur. Kesme çatlak genişlikleri ise maksimum çatlak genişlikleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte eğilme davranışının gözlemlendiği numuneler için yüksek çözünürlüklü deney fotoğrafları kullanılarak piksele dayalı fotoğraflardan eğilme

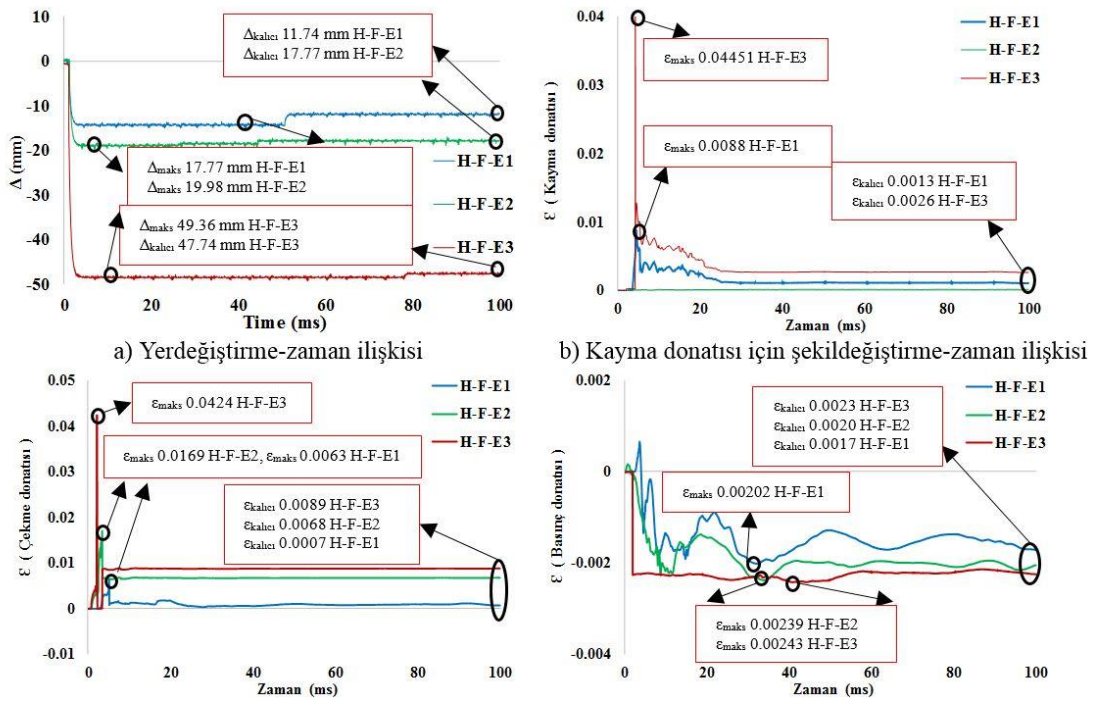
incelenmiştir. Çarpma deneyleri sonrasında eğilme davranışı göstermesi beklenen betonarme kiriş numunelerinde, tasarıma esas eğilme davranışı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte betonarme numunelere etki eden çarpma enerjisinin artmasıyla eğilme çatlakları daha belirgin hale gelmiştir. Tüm numunelerde kiriş orta noktasında bir ana eğilme çatlaklığı oluşmuştur. Numunelerdeki eğilme hasarının olduğu bölgenin uzunluğu ise çarpma enerjisi arttıkça azalmıştır. Bu sonuçla artan çarpma enerjisine bağlı olarak yüksek dayanımlı betonarme numunelerdeki hasar lokalize olmuştur. Ayrıca kirişlerde oluşan eğilme hâkim davranışın yanında kesme davranışı da gözlemlenmiştir. Deneylerde kullanılan çarpma enerjisinin artmasıyla kesme davranışı ve çatlakları da daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca numunelerdeki beton basınç bölgesi olan ve çarpma yükünün uygulandığı noktadaki lokal hasarlar uygulanan çarpma enerjisinin artmasıyla artmıştır. Deney numuneleri olarak hazırlanan yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin gövdesinde orta noktadan (yükün uygulandığı nokta) ivme ölçümü alınmıştır. Deneylerde karşılaştırma yapılmak üzere oluşturulan deney serilerinde değişken sonuçlar görülmüştür. Eğilme numunelerine ait seri için ivme ölçümleri Şekil 6.9.'da verilmiştir.



Şekil 6.9. Eğilme numunelerinde oluşan ivme-zaman ve kuvvet-zaman ilişkileri

Her bir deney numunesi için ± 5000 g kapasiteli ICP tipi şok ivmeölçerler kullanılarak yapılan deneylerde 0-100 ms aralığında ölçüm değerlendirilmiştir. Eğilme deney serisinde oluşan maksimum ivmeler (g) sırası ile zamana (milisaniye-ms) bağlı olarak H-F-E1, H-F-E2 ve H-F-E3 numuneleri için 480,46, 959,76 ve 82,81 g'dir. Bu sonuçlara bakıldığında çarpma hızı sabit kütle artışı ile gerçekleşen çarpma enerjisi altında betonarme numunelerdeki ivmeler artış gösteriyor. Ancak H-F-E3 ivme belirgin düzeyde azalım göstermiştir. H-F-E2 ile H-F-E1 numunesi ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 2 kat civarında ivme değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, H-F-E3 numunesine daha büyük çarpma enerjisi uygulanmasına rağmen ivme değerlerinde belirgin bir şekilde azalma olduğu görülmüştür. Çarpma enerjisinin büyümesi ile H-F-E3 kirişindeki eğilme hasarı artarak eğilme çatlakları genişlemiş ve hasar dar bir bölgede lokalize olmuştur. Böylelikle betonarme numunedeki çarpma enerjisi eğilme çatlaklarının genişlemesiyle sönmülerek ivme değerleri küçülmüştür. Ayrıca oluşan geniş çatlaklar, numune üzerinde oluşan ve yükün uygulandığı noktadan ivmeölçere ve mesnetlere kadar olan bölümde dinamik hareketle oluşan titreşimlerin iletilmesini de güçleştirmiştir. Bu nedenle mesnet reaksiyonları da ivmeler ile benzer şekilde H-F-E3 numunesinde önemli derecede azalmıştır. Şekil 6.9. d'de sabit ve hareketli mesnetlerin toplamını ifade eden (P_u)'nin (kN) zamana (milisaniye-ms) bağlı değişimi kuvvet-zaman ilişkisi olarak gösterilmiştir. Bu durum literatürde benzer deneyleri yapan bazı araştırmacıların da tespit ettiği önemli sonuçlardan biridir (Costovos ve ark., 2008; Cotsovos, 2010). Deney numunelerin orta noktasındaki düşey yerdeğiştirme değerleri çarpma enerjisinin artmasıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Bununla birlikte oluşan bu maksimum yerdeğiştirme değerleri ile kalıcı yerdeğiştirme değerleri arasında küçük farklar gözlemlenmiştir. (Şekil 6.10. a). Deney numuneleri statik yükleme altında eğilme davranışı göstermesine rağmen çarpma gibi sınırlı zaman aralığında gerçekleşen dinamik etkiler altında eğilme davranışının yanında kesme davranışı da gösterebilmektedir. Tablo 6.7.'den de açıkça görüldüğü gibi çarpma enerjisi en düşük olan H-F-E1 numunesinde boyuna donatılara oranla enine donatılarda ölçülen deformasyonlar daha büyüktür (Şekil 6.10. b) ve oluşan kesme çatlakları da belirgin bir şekilde bu davranışı doğrulamaktadır. Bununla birlikte çarpma enerjisi arttıkça kesme davranışı temsil eden kesme çatlakları artarken eğilme

numunelerde eğilme hâkim davranış görülmüştür. H-F-E2 ve H-F-E3 numunelerinde enine donatılardaki deformasyonlar ve kesme çatlakları belirgin bir şekilde artmıştır. Ayrıca bu numunelerdeki basınç donatıları akma değerlerine çekme donatıları ise akma değerlerini aşarak büyük uzama miktarlarına ulaşmıştır. Betonarme yüksek dayanımlı numunelere ait orta nokta yerdeğiştirmesini temsil eden (Δ_{maks} ve $\Delta_{kalıcı}$)'nın (mm) zamana (milisaniye-ms) değişimini ve tüm donatılardaki (kayma, çekme ve basınç donatıları) birim şekildeğiştirmelerin (ϵ_{maks} ve $\epsilon_{kalıcı}$) zamana bağlı değişimi Şekil 6.10.'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Eğilme numunelerinde oluşan yerdeğiştirme-zaman ve şekildeğiştirme-zaman ilişkileri

Şekil 6.10.'dan da görüldüğü gibi H-F-E2 numunesine ait kayma donatısındaki gerinim pulları koptuğundan bu donatılara ait şekildeğiştirme ölçümleri yapılamamıştır. Eğilme serisine ait tüm deney sonuçları Tablo 6.7.'de özetlenmiştir.

Yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunelerindeki kesme hasarı ise çapraz şekilde yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre eğilme serisine ait numunelerde artan çarpma enerjisiyle eğilme hâkim davranış görülmüş olsa bile kesme çatlakları genişlikleri artmıştır.

Tablo 6.7. Eğilme serisine ait çarpma deneyi sonuçları

Numune Adı	Maks. Çarp. Kuv. (kN)	Maks. Baş. İvme (g)	Maks. İvme (g)	Maks. Mes. Reak. (kN)	Maks. Deplas. (mm)	Maks. (ε) Çekme Donatısı	Maks. Çatlak Gen. (mm)	Maks. (ε) Kayma Donatısı
H-F-E1	1113,2	315,13	480,46	380,28	15,07	0,0063	0,26	0,0088
H-F-E2	2282,4	646,28	959,76	413,75	19,98	0,0169	0,47	-*
H-F-E3	-*	-*	82,81	87,02	49,36	0,0424	0,52	0,04451

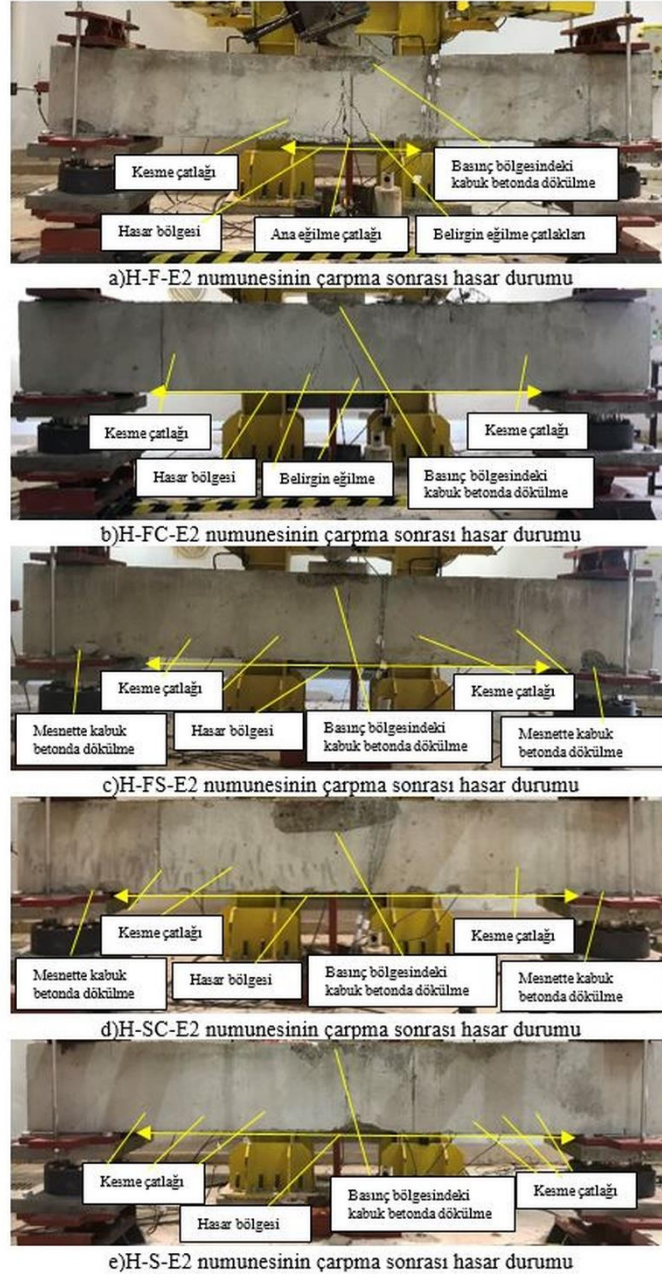
*: Deneyler esnasında kabloların kopması, kısa devre vb. nedenler ile veri alınamadı

6.3.2. Kritik (Geçiş) deney serisine ait çarpma deney sonuçları (E_i sabit, ρ_l değişken)

Çarpma deneyleri sırasıyla H-F-E2, H-FC-E2, H-FS-E2, H-SC-E2, H-S-E2 isimli numunelere sabit 3m yükseklikten 360 kg'lık kütle serbest düşme yaptırılarak tamamlanmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları ivme-zaman, kuvvet-zaman ve yerdeğiştirme-zaman parametreleri incelenerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişlerde oluşan kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki deformasyonların ölçümleri de incelenmiştir. Çarpma etkileri sonrasında oluşan betonarme kirişlere ait hasar durumları Şekil 6.11.'de verilmiştir.

Çarpma deneyleri sırasında H-F-E2 ve H-FC-E2 kirişlerinde eğilme, H-S-E2 ve H-SC-E2 kirişlerinde ise kesme davranışı tasarıma uygun şekilde gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kesmeli eğilme olarak adlandırılan H-FS-E2 kirişi statik testlerin aksine çarpma testlerinde kesme davranışı göstermiştir. Bu numunede, çarpma testlerinde eğilme çatlakları oluşmamıştır. Betonarme numunelerde boyuna donatı oranının artmasıyla eğilmeden kesme doğru eğilim gösteren davranış hâkim olmuştur. Kesme davranışının daha belirgin hale gelmesiyle eğilme çatlakları oluşmadan kesme çatlakları oluşmuş ve donatı oranının artmasıyla kesme çatlak genişlikleri artmıştır. Numunelerdeki hasarın olduğu bölgenin uzunlukları karşılaştırıldığında, H-F-E2 numunesindeki hasarın diğer numunelere göre çok daha kısa bir bölgeye yayıldığı görülmüştür. Diğer numunelerde oluşan net kesme çatlakları mesnet iç yüzünden mesnet iç yüzeyine kadar olan bölgede olduğundan, hasar bölge uzunlukları kiriş net açıklığına eşit olmuştur. Eğilme numunelerinin aksine kesme davranışı gösteren

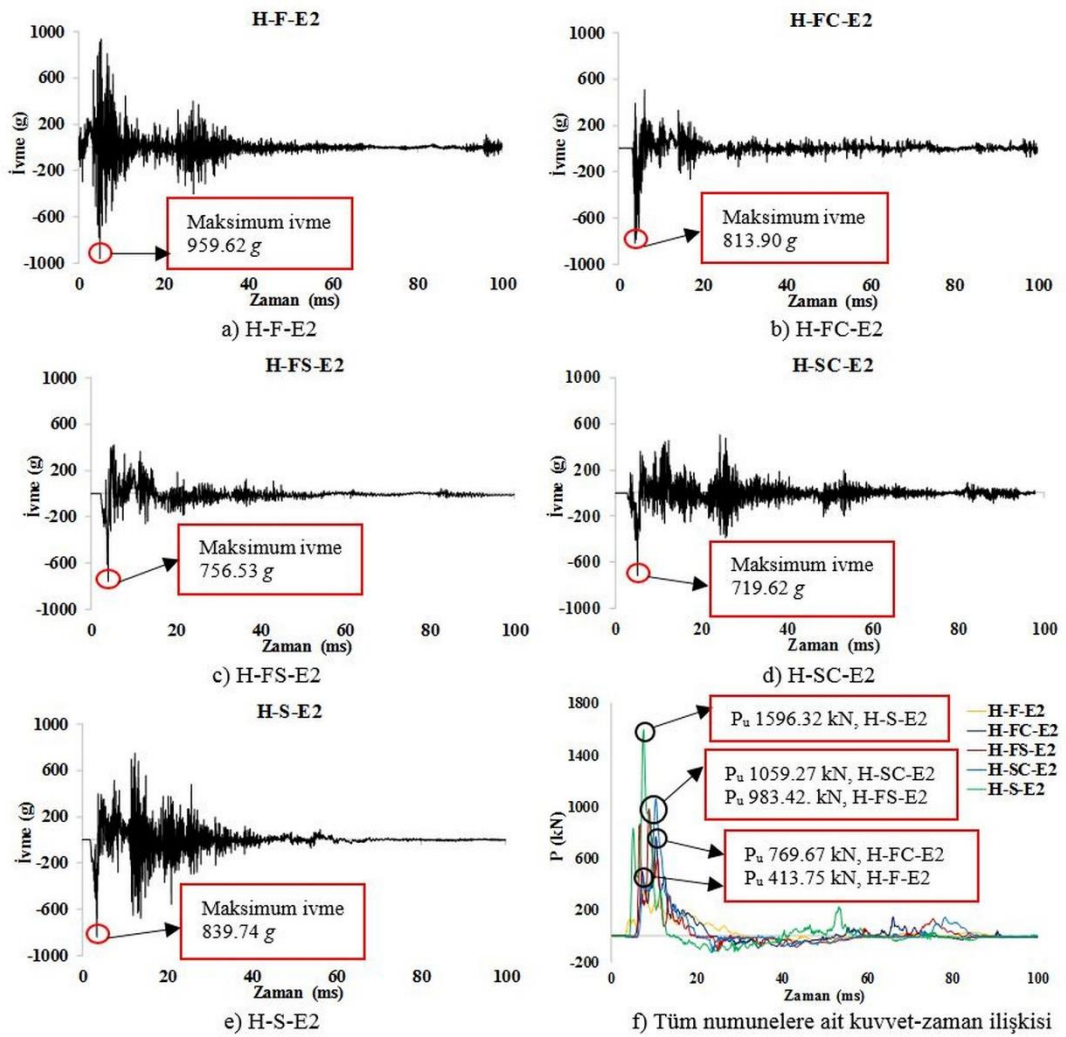
numunelerde oluşan kesme hasarları lokalize olmamıştır. Ayrıca H-F-E2 ve H-FC-E2 kirişlerinde eğilme hâkim davranışın yanında kesme davranışı da gözlemlenmiştir.



Şekil 6.11. Ara deney serisine ait değişen çarpma enerjisine bağlı hasar durumları

Tüm numunelerdeki beton basınç bölgesinde, çarpma yükünün uygulandığı noktada lokal hasarlar gözlemlenmiştir. Bu hasarlar kiriş ön yüzeyinde kabuk betonda dökülme olarak görülmüş ve kiriş arkada yüzeyinde oluşmamıştır. Bu hasarlara ek olarak H-FS-E2 ve H-SC-E2 kirişlerinde mesnet bölgelerinde kabuk betonda bazı dökülmeler

gözlemlenmiştir. Bu hasarların numune imalat aşamasında kalıp ve beton işçiliğinden kaynaklanan ve numune alt yüzeyinde oluşan pürüzlerden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Deney numuneleri olarak hazırlanan yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin gövdesinde orta noktadan (yükün uygulandığı nokta) ivme ölçümü alınmıştır. Her bir deney numunesi için ± 5000 g kapasiteli ICP tipi şok ivmeölçerler kullanılarak yapılan deneylerde 0-100 ms aralığında ölçüm değerlendirilmiştir. Deneylerde karşılaştırma yapılmak üzere oluşturulan deney serilerinde değişken sonuçlar görülmüştür. Bu seri numunelerine ait ivme ölçümleri Şekil 6.12.'de verilmiştir.

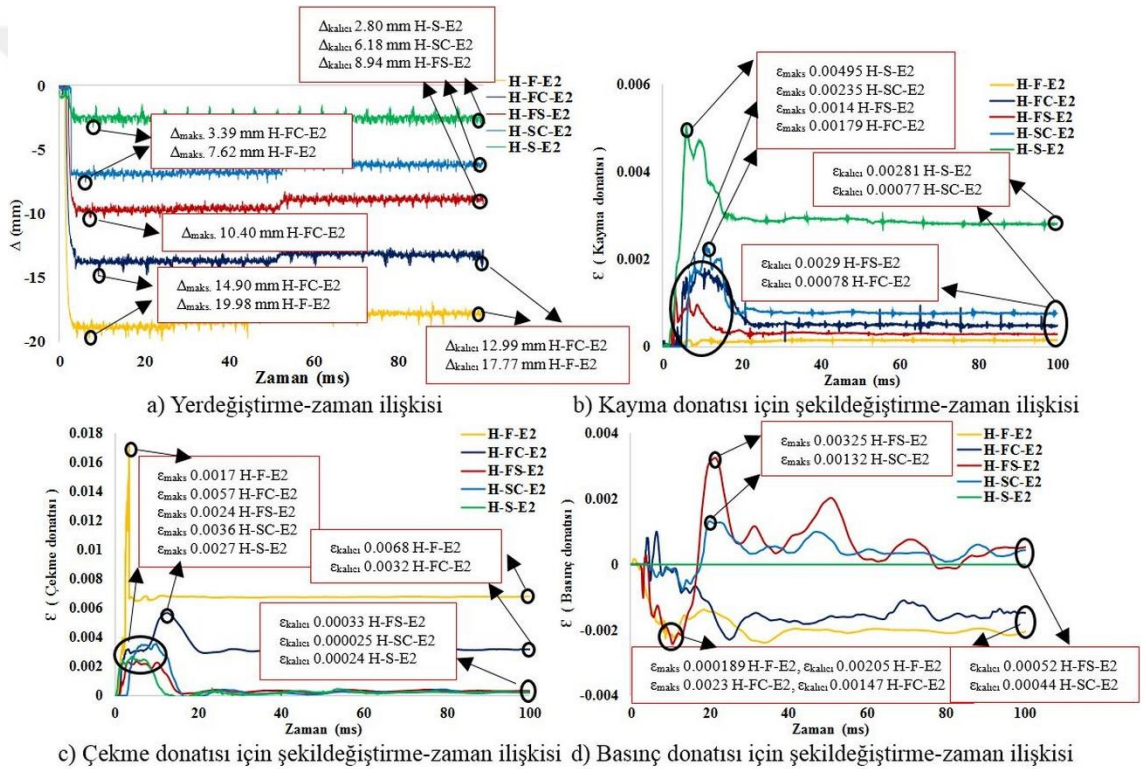


Şekil 6.12. Kritik seriye ait numunelerde oluşan ivme-zaman ve kuvvet-zaman ilişkileri

Ara deney serisinde oluşan maksimum ivmeler (g) sırası ile zamana (milisaniye-ms) bağlı olarak H-F-E2, H-FC-E2, H-FS-E2, H-SC-E2 ve H-S-E2 numuneleri için

959,76, 813,90, 756,53, 719,62 ve 839,74 g'dir. Bu sonuçlara bakıldığında çarpma hızı sabit kütle ve çarpma enerjisi ile gerçekleşen deneylerde betonarme numunelerdeki ivmeler betonarme davranış eğilmeden kesmeye doğru değiştikçe azalış göstermiştir. H-FS-E2'den sonraki kesme numunelerinden sadece H-S-E2 numunesinde oluşan ivme belirgin düzeyde artış gözlemlenmiştir. H-SC-E2 ivme azalışı ise beton basınç bölgesinde oluşan lokal hasar ile açıklanabilir. Çarpma, darbe veya patlama gibi anlık impuls etkileri katı cisimlerde oluşan gerilmelerin dalgalar halinde yayılması ilerlemektedir. Bu gerilme dalgaların yayılması katı cisim üzerinde herhangi bir süreksizlik meydana gelmediği sürece devam eder. Ancak katı cisim üzerinde herhangi bir noktada oluşan süreksizlik (çatlak vb.) gerilme dalgalarının cisim üzerindeki herhangi bir noktaya ulaşmasını geciktirebilir veya tamamen engelleyebilmektedir. Böylece gerilme dalgaları veya gerçekleşen titreşimler oluşan bu süreksizlik ile sönümlenebilir veya cisim üzerindeki bazı noktalara ulaşamayabilir. Betonarme kiriş elemanlarında çarpma deneylerinde elde edilen ivme değerleri bu seride değişkenlik göstermiştir. Betonarme kirişlerde oluşan gerilme dağılımının ve titreşimlerin, kesme veya eğilme çatlakları, kabuk betonda dökülme ve lokal hasar gibi nedenlerle ivmeölçerlere tam ulaşmadığı düşünülmektedir. Bu nedenle ivme değerlerinde farklılıklar bu hasar tiplerinin değişkenliği ile açıklanabilir. Bu konuda genel bir sonuca ulaşabilmek için betonarme kiriş üzerindeki birden fazla farklı noktadan ivme ölçümü yapılması gerekmektedir. Bu durum literatürde benzer deneyleri yapan bazı araştırmacıların da tespit ettiği önemli sonuçlardan biridir (Costovos ve ark., 2008; Cotsovos 2010). Betonarme kirişlerde çekme bölgesindeki boyuna donatının artışı ile kiriş rijitlikleri artmıştır. Bu artışa bağlı olarak mesnet reaksiyonları da doğru orantılı şekilde artış göstermiştir. Betonarme kiriş numunelerinde davranış eğilmeden kesmeye doğru değiştikçe daha büyük mesnet reaksiyonları elde edilmiştir. Şekil 6.12. f'de sabit ve hareketli mesnetlerin toplamını ifade eden (P_u)'nin (kN) zamana (milisaniye-ms) bağlı değişimi kuvvet-zaman ilişkisi olarak gösterilmiştir. Deney numunelerinin orta noktasındaki düşey yerdeğiştirme değerleri sabit çarpma enerjisi altında numune rijitliğinin artması ile (çekme donatısının artması) ters orantılı olacak şekilde azalmıştır. Bununla birlikte oluşan bu maksimum yerdeğiştirme değerleri ile kalıcı yerdeğiştirme değerleri arasındaki fark betonarme kirişlerin rijitliği arttıkça azalmıştır (Şekil 6.13. a). Deney numuneleri (H-F-E2, H-FC-E2, H-FS-E2) statik

yüklemeye altında eğilme davranışı göstermesine rağmen çarpma gibi sınırlı zaman aralığında gerçekleşen dinamik etkiler altında eğilme davranışının yanında kesme davranışı da gösterebilmektedir. Tablo 6.8. ve Şekil 6.13. b'den açıkça görüldüğü gibi sabit çarpma enerjisi altında enine donatılarda kalıcı deformasyonlar görülmüştür. Enine donatılardaki kalıcı deformasyonlar sadece H-S-E2 numunesinde akma şekildeğiştirme sınırını aşmıştır. Ayrıca oluşan kesme çatlakları ve bu çatlaklara ait genişliklerin boyuna donatı oranının artmasıyla değişimi de bu davranışı doğrulamaktadır. Bununla birlikte çekme donatılarındaki maksimum ve kalıcı şekildeğiştirmeler boyuna donatı oranı ile ters orantılıdır.



Şekil 6.13. Kritik seriye ait numunelerde oluşan yerdeğiştirme-zaman ve şekildeğiştirme-zaman ilişkileri

Betonarme kirişlerdeki boyuna donatı arttıkça (rijitlik arttıkça) çekme donatısındaki maksimum ve kalıcı şekildeğiştirmeler azalmıştır (Şekil 6.13. c). Bu durum kirişlerdeki boyuna donatının artışının sebep olduğu kesme davranışı ile açıklanmaktadır. Ayrıca bu numunelerdeki basınç donatılarında oluşan maksimum şekildeğiştirmeler akma şekildeğiştirme değerlerini aşmış ancak kalıcı şekildeğiştirmeler bu sınırın altında kalmıştır (Şekil 6.13. d). Betonarme yüksek

dayanımlı numunelere ait orta nokta yerdeğiştirmesini temsil eden (Δ_{maks} ve $\Delta_{kalıcı}$)’nın (mm) zamana (milisaniye-ms) değişimini ve tüm donatılardaki (kayma, çekme ve basınç donatıları) birim şekildeğiştirmelerin (ϵ_{maks} ve $\epsilon_{kalıcı}$) zamana bağlı değişimi şekil 6.13.’te ayrıntılı olarak gösterilmiştir. şekil 6.13. d’den de görüldüğü gibi H-S-E2 numunesine ait basınç donatılarındaki gerinim pulları koptuğundan bu donatılara ait şekildeğiştirme ölçümleri yapılamamıştır. Yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunelerindeki kesme hasarı ise çapraz şekilde yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla kontrol edilmiştir. Kesme hasarı (çatlakları) eğilme numuneleri de dâhil olmak üzere tüm deney numunelerinde görülmüş ve sabit çarpma enerjisi altında boyuna donatının artmasıyla belirgin hale gelmiştir. Bu durum kesme çatlak genişliklerin artması olarak gözlemlenmiştir. Kesme çatlak genişliklerine ait ölçümler ve bu seriye ait tüm deney sonuçları Tablo 6.8.’de özetlenmiştir.

Tablo 6.8. Kritik seriye ait çarpma deneyi sonuçları

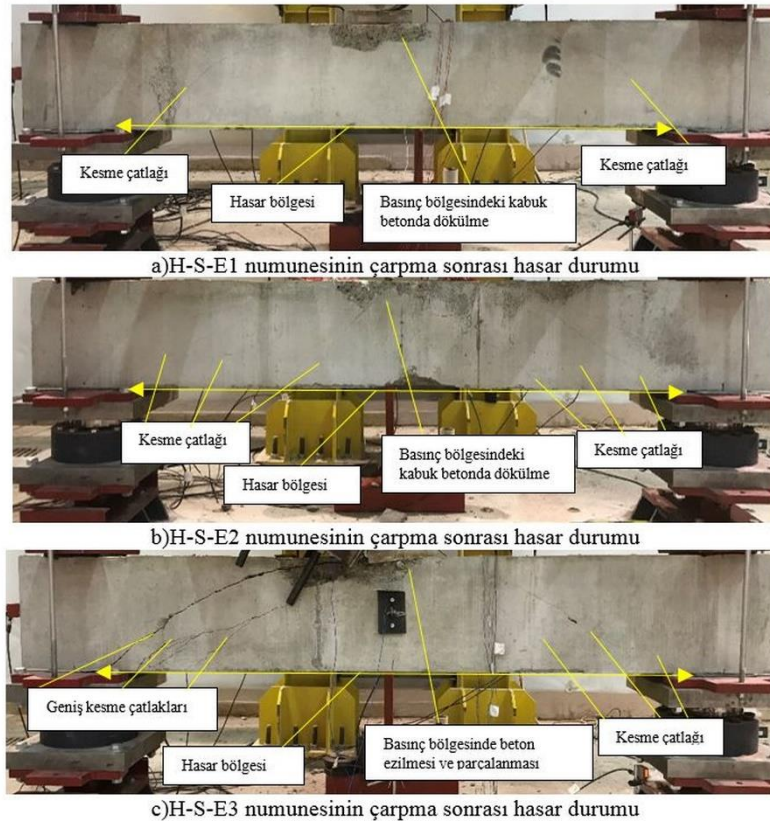
Numune Adı	Maks. Çarp. Kuv. (kN)	Maks. Baş. İvme (g)	Maks. İvme (g)	Maks. Mes. Reak. (kN)	Maks. Deplas. (mm)	Maks. (ε) Çekme Donatısı	Maks. Çatlak Gen. (mm)	Maks. (ε) Kayma Donatısı
H-F-E2	2282,4	646,28	959,76	413,75	19,98	0,0169	0,47	-*
H-FC-E2	2376,1	672,8	813,90	769,67	14,90	0,0057	0,62	0,0018
H-FS-E2	2378,2	673,42	756,53	983,42	10,40	0,0024	1,57	0,0014
H-SC-E2	2350,7	665,63	719,62	1059,27	7,62	0,0036	2,37	0,0024
H-S-E2	2634,2	745,9	839,74	1596,32	3,39	0,0027	3,08	0,0049

*: Deneyler esnasında kabloların kopması, kısa devre vb. nedenler ile veri alınamadı

6.3.3. Kesme deney serisine ait çarpma deney sonuçları (ρ_l sabit, E_i değişken)

Çarpma deneyleri sırasıyla H-S-E1, H-S-E2 ve H-S-E3 isimli numunelere sabit 3m yükseklikten 240 kg, 360 kg ve 480 kg’lık kütleler serbest düşme yaptırılarak tamamlanmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları ivme-zaman, kuvvet-zaman ve yerdeğiştirme-zaman parametreleri incelenerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişlerde oluşan kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki deformasyonların ölçümleri de incelenmiştir. Çarpma deneyleri sonrasında betonarme kirişlerde oluşan hasar durumları şekil 6.14.’te verilmiştir. Çarpma deneyleri sonrasında kesme davranışı göstermesi beklenen betonarme kiriş numunelerinde, tasarıma esas kesme davranışı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte betonarme numunelere etki eden çarpma

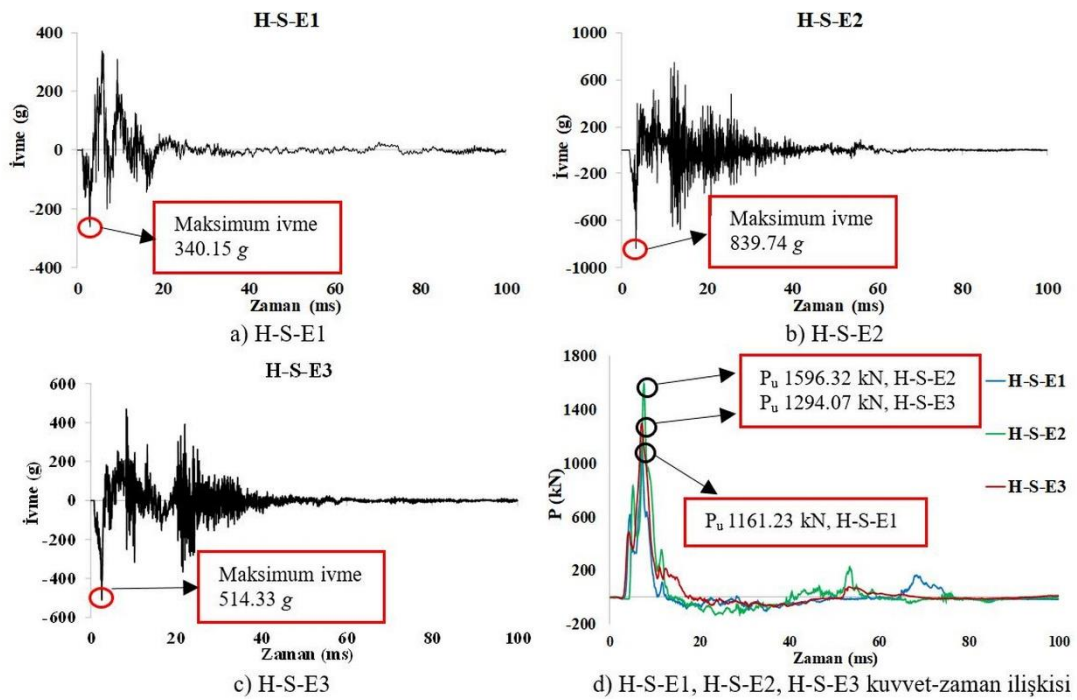
enerjisinin artmasıyla kesme çatlakları daha belirgin hale gelmiştir. Tüm numunelerde çarpma yükünün uygulandığı kiriş orta noktasından mesnet iç yüzeyine uzanan kesme çatlakları oluşmuştur. Böylelikle kesme hasarı kiriş net açıklığında görülmüştür. Numunelerdeki kesme hasarının olduğu bölgenin uzunluğu eğilme numunelerinin aksine çarpma enerjisi ile değişmemiştir. Bu sonuçla artan çarpma enerjisine bağlı olarak yüksek dayanımlı betonarme kesme numunelerindeki kesme hasarı, eğilme kirişlerindeki hasarın aksine lokalize olmamıştır. Ayrıca numunelerdeki beton basınç bölgesi olan ve çarpma yükünün uygulandığı noktadaki lokal hasarlar uygulanan çarpma enerjisinin artmasıyla artmıştır.



Şekil 6.14. Kesme deney serisine ait değişen çarpma enerjisine bağlı hasar durumları

Deney numuneleri olarak hazırlanan yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin gövdesinde orta noktadan (yükün uygulandığı nokta) ivme ölçümü alınmıştır. Her bir deney numunesi için ± 5000 g kapasiteli ICP tipi şok ivmeölçerler kullanılarak yapılan deneylerde 0-100 ms aralığında ölçüm değerlendirilmiştir. Deneylerde karşılaştırma yapılmak üzere oluşturulan deney serilerinde değişken sonuçlar

görülmüştür. Kesme numunelerine için ivme ölçümleri Şekil 6.15.'te verilmiştir. Kesme deney serisinde oluşan maksimum ivmeler (g) sırası ile zamana (milisaniye-ms) bağlı olarak H-S-E1, H-S-E2 ve H-S-E3 numuneleri için 340,15, 839,74 ve 514,33 g'dir. Bu sonuçlara bakıldığında çarpma hızı sabit, kütle artışı ile gerçekleşen çarpma enerjisi altında betonarme numunelerdeki ivmeler artış gösteriyor. Ancak H-S-E3 ivme belirgin düzeyde azalış göstermiştir. H-S-E2 ile H-S-E1 numunesi ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 2,5 kat civarında ivme değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir.

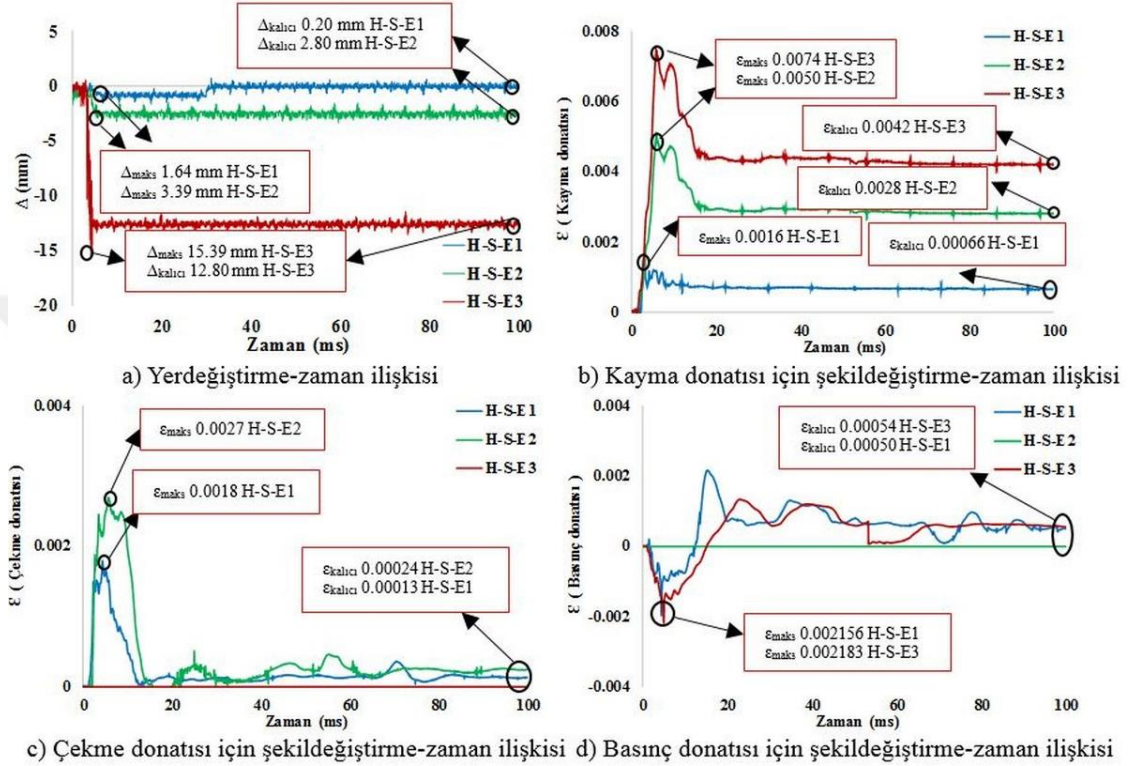


Şekil 6.15. Kesme numunelerinde oluşan ivme-zaman ve kuvvet-zaman ilişkileri

Bununla birlikte, H-S-E3 numunesine daha büyük çarpma enerjisi uygulanmasına rağmen ivme değerlerinde belirgin bir şekilde azalma olduğu görülmüştür. Çarpma enerjisinin büyümesi ile H-S-E3 kirişinde kesme hasarı artmış kirişin mesnete oturduğu noktaya kadar uzanan geniş kesme çatlakları gözlemlenmiştir. Bu nedenle mesnet reaksiyonları da ivmeler ile benzer şekilde H-S-E3 numunesinde önemli derecede azalmıştır. Şekil 6.15. d'de sabit ve hareketli mesnetlerin toplamını ifade eden (P_u)'nin (kN) zamana (milisaniye-ms) bağlı değişimi kuvvet-zaman ilişkisi olarak gösterilmiştir. Diğer numune serilerinde olduğu gibi kesme serisine ait H-S-E3

numunesinde oluşan hasarın ivme ve kuvvet değerlerini doğrudan etkilediği ve bu değerlerdeki beklenmeyen azalışların hasardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çarpma, darbe veya patlama gibi anlık impuls etkileri katı cisimlerde oluşan gerilmelerin dalgalar halinde yayılması ilerlemektedir. Bu gerilme dalgaların yayılması katı cisim üzerinde herhangi bir süreksizlik meydana gelmediği sürece devam eder. Ancak katı cisim üzerinde herhangi bir noktada oluşan süreksizlik (çatlak vb.) gerilme dalgalarının cisim üzerindeki herhangi bir noktaya ulaşmasını geciktirebilir veya tamamen engelleyebilmektedir. Böylece gerilme dalgaları veya gerçekleşen titreşimler oluşan bu süreksizlik ile sönümlenebilir veya cisim üzerindeki bazı noktalara ulaşamayabilir. Betonarme kiriş gövdesinde ölçüm noktasına yakın noktalarda oluşan hasarlar (beton basınç bölgesinde lokal hasar, orta noktada eğilme çatlakları, orta noktadan mesnete uzanan kesme hasarı gibi) ivme ve mesnet reaksiyonu değerlerindeki beklenmeyen azalmalara sebep olmuştur. Ölçüm için gerekli titreşimlerin ve gerilme dalgalarının eleman üzerinde hasar oluştuktan sonra ölçüm noktalarına ulaşması bu duruma sebep olmaktadır. Bu nedenle ivme değerlerinde farklılıklar bu hasar tiplerinin değişkenliği ile açıklanabilir. Bu konuda genel bir sonuca ulaşabilmek için betonarme kiriş üzerindeki birden fazla farklı noktadan ivme ölçümü yapılması gerekmektedir. Bu durum literatürde benzer deneyleri yapan bazı araştırmacıların da tespit ettiği önemli sonuçlardan biridir (Costovos ve ark., 2008; Cotsovos 2010). Deney numunelerin orta noktasındaki düşey yerdeğiştirme değerleri çarpma enerjisinin artmasıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Betonarme yüksek dayanımlı numunelere ait orta nokta yerdeğiştirmesini temsil eden (Δ_{maks} ve $\Delta_{kalıcı}$)’nın (mm) zamana (milisaniye-ms) değişimini ve tüm donatılardaki (kayma, çekme ve basınç donatıları) birim şekildeğiştirmelerin (ϵ_{maks} ve $\epsilon_{kalıcı}$) zamana bağlı değişimi Şekil 6.16.’da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Yerdeğiştirme ve deformasyonlara ait sayısal değerler Tablo 6.9.’da verilmiştir. Maksimum yerdeğiştirme ve kalıcı yerdeğiştirme arasındaki fark uygulanan çarpma enerjisinin büyüklüğü ile doğru orantılı olacak şekilde artmıştır (Şekil 6.16. a). Tablo 6.9.’dan da açıkça görüldüğü gibi çarpma enerjisi en düşük olan H-S-E2 ve H-S-E3 numunelerinde boyuna donatılara oranla enine donatılarda ölçülen deformasyonlar daha büyüktür (Şekil 6.16. b) ve oluşan kesme çatlakları da belirgin bir şekilde bu davranışı doğrulamaktadır. Bununla birlikte kesme davranışı temsil eden kesme

çatlakları numune üzerine uygulanan çarpma enerjisi artmasıyla doğru orantılı şekilde genişlemiştir. H-S-E2 ve H-S-E3 numunelerinde enine donatılardaki deformasyonlar belirgin bir şekilde artmış ve kalıcı şekildeğiştirmeler akma sınırını üstünde sayısal değerlere ulaşmıştır.



Şekil 6.16. Kesme numunelerinde oluşan yerdeğiştirme-zaman ve şekildeğiştirme-zaman ilişkileri

Ancak bu numunelerdeki basınç ve çekme donatılarına ait maksimum şekildeğiştirmeler akma şekildeğiştirmesine ait sınır değerın üstünde ölçülmesine rağmen, kalıcı şekildeğiştirmeler akma değerlerinin çok altında kalmıştır (Şekil 6.16. c ve 6.16. d). Yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunelerindeki kesme hasarı ise çapraz şekilde yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla kontrol edilmiştir. Kesme çatlaklarına ait ölçümler ve kesme serisine ait tüm deney sonuçları Tablo 6.9.'da özetlenmiştir.

Tablo 6.9. Kesme serisine ait çarpma deney sonuçları

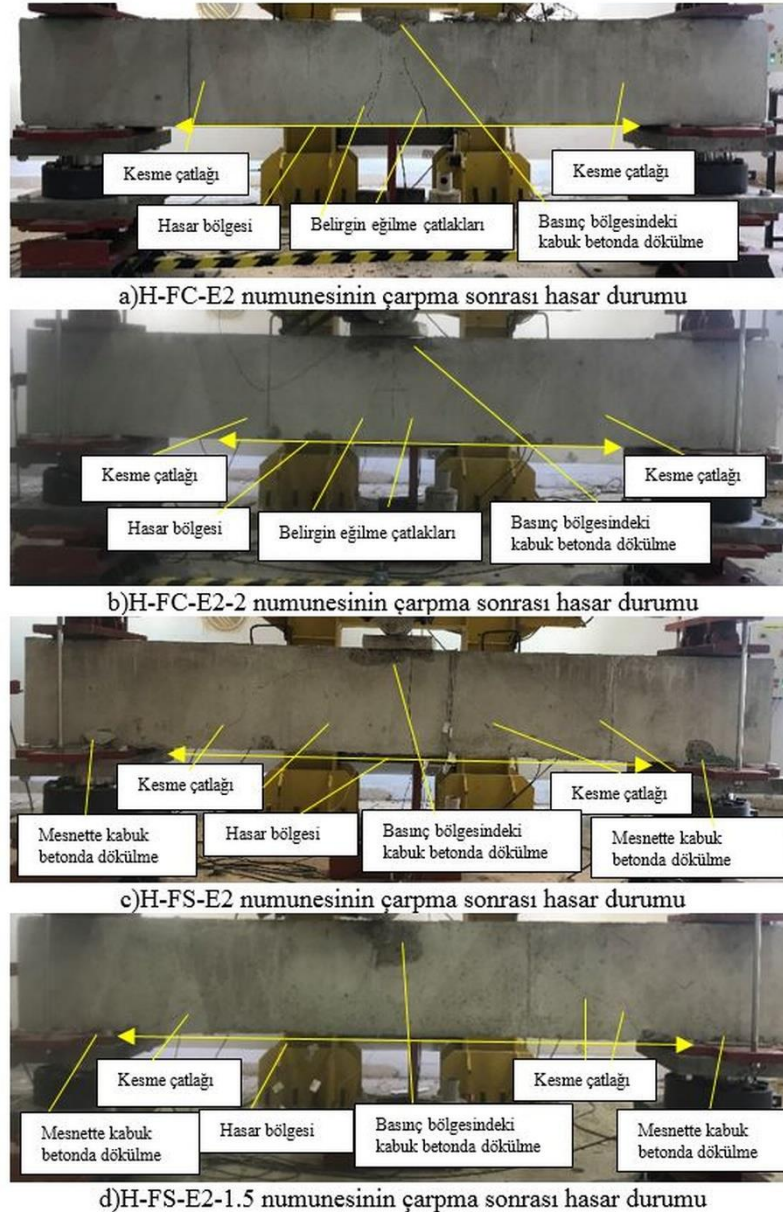
Numune Adı	Maks. Çarp. Kuv. (kN)	Maks. . Baş. İvme (g)	Maks. İvme (g)	Maks. Mes. Reak. (kN)	Maks. Deplas. (mm)	Maks. (ε) Çekme Donatısı	Maks. Çatlak Gen. (mm)	Maks. (ε) Kayma Donatısı
H-S-E1	2255,04	957,8	340,15	1161,23	1,64	0,0018	1,89	0,0016
H-S-E2	2634,22	745,9	839,74	1596,32	3,39	0,0027	3,08	0,0050
H-S-E3	2996,68	636,4	514,33	1294,07	15,49	-*	5,54	0,0074

*: Deneyler esnasında kabloların kopması, kısa devre vb. nedenler ile veri alınamadı

6.3.4. Kritik 2 (Farklı çarpma hızları V_i) deney serisine ait çarpma deney sonuçları (E_i ve V_i , ρ_l değişken)

Çarpma deneyleri sırasıyla, H-FC-E2, H-FC-E2-2, H-FS-E2, H-FS-E2-1.5 isimli numunelere sabit 360 kg'lık kütle 1,5 m, 2 m ve 3m yüksekliklerden serbest düşme yaptırılarak tamamlanmıştır. H-FC-E2 ve H-FS-E2 isimli numuneler kritik seride bulunan 3m yükseklikten 360 kg'lık kütle ile test edilen deney numuneleridir. Bu çalışma kapsamında oluşturulan deney matrisinde farklı çarpma enerjileri serbest kütle değiştirilerek elde edilmiştir. Bu çalışmaya ek olarak sabit kütle kullanılarak, çarpma hızlarının değiştirilmesi (serbest düşme yüksekliği değiştirilerek) ile değişen çarpma enerjilerinin de betonarme davranışa etkisi bu deney serisinde incelenmiştir. Deney numunelerinin sonunda bulunan 1,5 ve 2 gibi sayılar ise diğer numunelerde kullanılan 3m yükseklikten farklı olarak kullanılan serbest düşme yüksekliklerini ifade etmektedir. Bu serideki H-FC-E2, H-FC-E2-2, H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 isimli numuneler için Denklem 6.1 kullanılarak elde edilen çarpma hızları sırasıyla 7,67, 6,26, 7,67 ve 5,43 m/s; çarpma enerjileri sırasıyla 10,42, 7,06, 10,42 ve 5,30 kJ'dur. Deneysel çalışmanın sonuçları ivme-zaman, kuvvet-zaman ve yerdeğiştirme-zaman parametreleri incelenerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişlerde oluşan kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki deformasyonların ölçümleri de incelenmiştir. Çarpma etkileri sonrasında oluşan betonarme kirişlere ait hasar durumları Şekil 6.17.'de verilmiştir. Çarpma deneyleri sırasında H-FC-E2 ve H-FC-E2-2 kirişlerinde eğilme, H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 kirişlerinde ise kesme davranışı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kesmeli eğilme olarak adlandırılan H-FS-E2 kirişi statik testlerde eğilme davranışı göstermiş olmasına rağmen çarpma testlerinde eğilme hasarı oluşmadan tamamen kesme davranışı göstermiştir. Betonarme numunelerde

eğilme kritik olan H-FC-E2 ve H-FS-E2 numuneleri karşılaştırıldığında boyuna donatı oranının artmasıyla eğilmeden kesme doğru eğilim gösteren davranış hâkim olmuştur. Kesme davranışının daha belirgin hale gelmesiyle eğilme çatlakları oluşmadan kesme çatlakları oluşmuş ve donatı oranının artmasıyla kesme çatlak genişlikleri artmıştır.



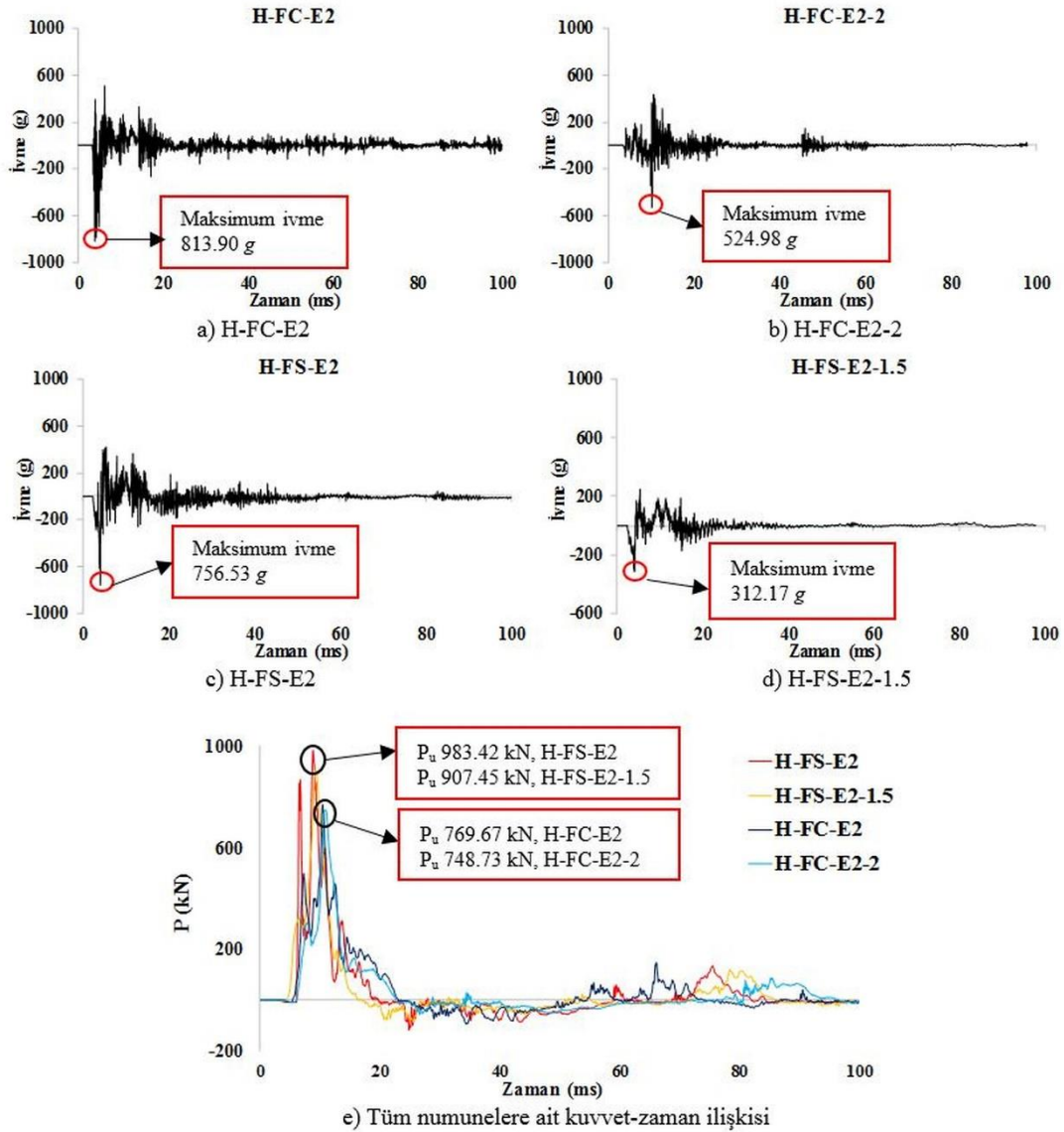
Şekil 6.17. Kritik deney serisine ait değişen çarpma enerjisine bağlı hasar durumları

Numunelerdeki serbest düşme yüksekliğinin azalmasıyla numune üzerine etkiye çarpma enerjisi azalmıştır. Deneylerdeki kesme ve eğilme hasarlarının olduğu bölgenin uzunlukları karşılaştırıldığında 3 m'lik serbest düşme yüksekliği ile test

edilen numunelere göre, H-FC-E2-2 numunesindeki hasarın diğer numunelere göre daha kısa bir bölgeye yayıldığı görülmüştür. Diğer numunelerde oluşan net kesme çatlakları mesnet iç yüzünden mesnet iç yüzeyine kadar olan bölgede oluştuğundan, hasar bölge uzunlukları kiriş net açıklığına eşit olmuştur. Eğilme numunelerinin aksine kesme davranışı gösteren numunelerde oluşan kesme hasarları lokalize olmamıştır. Ayrıca H-F-E2 ve H-FC-E2 kirişlerinde eğilme hâkim davranışın yanında kesme davranışı da gözlemlenmiştir. Tüm numunelerdeki beton basınç bölgesinde, çarpma yükünün uygulandığı noktada lokal hasarlar gözlemlenmiştir. Bu hasarlar kiriş ön yüzeyinde kabuk betonda dökülme olarak görülmüş ve kiriş arkada yüzeyinde oluşmamıştır. Bu hasarlara ek olarak H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 kirişlerinde mesnet bölgelerinde kabuk betonda bazı dökülmeler gözlemlenmiştir. Bu hasarların numune imalat aşamasında kalıp ve beton işçiliğinden kaynaklanan ve numune alt yüzeyinde oluşan pürüzlerden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Deney numuneleri olarak hazırlanan yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin gövdesinde orta noktadan (yükün uygulandığı nokta) ivme ölçümü alınmıştır. Her bir deney numunesi için ± 5000 g kapasiteli ICP tipi şok ivmeölçerler kullanılarak yapılan deneylerde 0-100 ms aralığında ölçüm değerlendirilmiştir. Deneylerde karşılaştırma yapılmak üzere oluşturulan deney serilerinde değişken sonuçlar görülmüştür. Bu seri numunelerine ait ivme ölçümleri Şekil 6.18.'de verilmiştir. Kritik 2 deney serisinde oluşan maksimum ivmeler (g) sırası ile zamana (milisaniye-ms) bağlı olarak H-FC-E2, H-FC-E2-2, H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 numuneleri için 813,90, 524,98, 756,53 ve 312,17 g'dir. Bu sonuçlara bakıldığında çarpma hızı ve enerjisi değişken ancak sabit kütle ile gerçekleşen deneylerde betonarme numunelerdeki ivmeler betonarme davranış eğilmeden kesmeye doğru değiştikçe azalış göstermiştir. Bununla birlikte vurma başlığına ait serbest düşme yüksekliği yani çarpma hızı azaldıkça betonarme kiriş numuneler üzerinde ölçülen ivme değerleri de azalmıştır. Bu seride kullanılan farklı çarpma yüksekliklerine bağlı olarak numuneler üzerinde uygulanan teorik çarpma hızları değişmiştir. Bu nedenle yüksek dayanımlı betonarme kirişler üzerindeki çarpma enerjileri de uygulanan çarpma hızıyla doğru orantılı olarak değişkenlik göstermiştir. Betonarme kirişlere uygulanan çarpma hızıyla doğru orantılı olarak değişen, sabit ve hareketli mesnetlerin toplamını ifade eden (P_u)'nin (kN)

zamana (milisaniye-ms) bağılı değişimi kuvvet-zaman ilişkisi Şekil 6.18. e’de gösterilmiştir. Betonarme kesmeli eğilme H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 numunelerinin rijitliği, eğilme kritik H-FC-E2 ve H-FC-E2-2 numunelere göre daha büyük olduğundan elde edilen mesnet reaksiyonları daha büyüktür.



Şekil 6.18. Kritik 2 seri numunelerinde oluşan ivme-zaman ve kuvvet-zaman ilişkileri

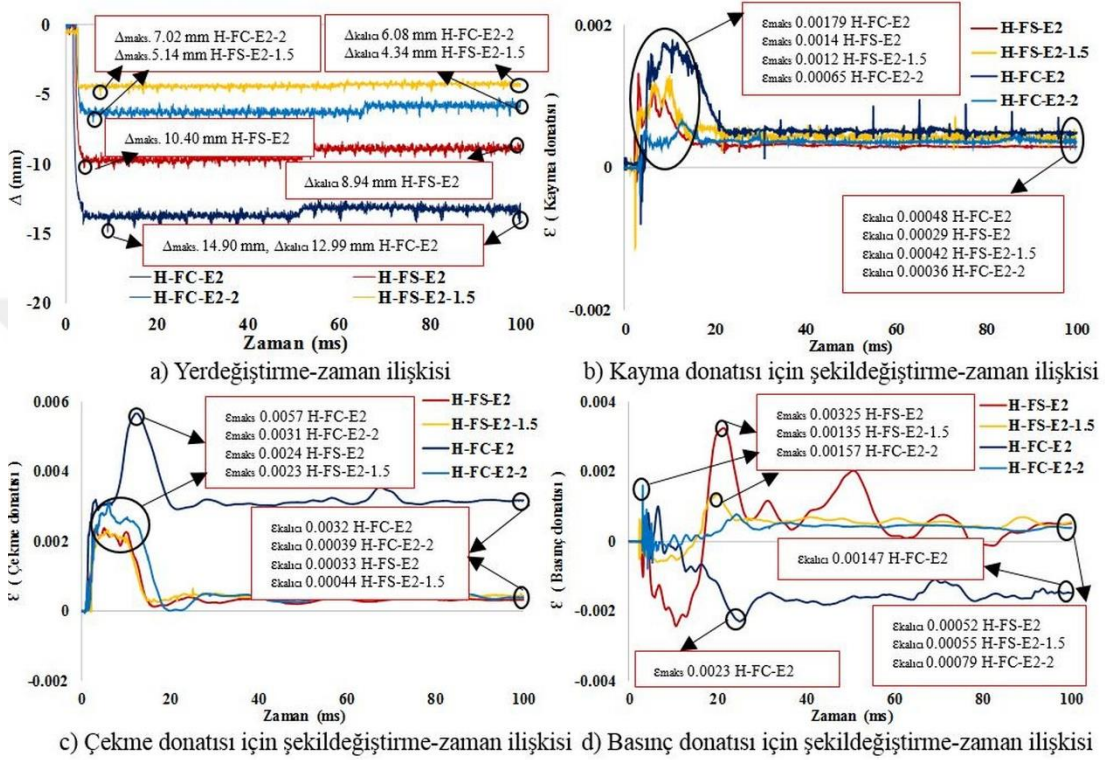
Bununla birlikte her iki grup numunede de serbest düşme yüksekliği azaldıkça mesnet reaksiyonları azalmıştır. Deney numunelerin orta noktasındaki düşey yerdeğiştirme değerleri sabit çarpma enerjisi altında numune rijitliğinin (H-FC-E2 ve H-FS-E2) artması ile (çekme donatısının artması) ters orantılı olacak şekilde azalmıştır. Bununla

birlikte vurma başlığına ait serbest düşme yüksekliği azaldıkça oluşan bu maksimum yerdeğiştirme değerleri her iki grup numunede de azalmıştır. Ayrıca maksimum yerdeğiştirme ile kalıcı yerdeğiştirme değerleri arasındaki fark betonarme kirişlerin rijitliği arttıkça azalmıştır (Şekil 6.19. a). Betonarme yüksek dayanımlı numunelere ait orta nokta yerdeğiştirmesini temsil eden Δ_{maks} ve $\Delta_{kalıcı}$ 'nın (mm) zamana (milisaniye-ms) değişimini ve tüm donatılardaki (kayma, çekme ve basınç donatıları) birim şekildeğiştirmelerin (ϵ_{maks} ve $\epsilon_{kalıcı}$) zamana bağlı değişimi Şekil 6.19.'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Deney numuneleri H-FC-E2 ve H-FC-E2-2 statik yükleme altında eğilme davranışı göstermesine rağmen çarpma gibi sınırlı zaman aralığında gerçekleşen dinamik etkiler altında eğilme davranışının yanında kesme davranışı da gösterebilmektedir. Bununla birlikte H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 numuneleri ise statik yükleme altında eğilme davranışı göstermesine rağmen çarpma testlerinde eğilme hasarı almada doğrudan kesme davranışı göstermiştir. Tablo 6.9. ve Şekil 6.19. b'den açıkça görüldüğü gibi sabit ve değişken çarpma enerjisi altında enine donatılarda kalıcı deformasyonlar görülmüştür. Ayrıca oluşan kesme çatlakları ve bu çatlaklara ait genişliklerin boyuna donatı oranının artmasıyla değişimi de bu davranışı doğrulamaktadır. Enine donatılardaki kalıcı deformasyonlar tüm numunelerde akma şekildeğiştirme sınırını aşmamıştır.

Bu serideki numunelerde çekme donatılarındaki maksimum ve kalıcı şekildeğiştirmeler boyuna donatı oranı ile ters orantılı olarak elde edilmiştir. Betonarme kirişlerdeki boyuna donatı arttıkça (rijitlik arttıkça) çekme donatısındaki maksimum ve kalıcı şekildeğiştirmeler azalmıştır (Şekil 6.19. c). Bu durum kirişlerdeki boyuna donatının artışının sebep olduğu kesme davranışı ile açıklanmaktadır. Ayrıca bu numunelerdeki basınç donatılarında oluşan maksimum şekildeğiştirmeler akma şekildeğiştirme değerlerini aşmış ancak kalıcı şekildeğiştirmeler bu sınırın altında kalmıştır (Şekil 6.19. d).

Yüksek dayanımlı betonarme kiriş numunelerindeki kesme hasarı ise çapraz şekilde yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla kontrol edilmiştir. Kesme hasarı (çatlakları) eğilme kritik numuneleri de dâhil olmak üzere tüm deney numunelerinde görülmüş ve sabit çarpma enerjisi altında boyuna donatının artmasıyla belirgin hale

gelmiştir. Bu durum kesme çatlak genişliklerinin artması olarak gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kesme çatlak genişlikleri numuneler üzerine etkiyen çarpma enerjisi azaldıkça azalmıştır. Kesme çatlak genişliklerine ait ölçümler ve bu seriye ait tüm deney sonuçları Tablo 6.10.'da özetlenmiştir.



Şekil 6.19. Eğilme numunelerinde oluşan yerdeğiştirme-zaman ve şekildeğiştirme-zaman ilişkileri

Tablo 6.10. Kritik 2 seriye ait çarpma deneyi sonuçları

Numune Adı	Maks. Çarp. Kuv. (kN)	Maks. Baş. İvme (g)	Maks. İvme (g)	Maks. Mes. Reak. (kN)	Maks. Deplas. (mm)	Maks. (ε) Çekme Donatı	Maks. Çatlak Gen. (mm)	Maks. (ε) Kayma Donatısı
H-FC-E2	2376,1	672,80	813,90	769,67	14,90	0,0057	0,62	0,0018
H-FC-E2-2	2029,2	574,58	524,98	748,73	7,02	0,0032	0,28	0,00065
H-FS-E2	2378,2	673,42	756,53	983,42	10,40	0,0024	1,57	0,0013
H-FS-E2-1.5	1964,8	556,33	312,17	907,45	5,14	0,0023	0,37	0,0012

Betonarme elemanlara ait yük taşıma kapasitesindeki bu değişim literatürde bazı katsayılar ve logaritmik fonksiyonlarla tanımlanmaktadır (Macneely ve Lash, 1963). Ancak dinamik dayanımı belirlemekte kullanılan, dinamik yük taşıma kapasitesinin statik yük taşıma kapasitesine oranı olarak tanımlanan dinamik büyütme çarpanı (Dynamic Increase Factor-DIF) literatürde en yaygın kullanılan ifadededir (Cotsovos,

2010; Satadru ve Fujikake, 2012; Adhikary, 2014). Tablo 6.11.'de statik ve dinamik (çarpma) yük taşıma kapasiteleri deneysel olarak belirlenmiş betonarme yüksek dayanımlı kirişlere ait dinamik büyütme çarpanları (DIF) gösterilmiştir.

Tablo 6.11. Çarpma deneylerine ait DIF ve $L_{effective}$ parametreleri

Seri adı (Parametre)	Davranış	Numune Adı	$P_{u,statik}$ (kN)	$P_{u,dinamik}$ (kN)	DIF	$L_{effective}$ (mm)
Eğilme (Enerji)	Eğilme	H-F-R	138	-	-	-
		H-F-E1		380,28	2,76	1200
		H-F-E2		413,75	2,99	750
		H-F-E3		87,02	0,63*	640
Kritik (Süneklik) ve (Enerji)	Eğilme Kritik	H-FC-R	286,3	-	-	-
		H-FC-E2		769,67	2,69	165
		H-FC-E2-2		748,73	2,62	148
	Kesmeli Eğilme	H-FS-R	477,78	-	-	-
		H-FS-E2		983,42	2,06	2200
		H-FS-E2-1.5		907,45	1,90	2200
	Kesme Kritik	H-SC-R	585,34	-	-	-
		H-SC-E2		1059,27	1,81	-
Kesme (Enerji)	Kesme	H-S-R	670,44	-	-	-
		H-S-E1		1161,23	1,73	2200
		H-S-E2		1596,32	2,38	2200
		H-S-E3		1294,07	1,93*	2200

*: Deneylerde hasara bağlı mesnet reaksiyonlarında azalma görüldü

Dinamik deneylerde oluşan kesme ve eğilme hasarlarının yoğunluğu ve bu hasarların oluştuğu bölgenin uzunluğu ($L_{effective}$, etkin hasar bölgesi uzunluğu) da bu çalışmada belirlenmiştir. Bu uzunluklar karşılaştırıldığında çarpma deneylerinde H-FS-E2 numunesinden itibaren davranışın kesme davranışı olarak ortaya çıkmasından dolayı, $L_{effective}$, etkin hasar bölgesi uzunluğu giriş net açıklığına (mesnet iç yüzeyinden mesnet iç yüzeyine) eşit olmuştur. Tablo 6.11.'de betonarme yüksek dayanımlı kirişlere ait kesme ve eğilme hasarlarının oluştuğu bölgelerin uzunlukları ($L_{effective}$) gösterilmiştir.

6.4. Eğilme (Statik) Deneyleri Sonuçları

Bu tez çalışmasında farklı çarpma etkilerine maruz kalmış betonarme kirişlerin kalıcı dayanımları ile betonarme davranışlarındaki değişim incelenmiştir. Bu çalışmada

incelenen yüksek dayanımlı betonarme kirişlerdeki çarpma deneyleri sonrasında oluşan kalıcı yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler Tablo 6.12.'de özetlenmiştir.

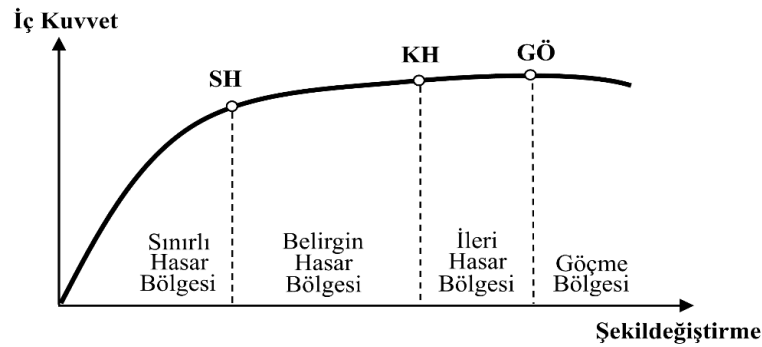
Tablo 6.12. Çarpma deneylerine ait kalıcı yer değiştirmeler ve şekil değiştirmeler

Seri adı (Parametre)	Davranış	Numune Adı	Kalıcı Yerdeğ. (mm)	Kalıcı Eğilme Çatlak Geniş. (mm)	Kalıcı Kesme Çatlak Geniş. (mm)	Donatılardaki Kalıcı Şekildeğiştirme (ϵ)		
						Çekme	Basınç	Kesme
Eğilme (Enerji)	Eğilme	H-F-R	-	-	-	-	-	-
		H-F-E1	11,74	4,6	0,26	0,0007	0,0020	0,0013
		H-F-E2	17,77	10,5	0,47	0,0068	0,0024	-*
		H-F-E3	47,74	43,2	0,52	0,0089	0,0024	0,0026
Kritik (Süneklik) ve (Enerji)	Eğilme Kritik	H-FC-R	-	-	-	-	-	-
		H-FC-E2	12,99	3,5	0,62	0,0032	0,0015	0,0005
		H-FC-E2-2	6,08	1,7	0,28	0,0004	0,0008	0,0004
	Kesmeli Eğilme	H-FS-R	-	-	-	-	-	-
		H-FS-E2	8,94	-	1,57	0,0003	0,0005	0,0003
		H-FS-E2-1.5	4,34	-	0,37	0,0004	0,0005	0,0004
Kesme (Enerji)	Kesme Kritik	H-SC-R	-	-	-	-	-	-
		H-SC-E2	6,18	-	2,37	0,0003	0,0004	0,0008
	Kesme	H-S-R	-	-	-	-	-	-
		H-S-E1	0,20	-	1,89	0,0001	0,0005	0,0007
		H-S-E2	2,80	-	3,08	0,0002	-*	0,0028
		H-S-E3	12,80	-	5,54	-*	0,0005	0,0042

*: Deneyler esnasında kabloların kopması, kısa devre vb. nedenler ile veri alınamadı

Farklı çarpma etkilerine maruz kalmış ve çarpma deney düzeneğinde test edilmiş yüksek dayanımlı betonarme kirişler daha sonra statik eğilme testi yapılarak davranışlarındaki değişimler belirlenmiştir. Çarpma etkilerine maruz kalmış betonarme kirişlerin davranışı, çarpma etkisine maruz kalmamış referans kiriş davranışı ile karşılaştırılmış ve kalıcı dayanımlar tespit edilmiştir. Bununla birlikte tüm kirişler için (referans ve çarpma etkisine maruz kalmış diğer kirişler) kuvvet-yerdeğiştirme, moment-dönme, yerdeğiştirme ve dönme sünekliği, boyuna ve enine donatılardaki şekildeğiştirmeler ile kirişler üzerinde oluşan kesme çatlak genişlikleri üzerinden yorumlar yapılmıştır. Bu çalışmada statik eğilme deneylerinde 3 noktalı yükleme tipi uygulanmıştır. Betonarme kirişlerde beton basınç bölgesinde hasarların kısmen sınırlı olması (kiriş ön yüzeyinde daha yoğun), beton basınç bölgesindeki hasar yoğunluğunun moment kolunu (manivela kolu) değiştirmemiş olması, diğer yükleme tipinde (4 noktalı yükleme) a/d değerinin değişecek olması gibi nedenlerle bu yükleme prosedürü tercih edilmiştir. Tablo 6.12.'den de görüldüğü gibi betonarme kirişlerde

çarpma etkisiyle ihmal edilemeyecek önemli yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler elde edilmiştir. Bu nedenle statik deneyler öncesinde çarpma etkisiyle oluşan betonarme kirişlerdeki kalıcı deformasyonların kiriş davranışına etkisi statik eğilme testleri ile araştırılmış ve önemli bulgular elde edilmiştir. Bununla birlikte yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin (referans ve çarpma etkisine maruz kalmış diğer kirişler) eğilme ve kesme davranışı bakımından güvenliği, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) ve ACI 318-14 gibi güncel yönetmeliklerdeki tasarım ilkeleri ve hasar sınırları ile karşılaştırılmıştır. TBDY 2018’de betonarme elemanlara ait doğrusal olmayan yapısal performansı belirlemek amacıyla bazı dönme sınırları tanımlanmıştır. Bu sınırlar betonarme yapısal elemanda oluşan dönme taleplerine bağlı olarak Göçmenin Önlenmesi (GÖ), Kontrollü Hasar (KH) ve Sınırlı Hasar (SH) olarak ifade edilmiştir. TBDY 2018’de tanımlanan performans seviyeleri betonarme elemanlarda oluşan iç kuvvet-şekildeğiştirme ilişkileri açıklanmaktadır. Betonarme elemanlardaki her bir farklı kesit türü için elemanlarda oluşan dönmeler ve şekildeğiştirmeler kontrol edilerek performans seviyeleri belirlenmektedir. Şekil 6.20.’de betonarme elemanlar için hasar iç kuvvet-şekildeğiştirmesine bağlı olarak tanımlanan sınırları ve bu sınırlar arasında kalan hasar bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 6.20. TBDY 2018’e göre hasar sınırları ve hasar bölgeleri

TBDY 2018’de tanımlanan hasar sınırları aşağıdaki Denklem 6.3, 6.4 ve 6.5 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemlerdeki ϕ_y ve ϕ_u (1/m) her bir farklı kesit için moment-eğrilik analizinden elde edilen akma ve maksimum eğriligi ifade etmektedir. Kirişler için moment-eğrilik değerleri deneysel olarak elde edilmiş malzeme dayanımları ile hesaplanmıştır. L_s kirişteki kesme açıklığı olarak tanımlanırken, kiriş net açıklığının yarısı olarak alınabilir. L_p yığılı plastisite kabulüne

göre belirlenen plastik mafsal boyudur ve kesit yüksekliğinin yarısı ($0,5h$) olarak kullanılmaktadır. Kirişlerde kullanılan çekme donatılarına ait ortalama donatı çapı ise d_b (m) ile temsil edilmektedir.

$$\theta_p^{G\ddot{O}} = \frac{2}{3} \left[(\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right] \quad (6.3)$$

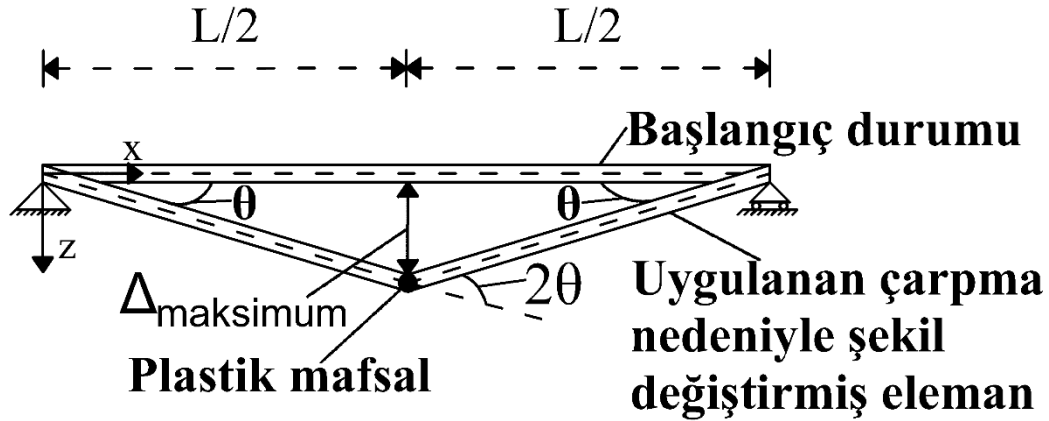
$$\theta_p^{KH} = 0.75 \theta_p^{G\ddot{O}} \quad (6.4)$$

$$\theta_p^{SH} = 0 \quad (6.5)$$

Bu denklemlerden hesaplanan sayısal değerler kirişlerde deneysel olarak elde edilen dönme değerleri ile karşılaştırılmış ve çarpma etkisine maruz kalmış betonarme elemanlardaki dönme talebinin değişimi incelenmiştir (Priestley, 1998 ve 2000). Deneysel çalışmadaki dönme değerleri kiriş orta noktasındaki ve sabit mesnet alt ucundaki yerdeğiştirme ölçerler arasındaki rölatif farkın, kiriş kesme açıklığına bölünmesi ile bulunmuştur. Elde edilen değer iki katı, kiriş Şekil 6.21.'deki kiriş geometrisine uygun şekilde dönme değeri olarak Denklem 6.6 ile hesaplanmıştır.

$$2\theta_{mesnet} = \theta_{orta\ nokta} \quad (6.6)$$

TBDY 2018'de kesme kuvvetine göre tasarım ve betonarme elemanların kesme güvenliğinin belirlenmesi için de bazı bağıntılar ifade edilmiştir. Bu bağıntılar ile tasarımı yapılan yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin deneysel olarak elde edilen kesme dayanımı TBDY 2018'deki teorik limit kesme dayanımı ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kirişlerin kesme dayanımı TBDY 2018 tanımlanan



Şekil 6.21. Deneysel dönme değerlerinin hesabını uygun kiriş geometrisi ve plastik mafsalsal kabulü (Gültop ve ark., 2015)

Denklem 6.7-6.11 ile hesaplanmıştır. Bu ifadelerdeki sırasıyla V_w ve V_{cr} , kiriş kesitinde bulunan kayma donatısının ve betonun kesme dayanımını temsil etmektedir. V_r ve V_{max} ise kiriş kesitinin mevcut beton dayanımı ve kayma donatısı göz önünde bulundurularak sahip olduğu kayma dayanımı ile taşıyabileceği maksimum kesme kuvvetini ifade etmektedir.

$$V_w = \frac{A_{sw} * f_{ywd} * d}{s} \quad (6.7)$$

$$V_{cr} = 0,65 * f_{ctd} * b_w * d \quad (6.8)$$

$$V_r = V_w + V_c \quad (6.9)$$

$$V_{max} = 0,22 * f_{cd} * b_w * d \quad (6.10)$$

$$f_{ctd} = 0,35 * \sqrt{f_{cd}} \quad (6.11)$$

Denklem 6.7'deki A_{sw} (mm^2) kesitteki etriye alanını, f_{ywd} (N/mm^2) etriyenin akma dayanımını, s (mm) etriye sıklığını ve d (mm) faydalı yüksekliği temsil etmekte kullanılır. Denklem 6.8 ve 6.9'da sırasıyla f_{cd} (N/mm^2), f_{ctd} (N/mm^2) ve $b_w * d$ (mm^2), betonun basınç ve çekme dayanımı ile etkin kesit alanını ifade etmektedir. Betonun

çekme dayanımının deneysel olarak belirlenemediği durumlarda f_{ctd} Denklem 6.11 ile teorik olarak hesaplanabilir.

Benzer şekilde ACI 318-14'te de betonarme elemanların kesme güvenliğini belirlemeye yönelik bazı formüller tanımlanmıştır. Bu formüller ile hesaplanan ACI 318-14'teki teorik limit kesme dayanımı, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin deneysel olarak elde edilen kesme dayanımı ile karşılaştırılmıştır. Denklem 6.12-6.15 kullanılarak elde edilen teorik kesme dayanımları için, V_s ve V_c , kiriş kesitindeki etriyenin ve betonun kesme dayanımını ifade ederken; V_n ve V_u , kiriş kesitindeki mevcut beton dayanımı ve kayma donatısı ile hesaplanan toplam ve maksimum kayma dayanımını temsil etmektedir. Denklem 6.12'deki A_y (mm^2) kesitteki etriye alanını, f_{yt} (N/mm^2) etriyenin akma dayanımını, s (mm) etriye sıklığını ve d (mm) faydalı yüksekliği temsil etmekte kullanılır. Denklem 6.13 ve 6.14'te sırasıyla f'_c (N/mm^2) ve $b_w * d$ (mm^2), betonun basınç dayanımı ile etkin kesit alanını ifade etmektedir. Betonun çekme dayanımının deneysel olarak belirlenemediği durumlarda $\sqrt{f'_c}$ ile teorik olarak hesaplanabilir. Bununla birlikte beton malzemesi ve kesme davranışı için malzemeye göre belirlenen λ ve Φ katsayıları sırasıyla 1,0 ve 0,75 olarak kabul edilebilir. Denklem 6.13 ve 6.15'teki 0,083 katsayısı ise SI-Metrik ve Kip-Inch birimleri arasındaki dönüşüm için kullanılmaktadır.

$$V_s = \frac{A_y * f_{yt} * d}{s} \quad (6.12)$$

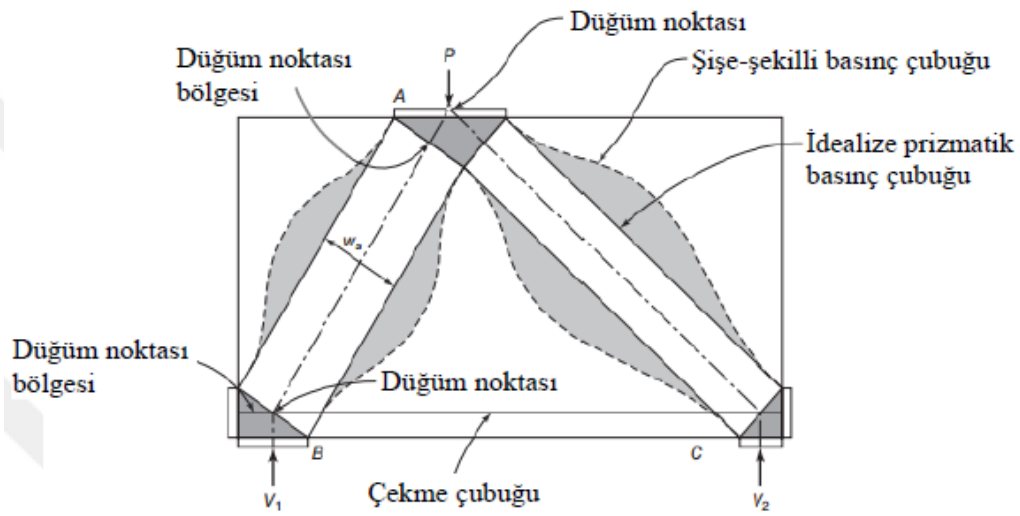
$$V_c = 2\lambda(0,083\sqrt{f'_c} * b_w * d) \quad (6.13)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (6.14)$$

$$V_u \leq \Phi(V_c + 8 * 0,083\sqrt{f'_c} * b_w * d) \quad (6.15)$$

Bununla birlikte ACI 318-14'te betonarme kirişlerin kesme davranışını temsil etmek için kullanılan “Strut and Tie” (STM) yöntemi de mevcuttur. Bu yöntemde betonarme kirişin kesme dayanımı üç farklı bileşenin sahip olduğu kesme dayanımlarının

süperpozisyonu ile bulunur. Bu yöntemle ait bileşenler sırasıyla çekme çubuğu, etriyeler arası beton basınç çubukları ve bu basınç çubuklarının başlangıç ve bitiş noktalarındaki düğüm noktalarıdır ve Şekil 6.22.'de gösterilmektedir. Her bir bileşen için kesme dayanımları ACI 318-14'te tanımlanan ve aşağıda açıklanan Denklem 6.16-6.21 ile hesaplanabilmektedir. Elde edilen kesme dayanımlarının toplamı için oluşturulan en elverişsiz durum betonarme kirişin kesme dayanımı kabul edilir. Bu çalışmadaki kirişlere ait kesme dayanımları TBDY 2018 ve ACI 318-14'te tanımlanan bağıntılarla ile ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 6.22. "Strut and Tie" (STM) modeli (Wight, 2016)

Denklemlerdeki f_{ce} beton basınç çubuklarının efektif dayanımını, f_y çekme çubuğunun ve f'_s basınç donatısının akma dayanımını ifade etmektedir. Beton basınç çubuklarının teorik efektif dayanımını f_{ce} Denklem 6.19 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu bağıntıdaki β_s ve f'_c sırasıyla ACI 318-14 farklı beton sınıfları için tanımlanan "strut" katsayısını ve beton basınç dayanımı ifade etmekte kullanılır. Denklem 6.16, 6.17 ve 6.18'deki A_{cs} , A'_s , A_{ts} ve A_{nz} sırasıyla kiriş kesit alanını, basınç donatısının alanını, çekme çubuğuna ait alanı ve düğüm noktasına ait yüzey alanını alanı temsil etmektedir. Denklem 6.17'deki $A_{tp} = 0$ ise öngermeli olarak tasarımı yapılmayan kirişler için sıfır alınmaktadır. Bu çalışmadaki yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin eğilme ve kesme davranışı incelenirken kirişlerin tasarımında kullanılan katsayılar ihmal edilerek deneysel olarak elde edilmiş malzeme dayanımları kullanılmıştır.

Böylelikle yönetmelikte verilen sınır değerler ve tasarım ilkeleri irdelenerek çarpma etkisine maruz kalmış kirişlerin kalıcı dayanımları ve betonarme davranışları üzerinden yorumlar yapılmıştır.

$$F_{ns} = f_{ce} * A_{cs} + A_s' * f_s' \quad (6.16)$$

$$F_{nt} = A_{ts} * f_y + A_{tp} * (f_{se} + \Delta f_y) \quad (6.17)$$

$$F_{nn} = f_{ce} * A_{nz} \quad (6.18)$$

$$f_{ce} = 0.85 * \beta_s * f_c' \quad (6.19)$$

$$F_{n1} = F_{ns} + F_{nt} \quad (6.20)$$

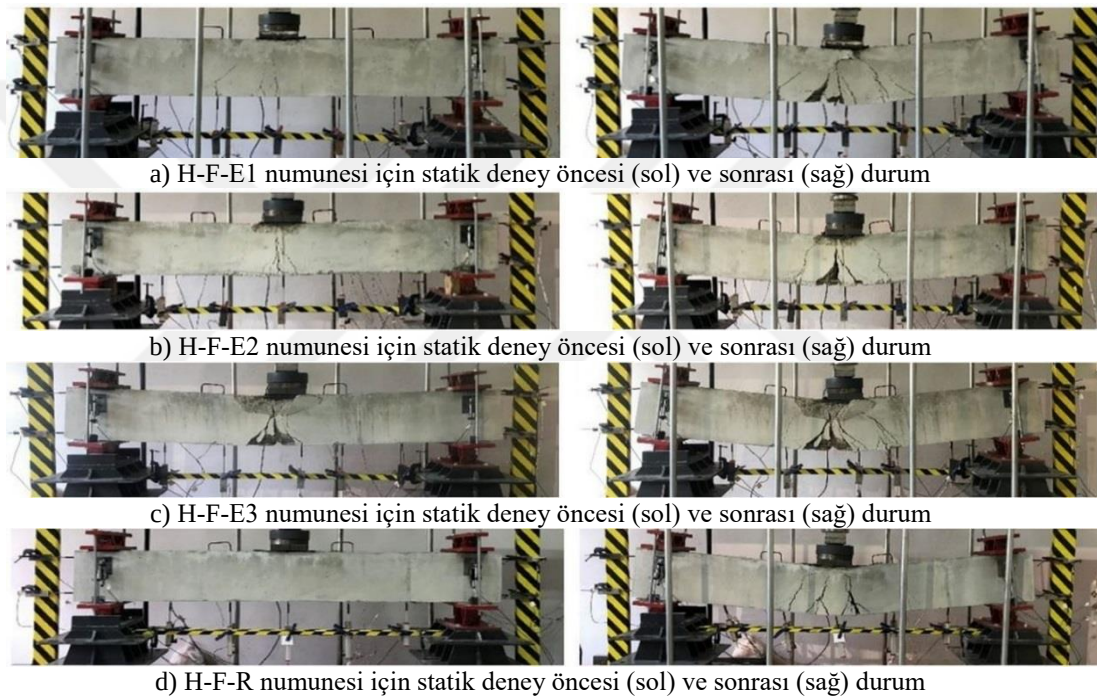
$$F_{n2} = F_{nn} + F_{nt} \quad (6.21)$$

Bununla birlikte çalışmanın sonunda betonarme kirişlerin hasar yoğunluğuna, kalıcı eğilme ve kesme dayanımlara, dönme ve süneklik kapasitelerine bağlı olarak onarım, güçlendirme veya yeniden imalat gibi önerilerde bulunulmuştur. Bu yönüyle bu çalışma literatürde tamamlanmış önceki çalışmalara ve çarpma gibi anlık impuls etkilerine karşı herhangi bir tasarım kuralının olmadığı mevcut yönetmeliklere önemli bir katkı sunmuştur.

6.4.1. Eğilme deney serisine ait statik eğilme deney sonuçları (ρ_l sabit, E_i değişken)

Bu serideki çarpma deneyleri sırasıyla H-F-E1, H-F-E2 ve H-F-E3 isimli numunelere sabit 3m yükseklikten 240 kg, 360 kg ve 480 kg'lık kütleler serbest düşme yaptırılarak tamamlanmıştır. Daha sonra bu numuneler ile statik eğilme testi yapılarak sonuçlar çarpma etkisine maruz kalmamış referans bir numuneye ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.23.'te eğilme serisindeki yüksek dayanımlı betonarme kirişlere ait statik eğilme deney öncesi ve sonrası durumlar gösterilmiştir. Şekil

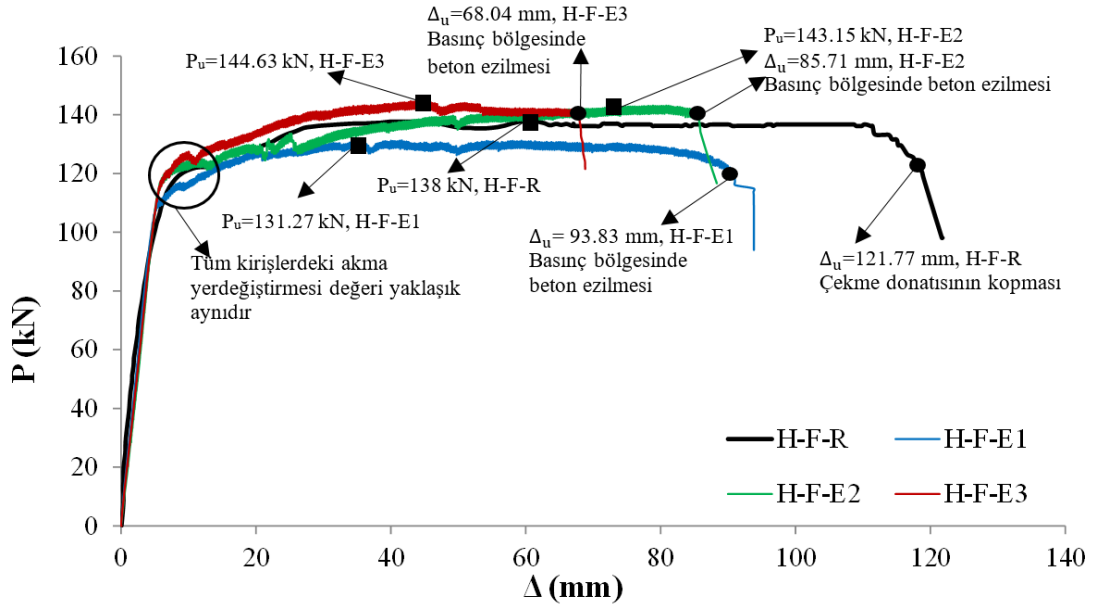
6.23.'ten de görüldüğü gibi bu serideki tüm kirişler eğilme hâkim davranış altında göçme durumuna ulaşmıştır. Ancak çarpma etkileri nedeniyle H-F-E1, H-F-E2 ve H-F-E3 kirişlerinde oluşan kesme çatlakları statik deneylerde daha belirgin hale gelmiştir. H-F-R numunesinde ise tasarıma uygun olarak sadece eğilme çatlakları görülmüş, kesme davranışına ait herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Deney sonuçları kuvvet-yerdeğiştirme, moment dönme, boyuna ve enine donatılardaki şekildeğiştirmeler ile kesme çatlak genişlikleri bakımından incelenmiştir. Bununla birlikte deney numunelerinde oluşan mesnet çökmeleri de kontrol edilmiştir.



Şekil 6.23. Eğilme numunelerinde statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları

Şekil 6.24.'te bu serideki kirişlere ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Deney sonuçları karşılaştırıldığında çarpma etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerin yerdeğiştirme kapasitesi önemli derecede azalmıştır. Yerdeğiştirme kapasitesindeki azalma, uygulanan çarpma enerjisinin büyümesiyle doğru orantılı olacak şekilde artmıştır. Bununla birlikte enerji yutma kapasitesi olarak daha önce tanımlanan ve yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilen E_d de uygulanan çarpma enerjisinin büyümesiyle azalmıştır. Süneklik özellik de yerdeğiştirme sünekliği bir süneklik katsayısı (μ_Δ) ile tanımlanmaktadır. Süneklik katsayısı yapıda veya yapısal

elemanda oluşan en büyük yerdeğiştirmenin (Δ_u) akma noktasındaki yerdeğiştirmeye (Δ_y , donatıların akma şekildeğiştirmesine ulaşarak kuvvetin sabit kaldığı yerdeğiştirme değeri) oranı olarak bilinmektedir. Bu seriye ait betonarme kirişlerdeki süneklik kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. Eğilme serisindeki süneklik kayıpları referans kiriş H-F-R'nin yerdeğiştirme kapasitesi ($\Delta_u = 121,77$ mm) ile karşılaştırıldığında, sırasıyla H-F-E1, H-F-E2 ve H-F-E3 isimli numuneler için %24,6 ($\Delta_u = 93,83$ mm), %31,9 ($\Delta_u = 85,71$ mm) ve % 44,4 ($\Delta_u = 68,04$ mm) olarak gözlemlenmiştir. Çarpma etkisine maruz kalmış ve kalmamış referans kirişe ait statik deney sonuçları Tablo 6.13.'te verilmiştir.



Şekil 6.24. Eğilme numunelerinde oluşan yük-yerdeğiştirme ilişkileri

Kirişlerde oluşan maksimum yerdeğiştirme miktarı azalırken, maksimum dayanım (P_u), akma yerdeğiştirmesi (Δ_y) ve kirişleri akma yerdeğiştirmesi değerine ulaştıran kuvvet değerlerinde (P_y) önemli bir değişiklik görülmemiştir. Ancak çarpma etkisine maruz kalmış kirişlerin rijitlikleri (K-çatlamış kesit etkin rijitlikleri) referans kirişin rijitliği (başlangıç, çatlamamış kesit rijitliği) ile karşılaştırıldığında, uygulanan çarpma enerjisinin artmasına bağlı olarak önemli derecede azalmıştır. Bu kirişlerin rijitliği referans kiriş H-F-R'nin rijitliği ($K = 31436$ kN/m) ile karşılaştırıldığında, sırasıyla H-F-E1, H-F-E2 ve H-F-E3 isimli numuneler için %26,9 ($K = 22971$ kN/m), %30,9 ($K = 21719$ kN/m) ve %31,1 ($K = 21659$ kN/m) olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.13. Eğilme deney serisindeki kirişlere ait statik eğilme deneyi sonuçları

Numune	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	μ_Δ	E_d (kN.m)	K (kN/m)	K'daki Azalış (%)
H-F-R	119,35	7,89	138	121,77	15,43	15,86	31436	-
H-F-E1	118,82	7,16	131,27	93,83	13,10	11,55	22971	26,9
H-F-E2	120	7,44	143,15	85,71	11,52	11,48	21719	30,9
H-F-E3	120,9	7,73	144,63	68,04	8,80	9,04	21659	31,1

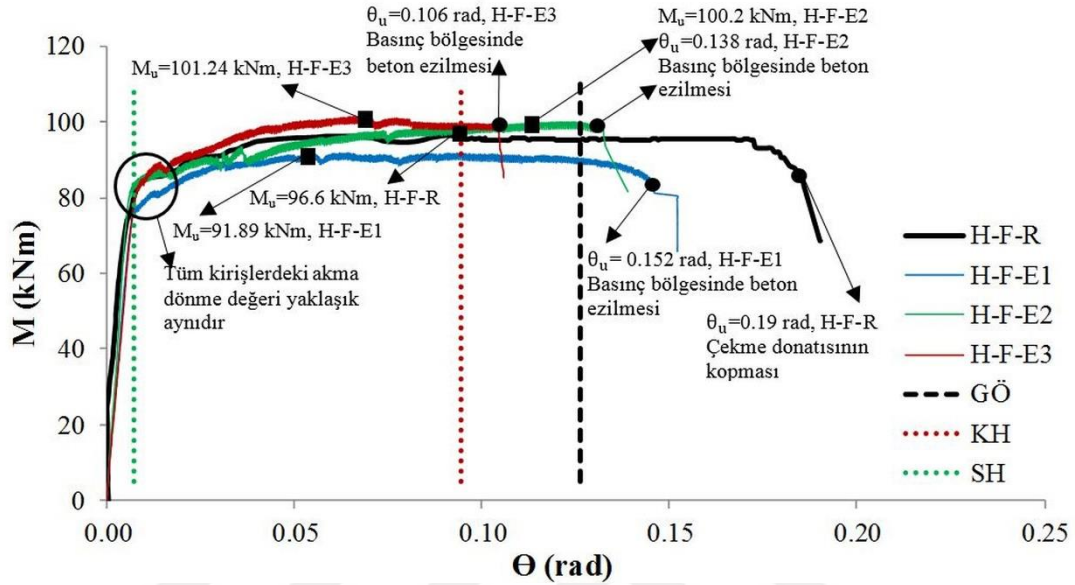
Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi bu serideki tüm kirişler tasarıma uygun olarak eğilme hâkim davranış göstererek güç tükenmesi (göçme) durumuna ulaşmıştır. H-F-R referans kirişi, çekme bölgesindeki donatının maksimum uzama şekil değiştirmesine ulaşarak kopmasıyla göçmeye ulaşırken, çarpma etkisine maruz kalmış H-F-E1, H-F-E2 ve H-F-E3 kirişleri basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle güç tükenmesi durumuna gelmiştir. Bu serideki kirişler için statik eğilme deneylerinde, eğilme hasarlarının yanı sıra çarpma testlerinde sonrasında oluşan kesme hasarlarının değişimi de incelenmiştir. Bu nedenle kiriş gövdesine yerleştirilen çapraz yer değiştirme ölçerler yardımıyla kesme çatlak genişlikleri kontrol edilmiştir. Kesme çatlaklarının uygulanan çarpma enerjisi arttıkça genişlediği ve statik deneylerde de bu durumun devam ettiği gözlemlenmiştir. Kirişlerin boyuna ve enine donatılarındaki şekil değiştirmeler, kirişleri göçmeye götüren eğilme ve kesme davranışından kaynaklanan hasar tipini ve yoğunluğu doğrular niteliktedir. Betonarme kirişlerin boyuna ve enine donatılarında oluşan şekil değiştirmeler donatılar üzerine yerleştirilen gerinim pulları yardımıyla belirlenmiş ve elde edilen şekil değiştirme değerleri ile kesme çatlak genişlikleri Tablo 6.14.'te verilmiştir.

Tablo 6.14. Kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki şekil değiştirmeler

Numune	Kesme Çatlak Genişliği (mm)	Şekil değiştirme Enine Donatı (ϵ)	Şekil değiştirme Boyuna Donatı (ϵ)	
			Çekme	Basınç
H-F-R	-	0,0018	Kopma	0,00359
H-F-E1	0,5	0,0077	0,0077	0,00126
H-F-E2	0,8	0,0080	0,0138	0,00140
H-F-E3	0,9	0,0089	0,0159	0,00186

Bu çalışmada kuvvet-yer değiştirme ilişkilerine bağlı olarak moment ve dönme değerleri arasındaki ilişki de incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen moment-dönme değerleri ve dönme süneklikleri bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.3-6.6

kullanılarak hesaplanmış ve TBDY 2018'deki betonarme elemanlar için performans seviyelerine göre belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.25.'te bu serideki kirişlere ait moment-dönme ilişkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.25. Eğilme numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri

Bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.3-6.5'e göre hesaplanan dönme değerleri ile TBDY 2018'deki dönme değerlerine bağlı hasar sınırları Tablo 6.15.'te gösterilmiştir.

Tablo 6.15. TBDY 2018'e göre deneysel dönme değerleri ve hasar sınırları

Numune	M_u (kN.m)	θ_u (rad)	μ_θ	SH (rad)	KH (rad)	GÖ (rad)
H-F-R	96,6	0,19	27,14			
H-F-E1	101,24	0,152	21,71	0,007	0,095	0,126
H-F-E2	100,2	0,138	19,71			
H-F-E3	91,89	0,106	15,14			

Eğilme serisinde dönme sünekliği, referans kiriş H-F-R'nin dönme kapasitesi ($\theta_u = 0,19$ rad) ile karşılaştırıldığında, sırasıyla H-F-E1, H-F-E2 ve H-F-E3 isimli numuneler için %20 ($\theta_u = 0,152$ rad), %27,4 ($\theta_u = 0,138$ rad) ve %44,2 ($\theta_u = 0,106$ rad) azalma gözlemlenmiştir. Ancak kirişlerin akma dönme değeri (θ_y) ve akmaya noktasına ulaştıran moment değeri (M_y) ile kirişlerin taşıyabileceği maksimum moment (M_u) değerlerinde önemli bir değişiklik olmamıştır.

Bununla birlikte farklı serilerdeki tüm kirişler için TBDY 2018 ve ACI 318-14'de kesme dayanımı için tanımlanan kurallara kesme güvenliği kontrolü yapılmıştır. Bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.7-6.21'e göre hesaplanan teorik kesme dayanımları Tablo 6.16.'da gösterilmiştir. Tüm kirişlerde kesme güvenliğinin sağlandığı ve tasarıma uygun eğilme hâkim davranışı doğrular nitelikte sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 6.16. TBDY 2018 ve ACI 318-14'e göre kesme güvenliği değerlendirmesi

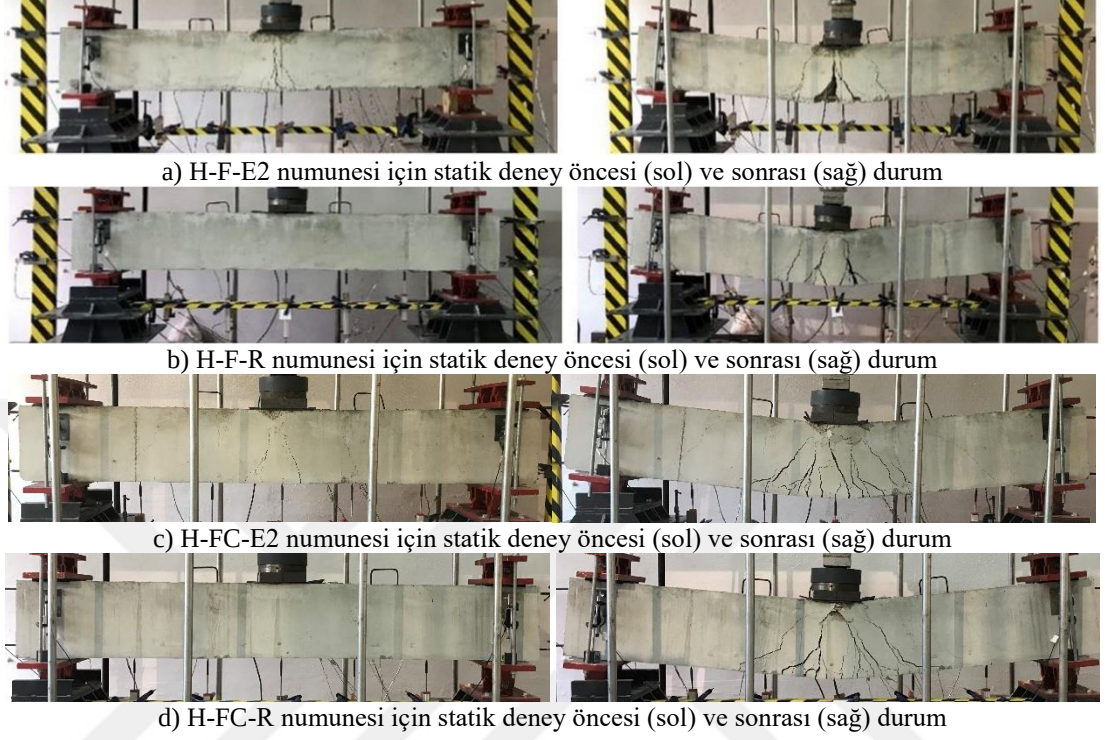
Numune	$V_{den.}=P_u/2$ (kN)	TBDY 2018	ACI 318-14	STM
		V_r (kN)	V_n (kN)	F_n (kN)
H-F-R	69			
H-F-E1	65,64	196	192	177
H-F-E2	71,58			
H-F-E3	72,32			

Statik deneyler sırasında deney numunelerinde oluşan herhangi bir imalat kusurundan kaynaklı hataları belirlemek, yerdeğiştirme değerlerinin ve deney düzeneğindeki mesnet koşullarının doğruluğundan emin olmak için mesnet çökmeleri iki adet düşey yerdeğiştirme ölçer yardımıyla ölçülmüştür. Deney sonuçlarına bakıldığında mesnet çökmeleri H-F-R, H-F-E1, H-F-E2 ve H-F-E3 numuneleri için sırasıyla 0,26-0,39, 0,07-0,62, 0,25-1,26 ve 0,26-0,30 mm aralığında gerçekleşmiştir. Böylelikle mesnet çökmelerinin numune orta noktasında oluşan yerdeğiştirme değerini etkilemeyecek düzeyde olduğu gözlemlenmiştir.

6.4.2. Kritik (Geçiş) deney serisine ait statik eğilme deney sonuçları (E_i sabit, ρ_l değişken)

Bu serideki çarpma deneyleri sırasıyla H-F-E2, H-FC-E2, H-FS-E2, H-SC-E2 ve H-S-E2 isimli numunelere sabit 3 m yükseklikten 360 kg'lık kütle serbest düşme yaptırılarak ve sabit çarpma enerjisi kullanılarak tamamlanmıştır. Daha sonra bu numuneler ile statik eğilme testi yapılarak sonuçlar çarpma etkisine maruz kalmamış referans bir numuneye ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.26., 6.27. ve 6.28.'de bu serideki sırasıyla H-F-E2 ve H-FC-E2, H-FS-E2, H-SC-E2, H-S-E2 olarak

isimlendirilmiş kirişlere ait statik eğilme deney öncesi ve sonrası durumlar gösterilmiştir.



Şekil 6.26. Kritik seri eğilme ve eğilme kritik numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları

Şekil 6.26., 6.27. ve 6.28.'den de görüldüğü gibi bu deney serisi eğilme ve kesme davranışının birlikte görüldüğü farklı süneklik kapasitelerine sahip deney numunelerinden oluşmaktadır.

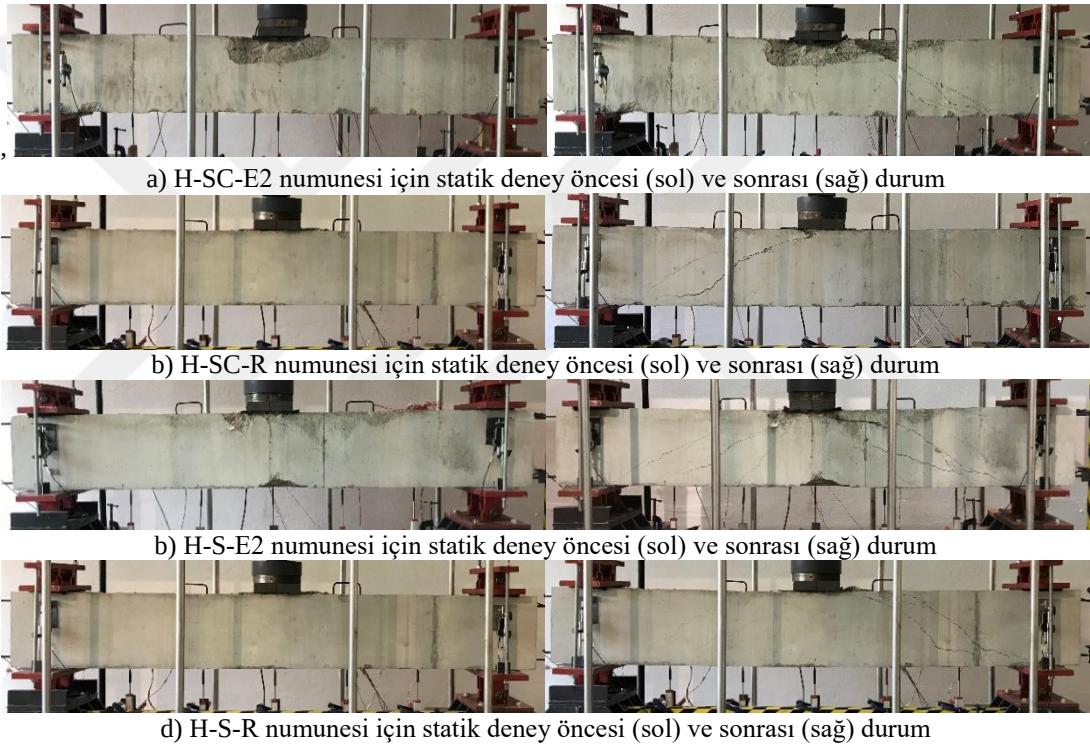
Bununla birlikte H-F-E2, H-FC-E2 deney numunelerinde eğilme hâkim, H-SC-E2, H-S-E2 deney numunelerinde kesme hâkim davranış tasarımı ve referans kirişin davranışıyla uyumlu şekilde gerçekleşmiştir.



b) H-FS-R numunesi için statik deney öncesi (sol) ve sonrası (sağ) durum

Şekil 6.27. Kritik seri kesmeli eğilme numunesi için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları

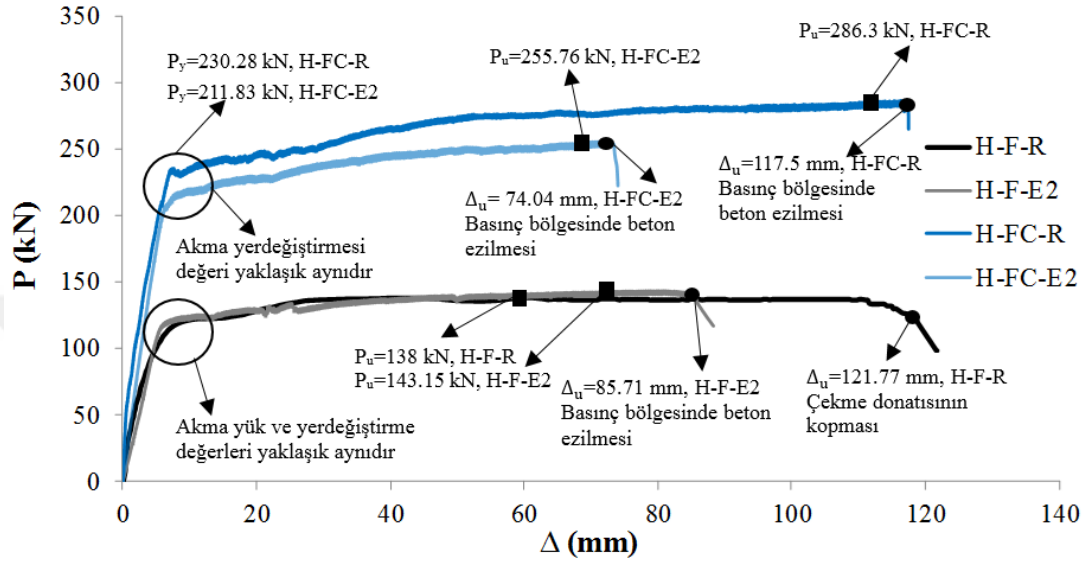
Ancak çarpma etkileri nedeniyle H-FS-E2 kirişinde oluşan kesme çatlakları statik deneylerde daha belirgin hale gelmiş ve bu kirişin davranışını değiştirmiştir. Çarpma etkilerine maruz kalmamış referans H-FS-R numunesi, eğilme hâkim davranışı ile göçme durumuna gelirken, H-FS-E2 kirişi ise çarpma etkileri sonrasında kesme davranışı ile göçme durumuna ulaşmıştır. Bu nedenle H-FS-E2 kirişinde eğilme çatlakları oluşmadan kesme çatlakları nedeniyle numune mekanizma duruma gelmiştir.



Şekil 6.28. Kritik seri kesme kritik ve kesme numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları

Deney sonuçları kuvvet-yerdeğiştirme, moment dönme, boyuna ve enine donatılardaki şekildeğiştirmeler ile kesme çatlak genişlikleri bakımından incelenmiştir. Bununla birlikte deney numunelerinde oluşan mesnet çökmeleri de kontrol edilmiştir. Şekil 6.29., 6.30. ve 6.31.'de bu serideki kirişlere ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Deney sonuçları karşılaştırıldığında çarpma etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerden H-F-E2, H-FC-E2 ve H-FS-E2 numuneleri için elde edilen yerdeğiştirme kapasitesinde önemli değişimler belirlenmiştir. Yerdeğiştirme kapasitesindeki azalma,

uygulanan boyuna donatının artmasıyla doğru orantılı olacak şekilde artmıştır. Bununla birlikte enerji yutma kapasitesi olarak daha önce tanımlanan ve yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilen E_d 'deki azalma boyuna donatının artmasıyla artmıştır.

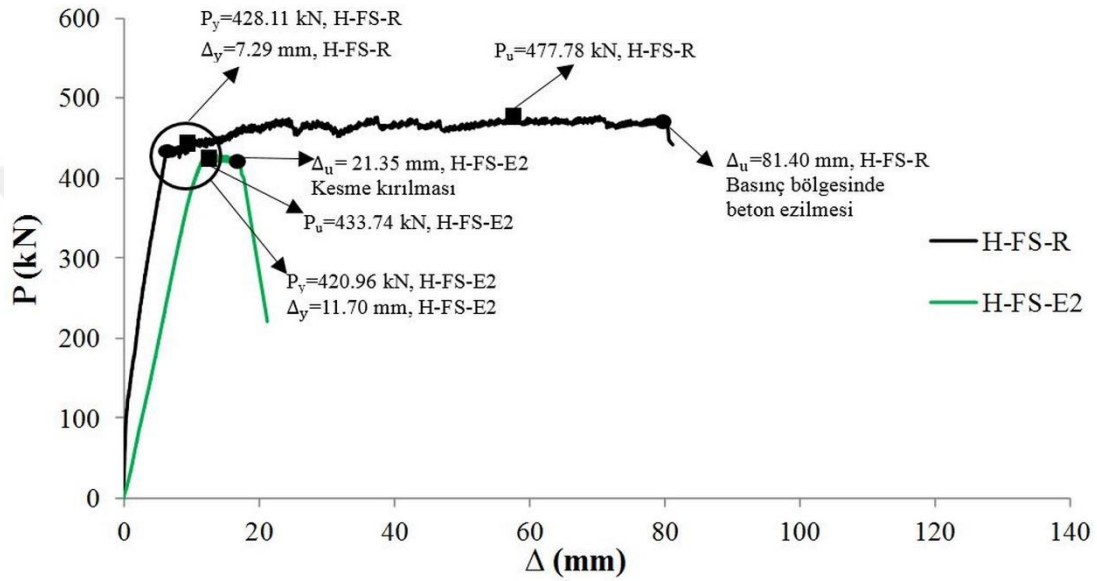


Şekil 6.29. Kritik seri eğilme ve eğilme kritik numuneleri için yük-yerdeğiştirme ilişkileri

Bu çalışmada literatürle benzer şekilde yerdeğiştirme sünekliği bir süneklik katsayısı (μ_Δ) ile tanımlanmaktadır. Süneklik katsayısı yapıda veya yapısal elemanda oluşan en büyük yerdeğiştirmenin (Δ_u) akma noktasındaki yerdeğiştirmeye (Δ_y , donatıların akma şekildegıştirmesine ulaşarak kuvvetin sabit kaldığı yerdeğiştirme değeri) oranı olarak bilinmektedir. Bu seriye ait betonarme kirişlerdeki süneklik kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. Bu azalım H-F-E2 ve H-FC-E2 için sırasıyla %31,9 ve %36,9 olarak gözlemlenmiştir. Ancak H-F-E2 ve H-FC-E2 referans numuneler olan H-F-R ve H-FC-R olan karşılaştırıldığında akma yer değıştirmesi Δ_y değeri yaklaşık aynı olarak elde edilmiştir. Referans numunesine ait akma yükü ve maksimum yük ($P_y=230,28$ kN ve $P_u=286,3$ kN) ile karşılaştırıldığında H-FC-E2 numunesini akma yerdeğiştirmesine ulaştıran P_y , %8,01 ve maksimum yük taşıma kapasitesi P_u , %10,7 azalmıştır. Bununla birlikte rijitlikler (K) de her iki numune için önemli ölçüde azalmıştır. Bu azalılar referans numunelerin H-F-R ($K= 31436$ kN/m) ve H-FC-R'nin ($K=33313$ kN/m) başlangıç

(çatlamamış kesit) rijitliğine göre, H-F-E2 ve H-FC-E2 için sırasıyla %30,9 ($K=21719$ kN/m) ve %16,8 ($K=27726$ kN/m) olarak gözlemlenmiştir.

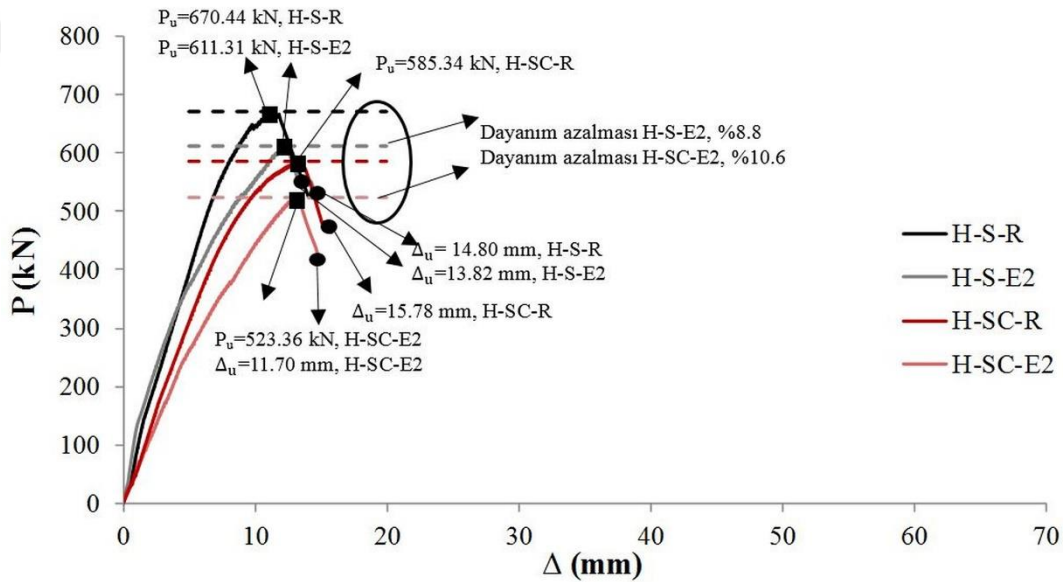
Kesmeli eğilme olarak isimlendirilen H-FS-E2 numunesi için yük-yerdeğiştirme ilişkisi şekil 6.30.'da verilmiştir. Şekil 6.30.'dan da görüldüğü gibi H-FS-E2'deki akma dayanımı P_y , maksimum yerdeğiştirme değeri Δ_u , maksimum dayanım P_u ve süneklik katsayısı μ_Δ azalmıştır.



Şekil 6.30. Kritik seri kesmeli eğilme numunesi için yük-yerdeğiştirme ilişkileri

Referans H-FS-R numunesindeki maksimum yerdeğiştirme kapasitesi $\Delta_u=81,40$ mm'ye göre, H-FS-E2'deki maksimum yerdeğiştirme değeri $\Delta_u=21,35$ mm %73,8 azalmıştır. Bu durum H-FS-E2 numunesinin referans kirişten farklı olarak eğilme yerine kesme davranışı göstermesine sebep olmuştur. Böylelikle çarpma etkisinden kaynaklı oluşan hasar nedeniyle betonarme kirişin davranışı doğrudan değişmiştir. Bu numunede bir miktar akma gerçekleşmiş gibi görünse de göçmeye sebep olan hasar, çarpma etkileri altında oluşan kesme hasarıdır. Bununla birlikte referans numunedeki oluşan akma ve maksimum dayanıma ($P_y=428,11$ kN ve $P_u=477,78$ kN) göre akma dayanımında ($P_y=420,96$ kN), ve maksimum dayanımda ($P_u=433,74$ kN), sırasıyla %1,7 ve %9,2 azalma meydana gelmiştir. Benzer şekilde rijitlik (K) referans numunenin H-F-R ($K= 45928$ kN/m) rijitliğine göre, H-FS-E2 için %21,7 ($K=35979$ kN/m) olarak gözlemlenmiştir.

Çarpma etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerden H-SC-E2 ve H-S-E2 numuneleri için elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 6.31.'de gösterilmiştir. Bu numunelerde çarpma etkisine bağlı olarak yük taşıma kapasiteleri, referans numuneleri H-SC-R ve H-S-R'ye göre önemli derecede azalmıştır. Dayanımda azalma, boyuna donatının artmasıyla doğru orantılı olacak şekilde artmıştır. Bununla birlikte enerji yutma kapasitesi olarak daha önce tanımlanan ve yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilen E_d de çarpma etkisine maruz kalmış kirişlerde referans numuneye göre azalmıştır.



Şekil 6.31. Kritik seri kesme kritik ve kesme numuneleri için yük-yerdeğiştirme ilişkileri

Şekil 6.31.'den de görüldüğü gibi H-SC-E2 ve H-S-E2'deki maksimum dayanımlar referans numunelerdeki H-SC-R ve H-S-R maksimum dayanımlara ($P_u=585,34$ kN) ve ($P_u=670,44$ kN) göre sırası ile %10,6 ($P_u=523,36$ kN) ve %8,8 ($P_u=611,31$ kN) azalmıştır. Benzer şekilde rijitlikler (K), referans numunelerin H-SC-R ($K= 47666$ kN/m) ve H-S-R'nin ($K= 59860$ kN/m) rijitliğine göre, H-SC-E2 ve H-S-E2 için sırasıyla %16 ($K=40043$ kN/m) ve %16,9 ($K=49740$ kN/m) azalmıştır. Bu serideki tüm kirişlere ait statik eğilme deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 6.17.'de verilmiştir. Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi çarpma etkisi altında bu serideki betonarme kirişlerde dayanım, rijitlik ve süneklik gibi parametrelerde önemli

değişiklikler olurken H-FS-E2 isimli numunede davranış ve göçme mekanizması doğrudan değişmiştir. Diğer numunelerdeki eğilme hâkim (H-F-E2 ve H-FC-E2) davranışın yanında kesme davranışı da görülürken kesme davranışı sergilemesi beklenen numunelerde (H-SC-E2 ve H-S-E2) kesme davranışı açısından bir değişiklik olmamıştır.

Tablo 6.17. Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri

Numune	P_u (kN)	Δ_u (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	μ_Δ	E_d (kN.m)	K (kN/m)	V_r/M_r	Davranış
H-F-R	138	121,77	119,35	7,89	15,43	15,86	31436	3,55	Eğilme
H-F-E2	143,15	85,71	120	7,44	11,52	11,48	21719		
H-FC-R	286,3	117,51	230,28	7,93	14,82	30,72	33313		
H-FC-E2	255,76	74,04	211,83	7,25	10,21	16,96	27726	2,41	Eğilme
H-FS-R	477,78	81,40	428,11	7,29	11,17	36,51	45928		
H-FS-E2	433,74	21,35	420,96	11,70	1,82	6,29	35979	1,21	Kesme
H-SC-R	585,34	15,78	-	-	-	6,10	47666		
H-SC-E2	523,36	15,03	-	-	-	4,86	40043	0,86	Kesme
H-S-R	670,44	14,80	-	-	-	6,66	59860		
H-S-E2	611,31	13,82	-	-	-	4,92	49740	0,63	Kesme

Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi bu serideki farklı süneklik ve yük taşıma kapasitelerine sahip numunelerden oluşmaktadır. H-F-E2, H-FC-R, H-FC-E2 H-FS-R olarak isimlendirilen kirişler tasarıma uygun eğilme hâkim davranış göstererek güç tükenmesi (göçme) durumuna, basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle ulaşmıştır. Ancak H-F-R eğilme referans kirişi, çekme bölgesindeki donatının maksimum uzama şekildeğiştirmesine ulaşarak kopmasıyla göçme durumuna gelmiştir. H-FS-E2 ise referans numunesinin tersine kesme hasarından kaynaklan gevrek kırılma ile güç tükenmesine ulaşmıştır. Bu numunede çekme donatıları akma şekildeğiştirmesine ulaşmış olsa da numuneyi mekanizma duruma getiren çarpma etkileri altında oluşan ve statik eğilme deneylerinde açılmaya devam eden kesme çatlaklarıdır. Bu durumda teorik olarak kesme açıklığında var olduğu kabul edilen beton basınç çubuklarının ezilmesi kirişi göçmeye ulaştırmıştır. Bununla birlikte kesme davranışı göstermesi beklenen H-SC-R H-SC-E2, H-S-R ve H-S-E2 olarak isimlendirilen kirişlerin tamamı göçmeye kesme hasarıyla ulaşmıştır. Eğilme davranışı gösteren kirişlerde çekme donatıları akma şekildeğiştirmesine ulaşırken, kesme numunelerinde tam tersi durum söz konusudur. Betonarme kirişlerin boyuna ve enine donatılarında oluşan şekildeğiştirmeler donatılar üzerine yerleştirilen gerinim pulları yardımıyla

belirlenmiş ve elde edilen şekildeğiştirme değerleri ile kesme çatlak genişlikleri Tablo 6.18.'de verilmiştir.

Kirişler için statik eğilme deneylerinde, eğilme hasarlarının yanı sıra çarpma testlerinde sonrasında oluşan kesme hasarlarının değişimi de incelenmiştir. Bu nedenle kiriş gövdesine yerleştirilen çapraz yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla kesme çatlak genişlikleri kontrol edilmiştir. Kesme çatlaklarının boyuna donatı arttıkça genişlediği ve statik deneylerde de bu durumun devam ettiği gözlemlenmiştir.

Tablo 6.18. Kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki şekildeğiştirmeler

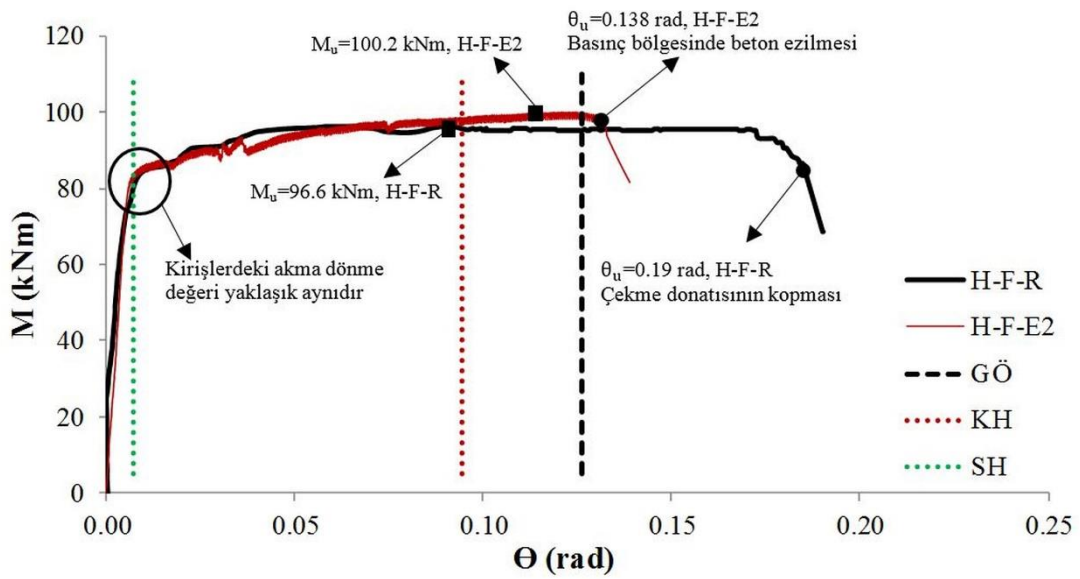
Numune	Kesme Çatlak Genişliği (mm)	Şekildeğiştirme Enine Donatı (ε)	Şekildeğiştirme Boyuna Donatı (ε)	
			Çekme	Basınç
H-F-R	-	0,0018	Kopma	0,00359
H-F-E2	0,8	0,0080	0,0138	0,00140
H-FC-R	0,77	0,0078	0,0059	0,00180
H-FC-E2	1,03	0,0076	0,0059	0,00186
H-FS-R	0,92	0,0081	0,0037	0,00032
H-FS-E2	2,23	0,0053	0,0025	- *
H-SC-R	4,33	0,0076	0,0018	0,00102
H-SC-E2	5,04	- *	0,0014	0,00126
H-S-R	4,95	0,0013	0,0001	0,00027
H-S-E2	5,5	0,0019	0,0016	0,00021

*: Deneyler esnasında kabloların kopması, kısa devre vb. nedenler ile veri alınamadı

Bununla birlikte çarpma etkisi nedeniyle oluşan kesme çatlaklarının kirişlerde eğilme hâkim davranış gösterdiği durumlarda dahi genişleyerek açıldığı görülmüştür. Kesme numunelerinde ise etriyelerin akma şekildeğiştirmesine ulaşmadan betonun kayma dayanımını kaybetmesiyle kirişler göçme durumuna ulaşmıştır. Kirişlerin boyuna ve enine donatılarındaki şekildeğiştirmeler, kirişleri göçmeye götüren eğilme ve kesme davranışından kaynaklanan hasar tipini ve yoğunluğunu doğrular niteliktedir.

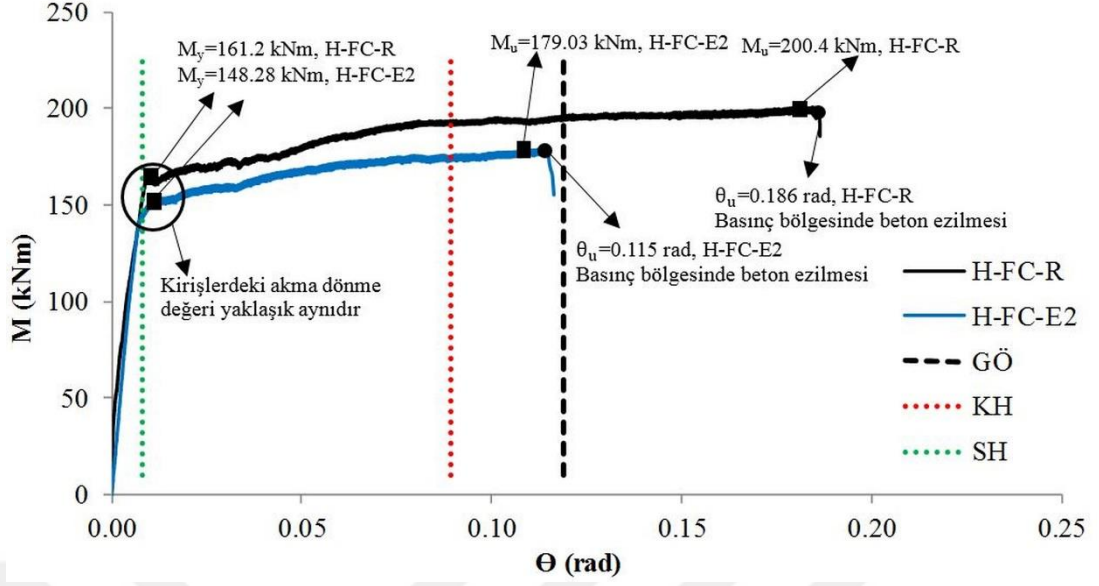
Bu çalışmada kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerine bağlı olarak moment ve dönme değerleri arasındaki ilişki de incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen moment-dönme değerleri ve dönme süneklikleri bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.3-6.6 kullanılarak hesaplanmış ve TBDY 2018'deki betonarme elemanlar için performans seviyelerine göre belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve yerdeğiştirmeye bağlı olarak elde edilen dönme kapasitelerindeki azalma uygulanan

çarpma enerjisinin büyümesiyle artmıştır. Dönme değerlerine bağlı olarak elde edilen dönme sünekliği, bir süneklik katsayısı (μ_θ) ile tanımlanmaktadır. Süneklik katsayısı yapısal elemanda oluşan en büyük dönmenin (θ_u) akma noktasındaki dönme değerine (θ_y , donatıların akma şekildeğişirmesine ulaşarak kuvvetin sabit kaldığı yerdeğiştirme değeri) oranı olarak bilinmektedir. Bu seriye ait betonarme kirişlerdeki süneklik kapasitesi, maksimum dönme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. Moment-dönme ilişkileri H-F-R ve H-F-E2, H-FC-R ve H-FC-E2, H-FS-R ve H-FS-E2 numuneleri için sırasıyla Şekil 6.32., 6.33. ve 6.34.'te gösterilmiştir.



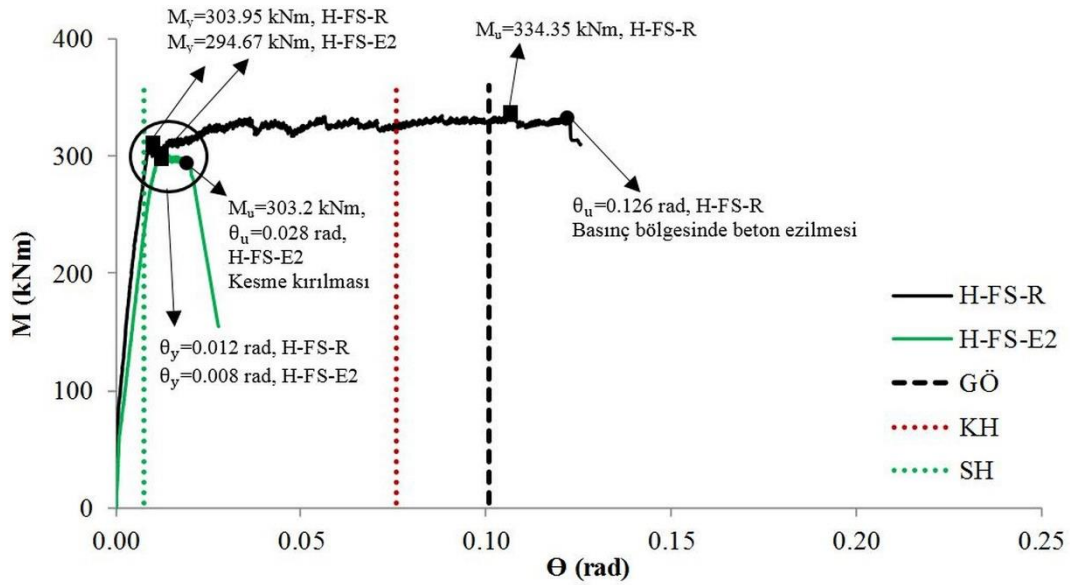
Şekil 6.32. Eğilme numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri

H-F-E2 eğilme numunesine ait dönme sünekliği, referans kiriş H-F-R'nin dönme kapasitesi ($\theta_u = 0,19$ rad) ile karşılaştırıldığında, H-F-E2 isimli numune için %23,3 ($\theta_u = 0,138$ rad) azalmıştır. Yük taşıma kapasitelerinde önemli bir değişiklik olmadığından, kirişlerin taşıyabileceği maksimum moment M_u , kirişleri akmaya ulaştıran moment M_y ve akma dönme değeri θ_y değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. Böylelikle çarpma nedeniyle basınç bölgesinde oluşan hasarların eğilme deneylerindeki manivela kolunu değiştirmediği ve dolayısıyla yük ve moment taşıma kapasitelerinde önemli bir değişiklik meydana gelmediği söylenebilir.



Şekil 6.33. Eğilme kritik numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri

H-FC-E2 eğilme kritik numunesine ait dönme sünekliği, referans kiriş H-FC-R'nin dönme kapasitesi ($\theta_u = 0,186$ rad) ile karşılaştırıldığında, H-FC-E2 isimli numune için %38,2 ($\theta_u = 0,115$ rad) azalmıştır. Betonarme kirişlerdeki dönme kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. H-FC-R'nin akma ve maksimum moment değerleri ($M_y = 161,2$ kNm ve $M_u = 200,4$ kNm) ile karşılaştırıldığında, H-FC-E2 numunesini akma yerdeğiştirmesine ulaştıran M_y , %8,01 ve maksimum moment taşıma kapasitesi M_u , %10,7 azalmıştır. Kirişleri akmaya ulaştıran akma dönme değeri θ_y değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir.



Şekil 6.34. Kesmeli eğilme numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri

Referans kiriş H-FS-R'nin dönme kapasitesi ($\theta_u = 0,126$ rad) ile karşılaştırıldığında, H-FS-E2 isimli numune için dönme kapasitesi %77,8 ($\theta_u = 0,028$ rad) azalmıştır. Betonarme kirişlerdeki dönme kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. H-FS-R'nin akma ve maksimum moment değerleri ($M_y = 303,95$ kNm ve $M_u = 334,35$ kNm) ile karşılaştırıldığında, H-FS-E2 numunesini akma yerdeğiştirmesine ulaştıran M_y , %3,1 ve maksimum moment taşıma kapasitesi M_u , %9,3 azalmıştır. H-FS-R'yi akmaya ulaştıran akma dönme değeri $\theta_y = 0,012$ rad iken, H-FS-E2'nin akma dönmesi değeri %33,3 azalma ile $\theta_y = 0,008$ rad olarak elde edilmiştir.

Bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.3-6.5'e göre hesaplanan dönme değerleri ile TBDY 2018'deki dönme değerlerine bağlı hasar sınırları Tablo 6.19.'da gösterilmiştir. Kesme davranışı gösteren H-SC-R ve H-SC-E2, H-S-R ve H-S-E2 numuneleri kesme davranışı gösterdiğinden bu kirişlerde yerdeğiştirme ve dönme değerlerine bağlı herhangi süneklik ilişkisi elde edilmemiştir. Bu nedenle H-SC-R ve H-SC-E2, H-S-R ve H-S-E2 numuneleri için moment-dönme ilişkilerine ait herhangi bir değerlendirme yapılmamıştır.

Tablo 6.19. TBDY 2018'e göre deneysel dönme değerleri ve hasar sınırları

Numune	M_u (kN.m)	θ_u (rad)	μ_θ	SH (rad)	KH (rad)	GÖ (rad)
H-F-R	96,6	0,19	27,14	0,007	0,095	0,126
H-F-E2	100,2	0,138	19,71			
H-FC-R	200,4	0,186	20,67	0,009	0,089	0,119
H-FC-E2	179,03	0,115	12,78			
H-FS-R	334,35	0,126	14	0,009	0,076	0,101
H-FS-E2	303,2	0,028	3,11			
H-SC-R	-	-	-	-	-	-
H-SC-E2	-	-	-	-	-	-
H-S-R	-	-	-	-	-	-
H-S-E2	-	-	-	-	-	-

Bununla birlikte farklı serilerdeki tüm kirişler için TBDY 2018 ve ACI 318-14'de kesme dayanımı için tanımlanan kurallara kesme güvenliği kontrolü yapılmıştır. Bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.7-6.21'e göre hesaplanan teorik kesme dayanımları Tablo 6.20.'de gösterilmiştir.

H-F-R ve H-F-E2, H-FC-R ve H-FC-E2, H-FS-R kirişleri için kesme güvenliğinin sağlandığı ve tasarıma uygun eğilme hâkim davranışı doğrular nitelikte sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 6.20. TBDY 2018 ve ACI 318-14'e göre kesme güvenliği değerlendirmesi

Numune	$V_{den.}=P_u/2$ (kN)	TBDY 2018	ACI 318-14	STM
		V_r (kN)	V_n (kN)	F_n (kN)
H-F-R	69	196	192	177
H-F-E2	71,58			
H-FC-R	143,2	196	192	174
H-FC-E2	127,88			
H-FS-R	238,89	196	192	166
H-FS-E2	216,87			
H-SC-R	292,67	196	192	160
H-SC-E2	261,68			
H-S-R	335,22	196	192	152
H-S-E2	305,66			

Ancak çarpma etkilerine maruz kalmış H-FS-E2 numunesinde çarpma etkilerine bağlı kesme hasarı oluşmuş ve statik eğilme deneyinde kesme davranışı göstererek göçme durumuna ulaşmıştır. Bu durumda ACI 318-14 ve STM modelleri güvenli tarafta kalırken TBDY 2018'deki tasarım kesme kuvvetine ulaşmadan kiriş göçme durumuna ulaşmıştır. TBDY 2018'de tanımlanan teorik kayma dayanımının daha fazla

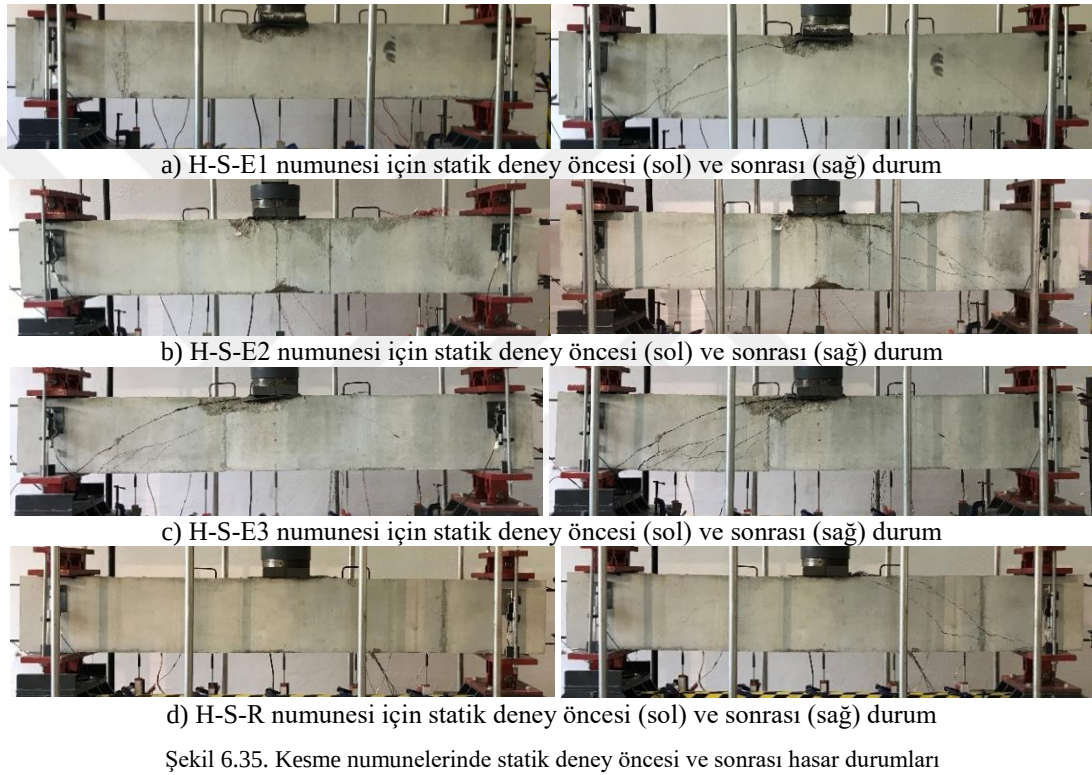
deneysel ve nümerik sonuçlar elde edilerek çarpma etkilerine maruz kalmış betonarme elemanlar için güncellemesi yönetmeliğimizle daha uyumlu sonuçlar ortaya çıkarabilir. H-SC-R ve H-SC-E2, H-S-R ve H-S-E2 numuneleri için ise ACI 318-14 ve STM modelleri aşırı güvenli tarafta kalırken TBDY 2018’de tanımlanan teorik kayma dayanımının deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Statik deneyler sırasında deney numunelerinde oluşan herhangi bir imalat kusurundan kaynaklı hataları belirlemek, yerdeğiştirme değerlerinin ve deney düzeneğindeki mesnet koşullarının doğruluğundan emin olmak için mesnet çökmeleri iki adet düşey yerdeğiştirme ölçer yardımıyla ölçülmüştür. Deney sonuçlarına bakıldığında mesnet çökmeleri H-F-R, H-F-E2, H-FC-R, H-FC-E2, H-FS-R, H-FS-E2 numuneleri için sırasıyla 0,26-0,39, 0,25-1,26, 0,08-0,40, 0,17-0,76 0,21-0,25, 0,22-2,51 mm aralığında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte kesme davranışı gösteren H-SC-R ve H-SC-E2, H-S-R ve H-S-E2 numuneleri için sırasıyla 0,01-0,21, 0,14-1,93, 0,04-0,24 ve 0,06-0,44 mm aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle mesnet çökmelerinin numune orta noktasında oluşan yerdeğiştirme değerini etkilemeyecek düzeyde olduğu belirlenmiştir. Mesnet çökme değerlerinde 1 mm’nin üstünde kalan değerlerin numune dökümü sırasında kalıp işçiliğinden kaynaklanan imalat kusurları nedeniyle oluştuğu görülmüştür.

6.4.3. Kesme deney serisine ait statik eğilme deney sonuçları (p_l sabit, E_i değişken)

Bu serideki çarpma deneyleri sırasıyla H-S-E1, H-S-E2 ve H-S-E3 isimli numunelere sabit 3m yükseklikten 240 kg, 360 kg ve 480 kg’lık kütleler serbest düşme yaptırılarak tamamlanmıştır. Daha sonra bu numuneler ile statik eğilme testi yapılarak sonuçlar çarpma etkisine maruz kalmamış referans bir numuneye ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.35.’te kesme serisindeki yüksek dayanımlı betonarme kirişlere ait statik eğilme deney öncesi ve sonrası durumlar gösterilmiştir. Şekil 6.35.’ten de görüldüğü gibi bu serideki tüm kirişler kesme hâkim davranış altında göçme durumuna ulaşmıştır.

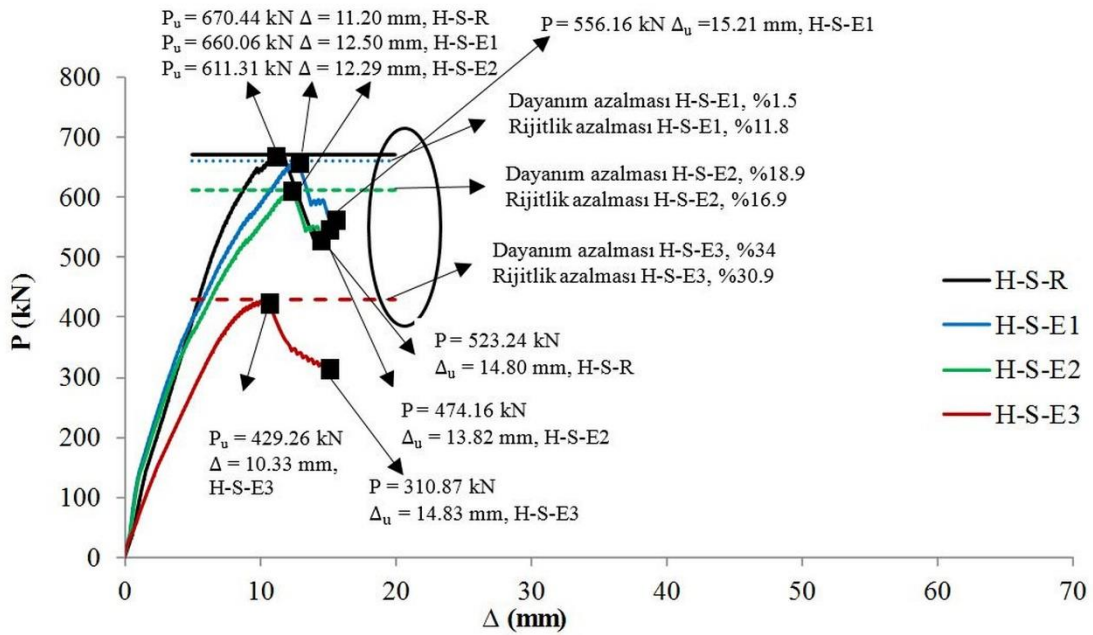
Bununla birlikte çarpma etkileri nedeniyle H-S-E1, H-S-E2 ve H-S-E3 kirişlerinde oluşan kesme çatlakları statik deneylerde daha belirgin hale gelmiştir. H-S-R numunesinde de tasarıma uygun olarak sadece kesme çatlakları görülmüş, eğilme davranışına ait herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Deney sonuçları kuvvet-yerdeğiştirme, boyuna ve enine donatılardaki şekildeğiştirmeler ile kesme çatlak genişlikleri bakımından incelenmiştir. Bununla birlikte deney numunelerinde oluşan mesnet çökmeleri de kontrol edilmiştir.



Şekil 6.36.'da bu serideki kirişlere ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Deney sonuçları karşılaştırıldığında çarpma etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi önemli derecede azalmıştır. Bununla birlikte enerji yutma kapasitesi olarak daha önce tanımlanan ve yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilen E_d de uygulanan çarpma enerjisinin büyümesiyle azalmıştır.

H-S-R referans kirişine ait maksimum yük taşıma kapasitesi ($P_u=670,44$ kN) ile karşılaştırıldığında, H-S-E1, H-S-E2 ve H-S-E3 kirişlerinde oluşan maksimum kesme dayanımında sırasıyla %1,5 ($P_u=660,06$ kN), % 18,9 ($P_u=611,31$ kN) ve % 30,9

($P_u=429,26$ kN) azalma görülmüştür. Ayrıca referans kirişin rijitliğine ($K= 59860$ kN/m) göre, H-S-E1, H-S-E2 ve H-S-E3 kirişlerinin rijitlikleri sırasıyla %11,8 ($K= 52804$ kN/m), %16,9 ($K= 49740$ kN/m) ve %30,6 ($K= 41555$ kN/m) azalmıştır. Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi çarpma etkisi altında kesme serisindeki betonarme kirişlerde dayanım, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi gibi parametrelerde önemli değişiklikler olmuştur. Deney sonuçlarına ait veriler Tablo 6.21.'de verilmiştir.



Şekil 6.36. Kesme numunelerinde oluşan yük-yerdeğiştirme ilişkileri

Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi bu serideki tüm kirişler tasarıma uygun olarak kesme hâkim davranış göstererek güç tükenmesi (göçme) durumuna ulaşmıştır. Kesme numunelerinde kirişlerin tamamı etriyelerin akma şekildedğiştirmesine ulaşmadan betonun kayma dayanımını kaybetmesiyle göçme durumuna ulaşmıştır. Bu nedenle kiriş gövdesine yerleştirilen çapraz yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla kesme çatlak genişlikleri kontrol edilmiştir. Deneylerde kesme açıklığında var olduğu teorik olarak kabul edilen beton basınç çubuklarının ezilmesi kirişi göçmeye ulaştırmıştır. Kesme çatlaklarının genişliği uygulanan çarpma enerjisi arttıkça azalmıştır. Bu durum çarpma deneylerinde kesme çatlaklarının açılmasından kaynaklanmıştır. Boyuna donatılarda (çekme ve basınç) büyük şekildedğiştirme değerleri elde edilmemiştir. Kesme davranışı gösteren kirişlerde çekme donatılarında akma durumu oluşmaması beklenirken,

çarpma etkileri nedeniyle oluşan yerdeğiştirmeler H-S-E1 ve H-S-E2 numunelerine ait çekme donatılarında akma görülmüştür.

Tablo 6.21. Kesme deney serisindeki kirişlere ait statik eğilme deneyi sonuçları

Numune	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	μ_Δ	E_d (kN.m)	K (kN/m)	K'daki Azalış (%)
H-F-R	-	-	670,44	14,80	-	6,78	59860	-
H-S-E1	-	-	660,06	15,21	-	6,66	52804	11,8
H-S-E2	-	-	611,31	13,82	-	4,92	49740	16,9
H-S-E3	-	-	429,26	10,33	-	3,45	41555	30,6

H-S-E3 numunesinde ise gerinim pulları çarpma deneyleri sırasında koptuğundan bu ölçümler yapılamamıştır. Kirişlerin boyuna ve enine donatılarındaki şekildeğiştirmeler, kirişleri göçmeye götüren eğilme ve kesme davranışından kaynaklanan hasar tipini ve yoğunluğu doğrular niteliktedir. Betonarme kirişlerin boyuna ve enine donatılarında oluşan şekildeğiştirmeler donatılar üzerine yerleştirilen gerinim pulları yardımıyla belirlenmiş ve elde edilen şekildeğiştirme değerleri ile kesme çatlak genişlikleri Tablo 6.22.'de verilmiştir.

Tablo 6.22. Kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki şekildeğiştirmeler

Numune	Kesme Çatlak Genişliği (mm)	Şekildeğiştirme Enine Donatı (ϵ)	Şekildeğiştirme Boyuna Donatı	
			(ϵ) Çekme	Basınç
H-S-R	4,9	0,0013	0,0001	0,00027
H-S-E1	5,1	0,0011	0,0024	0,00027
H-S-E2	5,5	0,0019	0,0026	0,00021
H-S-E3	8,1	0,0011	-	-

*: Deneyler esnasında kabloların kopması, kısa devre vb. nedenler ile veri alınamadı

Bununla bu serilerdeki tüm kirişler için TBDY 2018 ve ACI 318-14'de kesme dayanımı için tanımlanan kurallara kesme güvenliği kontrolü yapılmıştır. Bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.7-6.21'e göre hesaplanan teorik kesme dayanımları Tablo 6.23.'te gösterilmiştir. Bu durumda ACI 318-14 ve STM modelleri aşırı güvenli tarafta kalırken TBDY 2018'de tanımlanan teorik kayma dayanımının deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 6.23. TBDY 2018 ve ACI 318-14'e göre kesme güvenliği değerlendirmesi

Numune	$V_{den.} = P_u / 2$ (kN)	TBDY 2018	ACI 318-14	STM
		V_r (kN)	V_n (kN)	F_n (kN)

H-S-R	335,44			
H-S-E1	330,03			
H-S-E2	305,66	196	192	152
H-S-E3	214,63			

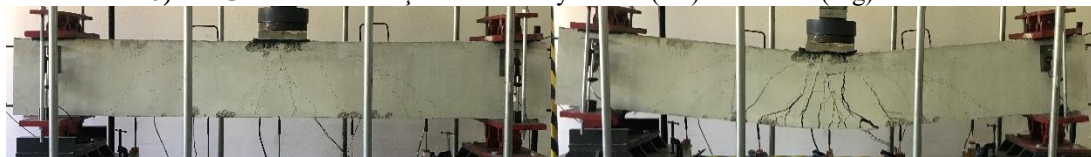
Statik deneyler sırasında deney numunelerinde oluşan herhangi bir imalat kusurundan kaynaklı hataları belirlemek, yerdeğiştirme değerlerinin ve deney düzeneğindeki mesnet koşullarının doğruluğundan emin olmak için mesnet çökmeleri iki adet düşey yerdeğiştirme ölçer yardımıyla ölçülmüştür. Deney sonuçlarına bakıldığında mesnet çökmeleri kesme davranışı gösteren H-S-R, H-S-E1, H-S-E2 ve H-S-E32 numuneleri için sırasıyla 0,04-0,24, 0,04-0,31, 0,06-0,44 ve 0,02-0,14 mm aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle mesnet çökmelerinin numune orta noktasında oluşan yerdeğiştirme değerini etkilemeyecek düzeyde olduğu belirlenmiştir.

6.4.4. Kritik 2 (Farklı çarpma hızları V_i) deney serisine ait statik eğilme deney sonuçları (E_i ve V_i , ρ_l değişken)

Bu serideki çarpma deneyleri sırasıyla H-FC-E2, H-FC-E2-2, H-FS-E2, H-FS-E2-1.5 isimli numunelere sırasıyla sabit 3, 2, 3 ve 1,5 m yükseklikten 360 kg'lık kütle serbest düşme yaptırılarak elde edilen çarpma enerjisi kullanılarak tamamlanmıştır. Daha sonra bu numuneler ile statik eğilme testi yapılarak sonuçlar çarpma etkisine maruz kalmamış referans bir numuneye ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.37. ve 6.38.'de bu serideki sırasıyla H-FC-E2, H-FC-E2-2 ve H-FS-E2, H-FS-E2-1.5 olarak isimlendirilmiş kirişlere ait statik eğilme deney öncesi ve sonrası durumlar gösterilmiştir.



a) H-FC-E2 numunesi için statik deney öncesi (sol) ve sonrası (sağ) durum



b) H-FC-E2-2 numunesi için statik deney öncesi (sol) ve sonrası (sağ) durum



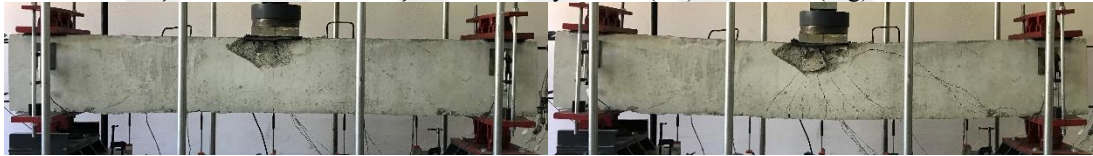
c) H-FC-R numunesi için statik deney öncesi (sol) ve sonrası (sağ) durum

Şekil 6.37. Kritik 2 seri eğilme kritik numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları

Çarpma etkileri nedeniyle H-FS-E2 kirişinde oluşan kesme çatlakları statik deneylerde daha belirgin hale gelmiş ve bu kirişin davranışını değiştirmiştir. Çarpma etkilerine maruz kalmamış referans H-FS-R numunesi, eğilme hâkim davranışı ile göçme durumuna gelirken, H-FS-E2 kirişi ise çarpma etkileri sonrasında kesme davranışı ile göçme durumuna ulaşmıştır. Bu nedenle H-FS-E2 kirişinde eğilme çatlakları oluşmadan kesme çatlakları nedeniyle numune mekanizma duruma gelmiştir.



a) H-FS-E2 numunesi için statik deney öncesi (sol) ve sonrası (sağ) durum



b) H-FS-E2-1.5 numunesi için statik deney öncesi (sol) ve sonrası (sağ) durum



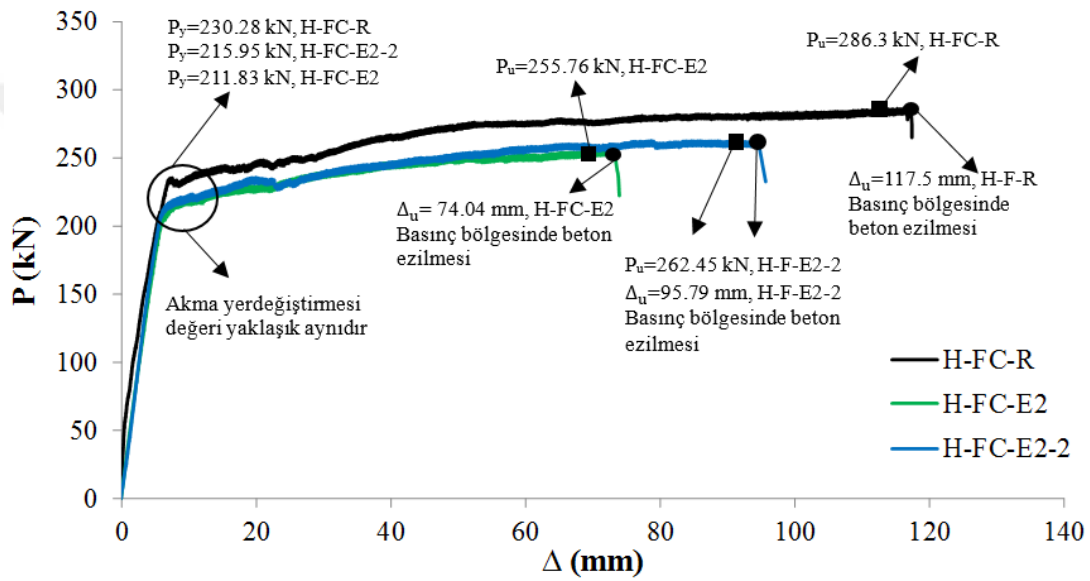
c) H-FS-R numunesi için statik deney öncesi (sol) ve sonrası (sağ) durum

Şekil 6.38. Kritik 2 serisi kesmeli eğilme numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları

Ancak H-FS-E2-1.5 numunesindeki çarpma enerji seviyesinin ve oluşan kesme hasarının daha küçük olması nedeniyle, çarpma sonrası statik deneylerde kesme davranışı eğilme davranışı ile birlikte görülmüştür. H-FS-E2-1.5 numunesi, H-FS-E2 numunesinin aksine göçmeye eğilme davranışı ile ulaşmıştır.

Deney sonuçları kuvvet-yerdeğiştirme, moment dönme, boyuna ve enine donatılardaki şekildeğiştirmeler ile kesme çatlak genişlikleri bakımından incelenmiştir. Bununla birlikte deney numunelerinde oluşan mesnet çökmeleri de kontrol edilmiştir. Şekil

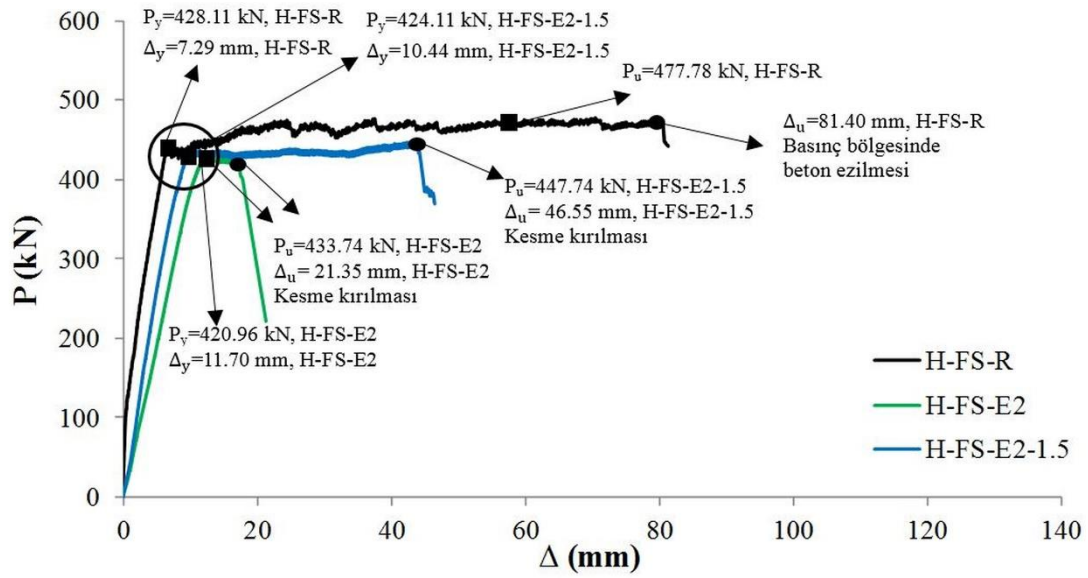
6.39. ve 6.40.'da bu serideki kirişlere ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Deney sonuçları karşılaştırıldığında çarpma etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerden H-FC-E2, H-FC-E2-2, H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 numuneleri için elde edilen yerdeğiştirme kapasitesinde önemli değişimler belirlenmiştir. Yerdeğiştirme kapasitesindeki azalma, uygulanan boyuna donatının artmasıyla doğru orantılı olacak şekilde artmıştır. Bununla birlikte enerji yutma kapasitesi olarak daha önce tanımlanan ve yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilen E_d 'deki azalma boyuna donatının artmasıyla artmıştır.



Şekil 6.39. Kritik 2 seri eğilme kritik numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları

Eğilme kritik kirişlerdeki süneklik kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. Bu azalım H-FC-E2 ve H-FC-E2-2 için sırasıyla %36,9 ve %18,5 olarak gözlemlenmiştir. Ancak H-FC-E2 ve H-FC-E2-2 referans numunesi H-FC-R olan karşılaştırıldığında akma yer değıştirmesi Δ_y değeri yaklaşık aynı olarak elde edilmiştir. Referans numunesine ait akma yükü ve maksimum yük ($P_y=230,28$ kN ve $P_u=286,3$ kN) ile karşılaştırıldığında, H-FC-E2 numunesini akma yerdeğiştirmesine ulaştıran $P_y=211,83$ kN, %8,01 ve maksimum yük taşıma kapasitesi $P_u=255,76$ kN, %10,7 azalmıştır. Referans numuneye göre, H-FC-E2-2 numunesinde ise akma yükü $P_y=215,95$ kN, %6,5 ve maksimum yük taşıma kapasitesi $P_u=265,45$ kN, %8,3 azalmıştır. Bununla birlikte rijitlikler (K) de her iki

numune için önemli ölçüde azalmıştır. Bu azalmalar referans numunelerin H-FC-R'nin ($K=33313 \text{ kN/m}$) başlangıç (çatlamamış kesit) rijitliğine göre, H-FC-E2 ve H-FC-E2-2 için sırasıyla %1,8 ($K=27726 \text{ kN/m}$) ve %8,7 ($K=30415 \text{ kN/m}$) ve olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca enerji yutma kapasitesi olarak daha önce tanımlanan ve yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilen E_d betonarme kirişlere uygulanan çarpma enerjisinin artması veya azalmasıyla ters orantılı olarak değişim göstermiştir.



Şekil 6.40. Kritik 2 seri kesmeli eğilme numuneleri için statik deney öncesi ve sonrası hasar durumları

Kesmeli eğilme kirişlerindeki süneklik kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. Bu azalım referans numunedeki maksimum yerdeğiştirme değeri $\Delta_u=81,40 \text{ mm}$ 'ye göre H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 için sırasıyla %73,8 ($\Delta_u=21,35 \text{ mm}$) ve %42,8 ($\Delta_u=46,55 \text{ mm}$) olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 akma yerdeğiştirmesi değerleri $\Delta_y=11,70$ ve $\Delta_y=10,44 \text{ mm}$ referans numunesi H-FS-R'nin akma yer değıştirmesi $\Delta_y=7,29 \text{ mm}$ 'ye göre sırasıyla %60,4 ve %43,2 artmıştır. Referans numunesine ait akma yükü ve maksimum yük ($P_y=428,11 \text{ kN}$ ve $P_u=477,78 \text{ kN}$) ile karşılaştırıldığında, H-FS-E2 numunesini akma yerdeğiştirmesine ulaştıran akma yükü $P_y=420,96 \text{ kN}$, %1,7 ve maksimum yük taşıma kapasitesi $P_u=433,74 \text{ kN}$, %9,2 azalmıştır. Ayrıca, H-FS-E2-1.5 numunesinde ise akma yükü $P_y=424,11 \text{ kN}$, %0,9 ve maksimum yük taşıma kapasitesi $P_u=447,74$

kN, %6,3 azalmıştır. Bununla birlikte rijitlikler (K) de her iki numune için önemli ölçüde azalmıştır. Bu azalılar referans numunelerin H-FS-R'nin ($K=45928$ kN/m) başlangıç (çatlamamış kesit) rijitliğine göre, H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 için sırasıyla %21,7 ($K=35979$ kN/m) ve %11,6 ($K=40624$ kN/m) ve olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca enerji yutma kapasitesi E_d 'deki azalma boyuna donatının artmasıyla artmıştır. Bu duruma ek olarak betonarme kirişlere uygulanan çarpma enerjisinin artması veya azalmasıyla ters orantılı olarak değişim göstermiştir. Bu serideki tüm kirişlere ait statik eğilme deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 6.24.'te verilmiştir. Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi çarpma etkisi altında bu serideki betonarme kirişlerde dayanım, rijitlik ve süneklik gibi parametrelerde önemli değişiklikler olurken H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 isimli numunede davranış ve göçme mekanizması doğrudan değişmiştir.

Tablo 6.24. Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri

Numune	P_u (kN)	Δ_u (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	μ_Δ	E_d (kN.m)	K (kN/m)	V_r/M_r	Davranış
H-FC-R	286,3	117,5	230,28	7,93	14,82	30,72	33313		
H-FC-E2-2	262,45	95,79	215,95	7,10	13,49	22,82	30415	2,41	Eğilme
H-FC-E2	255,76	74,04	211,83	7,25	10,21	16,96	27726		
H-FS-R	477,78	81,40	428,11	7,29	11,17	36,51	45928		Eğilme
H-FS-E2-1.5	447,74	46,55	424,11	10,44	4,46	18,23	40624	1,21	Kesme
H-FS-E2	433,74	21,35	420,96	11,70	1,82	6,29	35979		Kesme

Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi bu serideki farklı süneklik ve yük taşıma kapasitelerine sahip numunelerden oluşmaktadır. H-FC-R, H-FC-E2, H-FC-E2-2 ve H-FS-R olarak isimlendirilen kirişler tasarıma uygun eğilme hâkim davranış göstererek güç tükenmesi (göçme) durumuna, basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle ulaşmıştır. H-FS-E2 ise referans numunesinin tersine kesme hasarından kaynaklanıyarak gevrek kırılma ile güç tükenmesine ulaşmıştır. H-FS-E2-1.5 numunesinde ise eğilme çatlakları oluşmasına rağmen göçme, çarpma deneylerinde oluşan kesme çatlaklarının genişlemesi ile gerçekleşmiştir. Bu numunelerde çekme donatıları akma şekilde değişmesine ulaşmış olsa da numuneyi mekanizma duruma getiren çarpma etkileri altında oluşan ve statik eğilme deneylerinde açılmaya devam eden kesme çatlaklarıdır. Bu durumda teorik olarak kesme açıklığında var olduğu kabul edilen beton basınç çubuklarının ezilmesi kirişi göçmeye ulaştırmıştır. Bu nedenle kiriş gövdesine yerleştirilen çapraz yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla kesme çatlak genişlikleri kontrol edilmiştir. Kesme çatlaklarının uygulanan çarpma enerjisi ve

boyuna donatı arttıkça genişlediği ve statik deneylerde de bu durumun devam ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca çarpma etkisi nedeniyle oluşan kesme çatlaklarının kirişlerde eğilme hâkim davranış gösterdiği durumlarda dahi genişleyerek açıldığı görülmüştür. Kesmeli eğilme numunelerinde ise etriyelerin akma şekildeğiştirmesine aşmış ancak kopma şekildeğiştirme değerlerine ulaşamamıştır. Bununla birlikte kirişler göçme durumuna betonun kayma dayanımını kaybetmesiyle ulaşmıştır. Kirişlerin boyuna ve enine donatılarındaki şekildeğiştirmeler, kirişleri göçmeye götüren eğilme ve kesme davranışından kaynaklanan hasar tipini ve yoğunluğu doğrular niteliktedir. Betonarme kirişlerin boyuna ve enine donatılarında oluşan şekildeğiştirmeler donatılar üzerine yerleştirilen gerinim pulları yardımıyla belirlenmiş ve elde edilen şekildeğiştirme değerleri ile kesme çatlak genişlikleri Tablo 6.25.'te verilmiştir.

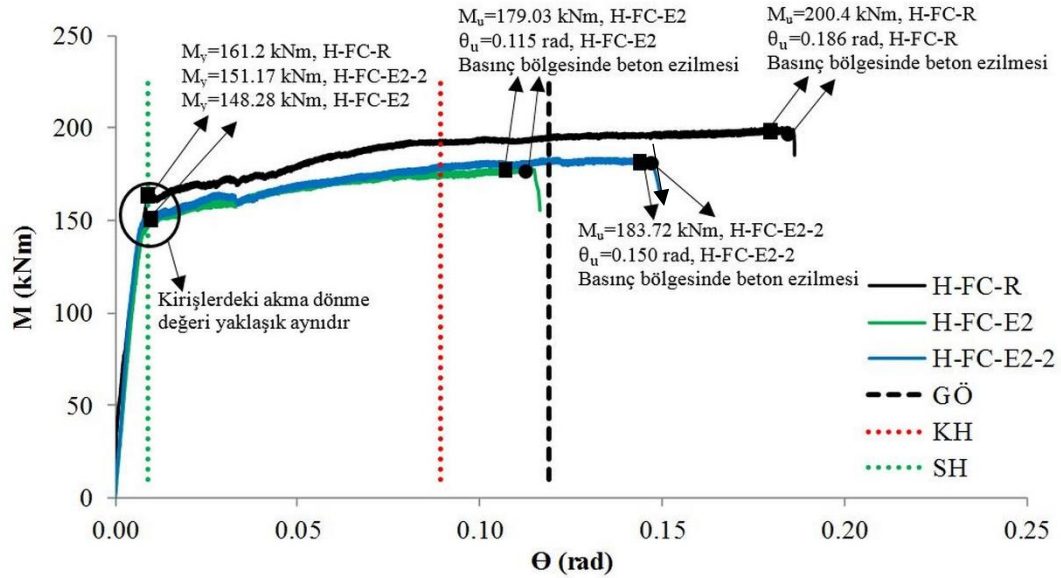
Tablo 6.25. Kesme çatlak genişlikleri ile enine ve boyuna donatılardaki şekildeğiştirmeler

Numune	Kesme Çatlak Genişliği (mm)	Şekildeğiştirme Enine Donatı (ϵ)	Şekildeğiştirme Boyuna Donatı (ϵ)	
			Çekme	Basınç
H-FC-R	0,77	0,0078	0,0059	0,00180
H-FC-E2-2	0,85	0,0076	0,0060	0,0010
H-FC-E2	1,03	0,0076	0,0059	0,00186
H-FS-R	0,92	0,0081	0,0037	0,00032
H-FS-E2-1.5	1,35	0,0042	0,0031	0,00081
H-FS-E2	2,23	0,0053	0,0025	-*

*: Deneyler esnasında kabloların kopması, kısa devre vb. nedenler ile veri alınamadı

Bu çalışmada kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerine bağlı olarak moment ve dönme değerleri arasındaki ilişki de incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen moment-dönme değerleri ve dönme süneklikleri bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.3-6.6 kullanılarak hesaplanmış ve TBDY 2018'deki betonarme elemanlar için performans seviyelerine göre belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Moment-dönme ilişkileri H-FC-R, H-FC-E2, H-FC-E2-2, H-FS-R, H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 numuneleri için sırasıyla Şekil 6.41. ve 6.42.'de gösterilmiştir. Deneysel ve yerdeğiştirmeye bağlı olarak elde edilen dönme kapasitelerindeki azalma uygulanan çarpma enerjisinin büyümesiyle artmıştır. Dönme değerlerine bağlı olarak elde edilen dönme sünekliği, bir süneklik katsayısı (μ_θ) ile tanımlanmaktadır. Bu seriye ait betonarme kirişlerdeki süneklik kapasitesi, maksimum dönme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. H-FC-E2 ve H-FC-E2-2 eğilme kritik

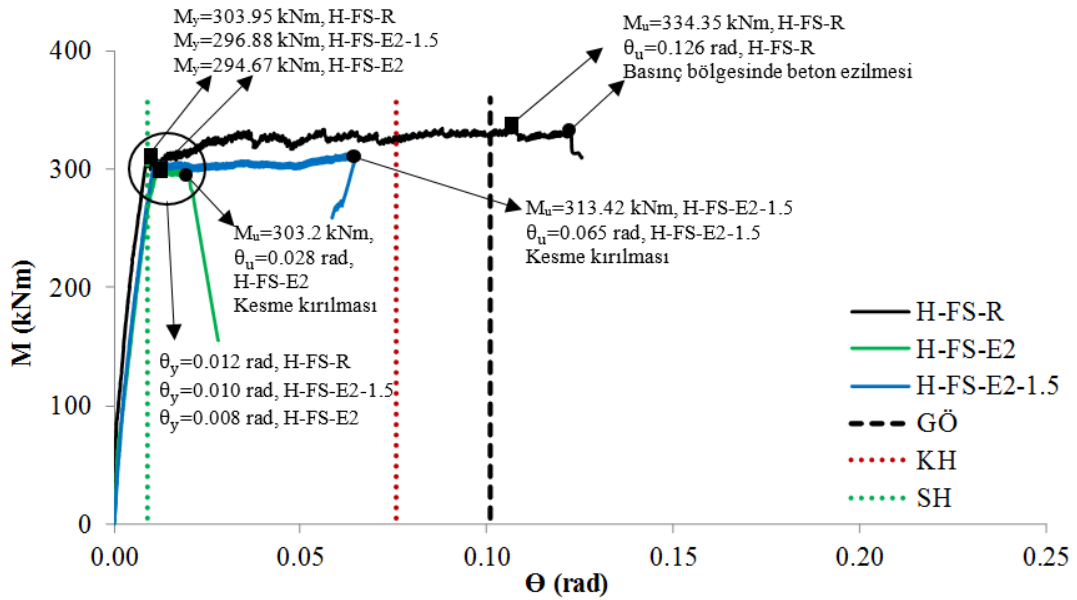
numunelerine ait dönme sünekliği, referans kiriş H-FC-R'nin dönme kapasitesi ($\theta_u = 0,186$ rad) ile karşılaştırıldığında, sırasıyla %38,2 ($\theta_u = 0,115$ rad) ve %19,4 ($\theta_u = 0,150$ rad) azalmıştır.



Şekil 6.41. Eğilme kritik numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri

Betonarme kirişlerdeki dönme kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. H-FC-R'nin akma ve maksimum moment değerleri ($M_y = 161,2$ kNm ve $M_u = 200,4$ kNm) ile karşılaştırıldığında, H-FC-E2 numunesini akma yerdeğiştirmesine ulaştıran $M_y = 148,28$ kNm, %8,01 ve maksimum moment taşıma kapasitesi $M_u = 179,03$ kNm, %1,7 azalmıştır. H-FC-E2-2 numunesinde ise referans kirişe göre $M_y = 151,17$ kNm, %6,2 ve $M_u = 183,72$ kNm, %8,3 azalmıştır. Kirişleri akmaya ulaştıran akma dönme değeri θ_y değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. Referans kiriş H-FS-R'nin dönme kapasitesi ($\theta_u = 0,126$ rad) ile karşılaştırıldığında, H-FS-E2 isimli numune için dönme kapasitesi %77,8 ($\theta_u = 0,028$ rad) azalmıştır. H-FS-E2-1.5 numunesi için ise dönem kapasitesindeki azalış %48,4 ($\theta_u = 0,065$ rad) olarak gerçekleşmiştir. Betonarme kirişlerdeki dönme kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak azalmıştır. H-FS-R'nin akma ve maksimum moment değerleri ($M_y = 303,95$ kNm ve $M_u = 334,35$ kNm) ile karşılaştırıldığında, H-FS-E2 numunesini akma yerdeğiştirmesine ulaştıran

$M_y=294,67$ kNm, %3,1 ve maksimum moment taşıma kapasitesi $M_u=303,2$ kNm, %9,3 azalmıştır.



Şekil 6.42. Kesmeli eğilme numunelerinde oluşan moment-dönme ilişkileri

H-FS-E2-1.5 numunesinde ise sırası ile %2,3 ve %6,3'lük azalma ile $M_y=296,88$ kNm ve $M_u=313,42$ kNm olarak belirlenmiştir. H-FS-R'yi akmaya ulaştıran akma dönme değeri $\theta_y=0,012$ rad iken, H-FS-E2'nin akma dönmesi değeri %33,3 azalma ile $\theta_y=0,008$ rad ve H-FS-E2-1.5'in akma dönmesi değeri %16,7 azalma ile $\theta_y=0,010$ rad olarak elde edilmiştir.

Bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.3-6.5'e göre hesaplanan dönme değerleri ile TBDY 2018'deki dönme değerlerine bağlı hasar sınırları Tablo 6.26.'da gösterilmiştir.

Tablo 6.26 . TBDY 2018'e göre deneysel dönme değerleri ve hasar sınırları

Numune	M_u (kN.m)	θ_u (rad)	μ_θ	SH (rad)	KH (rad)	GÖ (rad)
H-FC-R	200,4	0,186	20,67			
H-FC-E2-2	183,72	0,150	16,67	0,009	0,089	0,119
H-FC-E2	179,03	0,115	12,78			
H-FS-R	334,35	0,126	14			
H-FS-E2-1.5	313,42	0,065	6,5	0,009	0,076	0,101
H-FS-E2	303,2	0,028	3,11			

Bununla birlikte farklı serilerdeki tüm kirişler için TBDY 2018 ve ACI 318-14'de kesme dayanımı için tanımlanan kurallara kesme güvenliği kontrolü yapılmıştır. Bu serideki tüm kirişler için Denklem 6.7-6.21'e göre hesaplanan teorik kesme dayanımları Tablo 6.27.'de gösterilmiştir. H-FC-R, H-FC-E2, H-FS-R kirişleri için kesme güvenliğinin sağlandığı ve tasarıma uygun eğilme hâkim davranışı doğrular nitelikte sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 6.27. TBDY 2018 ve ACI 318-14'e göre kesme güvenliği değerlendirmesi

Numune	$V_{den.}=P_u/2$ (kN)	TBDY 2018	ACI 318-14	STM
		V_r (kN)	V_n (kN)	F_n (kN)
H-FC-R	143,2			
H-FC-E2-2	131,23	196	192	174
H-FC-E2	127,88			
H-FS-R	238,89			
H-FS-E2-1.5	223,87	196	192	166
H-FS-E2	216,87			

Ancak çarpma etkilerine maruz kalmış H-FS-E2 numunesinde çarpma etkilerine bağlı kesme hasarı oluşmuş ve statik eğilme deneyinde kesme davranışı göstererek göçme durumuna ulaşmıştır. Bununla birlikte H-FS-E2-1.5 eğilme davranışı gösterse de numuneyi göçme durumuna getiren birincil hasar kesme hasarıdır. Bu durumda ACI 318-14 ve STM modelleri güvenli tarafta kalırken TBDY 2018'deki tasarım kesme kuvvetine ulaşmadan kiriş göçme durumuna ulaşmıştır. TBDY 2018'de tanımlanan teorik kayma dayanımının daha fazla deneysel ve nümerik sonuçlar elde edilerek çarpma etkilerine maruz kalmış betonarme elemanlar için güncellemesi yönetmeliğimizle daha uyumlu sonuçlar ortaya çıkarabilir.

Statik deneyler sırasında deney numunelerinde oluşan herhangi bir imalat kusurundan kaynaklı hataları belirlemek, yerdeğiştirme değerlerinin ve deney düzeneğindeki mesnet koşullarının doğruluğundan emin olmak için mesnet çökmeleri iki adet düşey yerdeğiştirme ölçer yardımıyla ölçülmüştür. Deney sonuçlarına bakıldığında mesnet çökmeleri H-FC-R, H-FC-E2, H-FC-E2-2 H-FS-R, H-FS-E2 ve H-FS-E2-1.5 numuneleri için sırasıyla 0,08-0,40, 0,17-0,76, 0,10-0,31, 0,21-0,25, 0,22-2,51 ve 0,08-0,91 mm aralığında gerçekleşmiştir. Böylelikle mesnet çökmelerinin numune orta noktasında oluşan yerdeğiştirme değerini etkilemeyecek düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Mesnet çökme değerlerinde 1 mm'nin üstünde kalan değerlerin

numune dökümü sırasında kalıp işçiliğinden kaynaklanan imalat kusurları nedeniyle oluştuğu görülmüştür.



BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı; farklı çarpma enerjilerine maruz kalmış ancak taşıma gücünü tamamen kaybetmemiş, farklı süneklik kapasitelerine sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin, eğilme ve kesme kapasitelerindeki değişimin tespit edilmesidir. Bu amaçla farklı çarpma etkilerine maruz kalmış yüksek dayanımlı betonarme kirişlerdeki davranışın değişimi 3 aşamalı deneysel bir çalışma ile incelenmiştir. Deneysel çalışmanın birinci aşamasında pilot deneyler yapılarak düşme yüksekliği ve düşürülen kütlenin büyüklüğüne bağlı olarak enerji düzeyleri tanımlanmıştır. Bu aşamada 240, 360 ve 480 kg'lık kütlelerin 3, 2 ve 1,5 m yükseklikten serbest düşmesiyle oluşturulan çarpma enerjileri seçilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında pilot deney sonuçları dikkate alınarak deney numunelerinin boyutları ve donatı oranları belirlenmiş ve çarpma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak betonarme kirişlerin boyutları, beton basınç dayanımları, enine donatıları ve a/d oranları sabit tutulmuş sadece boyuna donatı oranları değiştirilmiştir. Boyuna donatı oranları a) $\rho_{\min}$ b) $2\rho_{\min}$ c) $4\rho_{\min}$ d) $6\rho_{\min}$ ve e) $\rho_{\max} = 0,85\rho_b$ olacak şekilde seçilerek süneklik düzeyleri farklı beş farklı deney numune tipi oluşturulmuştur. Bu deney numunelerinin eğilmeden kesmeye doğru gevrekleşen davranış göstermeleri amaçlanmıştır. Böylelikle çalışmada farklı süneklik kapasitelerine sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişlere farklı çarpma enerjileri uygulanarak oluşturulan genel bir deney matrisi elde edilmiştir. Deneysel çalışmanın son aşamasında çarpmaya maruz kalmış numunelerin ve çarpma etkilerine maruz kalmamış referans numunelerinin eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kuvvet-yerdeğiştirme, moment-dönme, kesme çatlak genişlikleri ile donatılardaki (çekme, basınç, kesme) şekildeğiştirmeler karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları deney matrisindeki tüm numuneler için çarpma etkisine maruz kalmamış referans bir numunenin deney sonuçları ile karşılaştırılarak açıklanmıştır. Deneyler sonunda çarpmaya maruz kalmış betonarme kirişlerin davranışlarındaki değişim ile çarpma etkisi arasındaki ilişki

belirlenmiştir. Eğilme ve kesme kapasitelerini tamamen kaybetmemiş, farklı süneklik kapasitesine sahip, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin artık yük ve moment taşıma kapasiteleri (residual load bearing capacity) ile sünekliklerindeki değişim incelenmiştir. Çalışmanın sonunda betonarme kirişlerin hasar yoğunluğuna bağlı olarak onarım, güçlendirme veya yeniden imalat gibi önerilerde bulunulmuştur. Bu çalışma kapsamında 7 adet pilot çarpma deneyi, 2 adet pilot statik eğilme deneyi yapılmıştır. Çalışmaya konu olan kirişler için ise 11'i çarpma, 16 tanesi statik eğilme deneyi olmak üzere toplam 27 deney yapılmıştır. Tüm aşamalar göz önünde bulundurulduğunda ise toplam 36 deney ile deneysel çalışma tamamlanmıştır. Çarpma deneylerinde 16 farklı ölçüm saniyede 25000 veri, statik eğilme deneylerinde ise 20 farklı ölçüm saniyede 8 veri olacak şekilde veri toplama sistemleri aracılığıyla kaydedilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

1. Pilot deneyler ile belirlenen enerji seviyeleri tasarımla ve deney matrisinde öngörülen hasar koşulları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmada seçilen E1, E2 ve E3 enerji seviyelerinin çarpma deneylerinde uygulanması durumunda, kirişlerde gözlemlenen hasar yoğunlukları “ASCE Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, second edition, 2010”da öngörülen hasar seviyeleriyle benzer şekilde gerçekleşmiştir (Tablo 5.1). Bu durum çarpma yüklerinin oldukça iyi öngörüldüğünü göstermektedir.
2. Deneysel çalışmada deney numuneleri eğilme, kesme, kritik ve kritik 2 olmak üzere 4 farklı seriye ayrılmıştır. Tüm kirişler tasarıma uygun eğilme ve kesme davranışları ile eğilmeden kesmeye doğru farklı süneklik kapasitelerine sahip olmaları göz önünde bulundurularak bu serilerde gruplandırılmıştır. Betonarme yüksek dayanımlı referans kirişlere ait statik eğilme sonuçları tasarımla uygun şekilde ve öngörülen betonarme davranış ile göçme mekanizmasına ulaşmıştır. Bu durum betonarme davranışın tasarımla ve deney matrisi ile uyumlu olarak gerçekleştiğini göstermektedir.
3. Çarpma deney düzeneklerinde deney sırasında oluşabilecek olumsuz durumlara karşı alınan önlemler (raylar, sürtünmesiz bağlantı aparatları, rijit yaylar vb.) deneyler esnasında büyük ölçüde başarı göstermiştir. Bu durum

lokal hasarların sınırlı düzeyde kalmasını, geri sekmelerin önlenmesini ve ölçüm cihazlarının büyük ölçüde korunmasını sağlamıştır. Ancak bazı deneylerde kısa devre ve kablo kopması gibi durumların yaşanmasının önüne geçilememiştir. Bu durum çarpma kuvvetlerinin bazı deneylerde belirlenememesine sebep olmuştur. Bununla birlikte uygulanan çarpma kuvvetini ölçmek için yük hücresi kullanılması kablo nedeniyle çıkan aksaklıkları giderebilir.

4. Statik eğilme deney düzeneğinin stabilitesi pilot deneyler ile kontrol edilmiştir. Bununla birlikte deneysel çalışma esnasında mesnet çökmelerinin ve yatay yerdeğiştirmelerin kontrolü de sağlanmıştır. Deney düzeneğinden kaynaklı herhangi bir problem yaşanmadığı ve deney düzeneğinin stabilitesinin oldukça iyi olduğu belirlenmiştir.
5. Eğilme serisindeki numuneler çarpma deneylerinde bir bütün olarak incelendiğinde, uygulanan çarpma enerjisi arttıkça kirişler üzerinde oluşan eğilme hasarının lokalize olduğu, hasarın olduğu bölgenin uzunluğunun azaldığı ve hasarın yığılı plastisite davranışına uygun olarak plastik mafsallık bölgesinde yoğunlaştığı görülmüştür. Ayrıca uygulanan çarpma enerjisinin artmasıyla elde edilen ivme, kuvvet, yerdeğiştirme değerleri büyümüştür ancak en büyük enerjisi seviyesi uygulandığında (H-F-E3), numunede oluşan hasarın etkisiyle ivme ve kuvvet değerlerinde önemli ölçüde azalma tespit edilmiştir. Bu durum numune üzerinde oluşan yoğun hasar nedeniyle kiriş gövdesinde süreksizlik meydana gelmesi ve çarpma etkileriyle oluşan gerilme dalgalarının kiriş (katı cisim) gövdesinde ilerleyememesiyle açıklanmıştır. Bununla birlikte bu serideki deney numunelerinde eğilme hâkim davranış ile birlikte uygulanan çarpma enerjisi ile doğru orantılı şekilde artan kesme çatlakları gözlemlenmiştir. Bu durum sünekliği daha az olan diğer serilerdeki numunelerde betonarme davranışın eğilmeden kesmeye doğru değişebileceğini göstermiştir.
6. Eğilme serisindeki numuneler statik eğilme deneylerinde bir bütün olarak incelendiğinde, uygulanan çarpma enerjisi arttıkça kirişlerin yerdeğiştirme sünekliği, enerji yutma kapasitesi, rijitlik ve dönme kapasitelerinde önemli ölçüde azalma görülmüştür. Bununla birlikte çarpma ve statik deneylerden elde

edilen yerdeğiştirmelerin toplamı da uygulanan çarpma enerjisi arttıkça azalmıştır. Bu serideki numunelerin yük ve moment taşıma kapasitelerinde ise önemli bir değişim tespit edilmemiştir.

7. Kritik serideki numuneler çarpma deneylerinde bir bütün olarak incelendiğinde, aynı çarpma etkisi altında kirişlerde artan boyuna donatı oranına bağlı olarak ivme değerleri azalmıştır. Sadece H-S-E2 kesme numunesinde ivme değerinde artış olmuştur. Ayrıca artan boyuna donatı oranı ile doğru orantılı olarak numunelerde rijitlik artışı olmuş ve bu nedenle mesnet reaksiyonu değerlerinde artış görölmüştür. Bu serideki numunelerde tasarıma uygun eğilme ve kesme davranışları görölmüştür. Ancak H-FS-E2 kesmeli eğilme numunesinde tasarımın ve eğilme deneylerindeki davranışın aksine kesme hâkim davranış gözlemlenmiştir. Bu durum, çok büyük yükleme hızları altında (çarpma veya patlama gibi anlık impuls etkilerinde oluşan) betonarme elemanlarda davranışın ve göçme mekanizmasının doğrudan etkilenecek değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte sabit çarpma enerjisi altında kirişlerdeki boyuna donatının artmasıyla kiriş gövdesinde oluşan kesme çatlaklarına ait genişliklerin arttığı gözlemlenmiştir. Sabit çarpma enerjisi altında kirişlerin davranışının eğilmeden kesmeye geçmesi ile hasar kesme hasarına dönmüş ve kiriş net açıklığında (yükün uygulandığı noktadan mesnetlere kadar) gerçekteşmiştir.
8. Kritik serideki numuneler statik deneylerinde bir bütün olarak incelendiğinde, aynı çarpma etkisi altında kirişlerde yerdeğiştirme sünekliği, enerji yutma kapasitesi, rijitlik ve dönme kapasitelerinde önemli ölçüde azalma görölmüştür. Bu değerlerdeki azalma boyuna donatının artmasıyla daha büyük değerlere ulaşmıştır. Statik deneylerde tasarıma uygun eğilme ve kesme davranışları görölmüştür. Ancak H-FS-E2 kesmeli eğilme numunesinde, referans numune H-FS-R'deki davranışın aksine ve çarpma etkisi altında oluşan kesme hasarı nedeniyle kesme davranışı gözlemlenmiştir. Statik deneylerde kirişleri göçmeye götüren kesme çatlak genişlikleri boyuna donatının artması ile artmıştır. Ancak çarpma etkilerine maruz kalmış kirişlerde kesme çatlaklarına ait genişlikler referans numuneye göre daha küçüktür. Bu durum çarpma etkileri nedeniyle hasar alan numunelerde, geniş

kesme çatlakları oluşmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca çarpma etkisine maruz kalmış numunelerin akma dayanımları ve maksimum yük taşıma kapasitelerinde referans numuneye ait değerler ile karşılaştırıldığında azalma meydana gelmiştir.

9. Kesme serisindeki numuneler çarpma deneylerinde bir bütün olarak incelendiğinde, uygulanan çarpma enerjisi arttıkça kirişler üzerinde oluşan kesme hasarının ve kesme çatlaklarına ait genişliklerin arttığı görülmüştür. Ayrıca bu serideki betonarme kirişler etriyeler arasındaki beton basınç çubuklarının ezilmesiyle ve tasarıma uygun şekilde kesme davranışı ile göçmeye ulaşmıştır. Bununla birlikte uygulanan çarpma enerjisinin artmasıyla elde edilen ivme, kuvvet, yerdeğiştirme değerleri büyümüşür ancak en büyük enerjisi seviyesi uygulandığında (H-S-E3), numunede oluşan kesme hasarın etkisiyle ivme ve kuvvet değerlerinde önemli ölçüde azalma tespit edilmiştir. Bu durum numune üzerinde oluşan yoğun hasar nedeniyle kiriş gövdesinde süreksizlik meydana gelmesi ve çarpma etkileriyle oluşan gerilme dalgalarının kiriş gövdesinde ilerleyememesiyle açıklanmıştır.
10. Kesme serisindeki numuneler statik eğilme deneylerinde bir bütün olarak incelendiğinde, uygulanan çarpma enerjisi arttıkça kirişlerin dayanımında (yük taşıma kapasitesi) ve eğilme rijitiliğinde önemli ölçüde azalma görülmüştür. Bu serideki yerdeğiştirme kapasitelerinde ise önemli bir değişim tespit edilmemiştir. Bununla birlikte çarpma etkilerine maruz kalmış kirişlerde kesme çatlaklarına ait genişlikler referans numuneye göre daha küçüktür. Statik deneylerde kirişleri göçmeye götüren kesme çatlak genişlikleri uygulanan çarpma enerjisiyle ters orantılı şekilde azalmıştır. Bu durum çarpma etkileri nedeniyle hasar alan numunelerde, geniş kesme çatlakları oluşmasından kaynaklanmıştır.
11. Kritik 2 serisindeki numuneler çarpma deneylerinde bir bütün olarak incelendiğinde, aynı çarpma etkisi altında kirişlerde artan boyuna donatı oranına bağlı olarak ivme değerleri azalmıştır. Bununla birlikte aynı kesit ve donatı özelliklerine sahip betonarme kirişlerde uygulanan çarpma hızının artması veya azalmasıyla doğru orantılı olarak ivme değerlerinde değişim görülmüştür. Bu serideki numunelerde tasarıma uygun eğilme davranışı

görülmüştür. H-FS-E2-1.5 numunesi göçme mekanizmasına eğilme davranışı ile ulaşırken, H-FS-E2 kesmeli eğilme numunesinde tasarımın ve eğilme deneylerindeki davranışın aksine kesme hâkim davranış gözlemlenmiştir. Bu durum, çok büyük yükleme hızları altında (çarpma veya patlama gibi anlık impuls etkilerinde oluşan) betonarme elemanlarda davranışın ve göçme mekanizmasının doğrudan etkilenecek değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte sabit çarpma enerjisi altında kirişlerdeki boyuna donatının veya uygulanan çarpma hızının artmasıyla, kiriş gövdesinde oluşan kesme çatlakları genişlemiştir. Sabit çarpma enerjisi altında kirişlerin davranışının eğilmeden kesmeye geçmesi ile hasar kesme hasarına dönmüş ve kiriş net açıklığında (yükün uygulandığı noktadan mesnetlere kadar) gerçekleşmiştir.

12. Kritik 2 serisindeki numuneler statik deneylerinde bir bütün olarak incelendiğinde, aynı çarpma etkisi altında kirişlerde yerdeğiştirme sünekliği, enerji yutma kapasitesi, rijitlik ve dönme kapasitelerinde önemli ölçüde azalma görülmüştür. Bu değerlerdeki azalma boyuna donatının ve uygulanan çarpma hızının artmasıyla (serbest düşme yüksekliğinin artmasıyla) daha büyük değerlere ulaşmıştır. Statik deneylerde tasarıma uygun eğilme davranışı görülmüştür. Ancak H-FS-E2 kesmeli eğilme numunesinde, referans numune H-FS-R'deki davranışın aksine ve çarpma etkisi altında oluşan kesme hasarı nedeniyle kesme davranışı gözlemlenmiştir. Statik deneylerde kirişleri göçmeye götüren kesme çatlak genişlikleri boyuna donatının ve uygulanan çarpma hızının artması ile artmıştır. Bununla birlikte çarpma etkilerine maruz kalmış kirişlerde kesme çatlaklarına ait genişlikler referans numuneye göre daha küçüktür. Bu durum çarpma etkileri nedeniyle hasar alan numunelerde, geniş kesme çatlakları oluşmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca çarpma etkisine maruz kalmış numunelerin akma dayanımları ve maksimum yük taşıma kapasitelerinde referans numuneye göre azalma meydana gelmiştir.
13. Tüm serilerdeki kirişler moment-dönme ilişkileri karşılaştırılarak incelendiğinde, TBDY 2018'de farklı performans seviyeleri için tanımlanan dönme değerlerinin güvenli tarafta kaldığı ancak farklı çarpma etkilerine maruz kalmış betonarme elemanların hedeflenen performans seviyelerini sağlamadan göçmeye ulaşabileceği gözlemlenmiştir.

14. TBDY 2018, ACI 318-14, ve STM’de tanımlanan kesme kuvveti tasarımına göre bu serideki kirişlerin kesme dayanımları karşılaştırıldığında, TBDY 2018’deki teorik kesme dayanımının deney sonuçları ile daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmüş diğer teorik kesme dayanımlarının aşırı güvenli (conservative) tarafta kaldığı gözlemlenmiştir. Ancak kesme serisindeki en yüksek enerji seviyesi için (H-S-E3), STM modelinin deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.
15. Tüm serilerdeki kirişlerin dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji yutma kapasitelerindeki azalmalar ile kalıcı yerdeğiştirmeler, donatılardaki kalıcı şekildeğiştirmeler ve kesme çatlakları göz önünde bulundurulduğunda, E1 ve farklı hızlar için elde edilen E2 çarpma enerji seviyelerine maruz kalmış kirişler onarılabılır ya da güçlendirilebilir olarak, E3 enerji seviyesine maruz kalmış kirişler ise güçlendirilemez olarak değerlendirilmiştir. E1 enerji seviyesi ile oluşan hasar E2’ye göre nispeten daha düşük düzeyde kaldığından eğilme ve kesme çatlakları için farklı çimento ve epoksi enjeksiyonları ile onarım yapabilmek mümkün olabilir. E2 enerji seviyesi ile hasar alan numnelerde ise kritik kesme ve eğilme hasarları olduğundan farklı tiplerde FRP (fiber reinforced polymer) melzemeler ile eğilme ve kesme dayanımları artırılabilir. Bununla birlikte süneklik kapasitesinde gereçeleşebilecek muhtemel azalmalar tolere edilebilir.
16. Deneysel çalışmadan elde edilen dinamik büyütme çarpanı (DIF) ve hasarın oluştuğu bölgenin uzunlu olan $L_{effective}$ literatürdeki tamamlanmış deneysel çalışmalardan elde edilen değerler ile uyumludur.

7.1. Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler

Literatürde tamamlanmış deneysel ve nümerik çalışmalar ile bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışma sonuçları dikkate alındığında, gelecekte yapılması muhtemel çalışmalar aşağıdaki öneriler belirtilmiştir.

1. TBDY 2018’de tanımlanan dönme limitlerinin ve teorik kesme dayanımlarının, çarpma etkilerine maruz kalmış veya kalma riski bulunan

betonarme elemanlar için güncellenmesi, dayanımları, yerdeğiştirme ve dönme kapasiteleri çarpma etkileri nedeniyle azalan betonarme kirişlerin davranışını temsil etmekte daha uyumlu sonuçlar ortaya çıkaracaktır.

2. Bu tez çalışması kapsamında farklı çarpma etkilerine maruz kalmış yüksek dayanımlı kirişlerin dayanımlarında, yerdeğiştirme ve dönme kapasitelerinde, rijitlik ile enerji yutma kapasitelerinde önemli azalmalar belirlenmiştir. Bu durumda yönetmeliklerde öngörülen tasarımın çarpma etkileri sonrasında geçerli olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle mevcut deprem riskleri altında çarpma etkilerine maruz kalmış elemanların tasarımda hedeflenen davranışı göstermesi mümkün değildir. Deprem bölgelerinde yapılan betonarme yapı elemanları için çarpma, darbe veya patlama risklerinin öngörüldüğü durumlar için yeni tasarım kuralları geliştirilmesi, çarpma sonrasında hasarın yoğunluğuna uygun onarım veya güçlendirme metotlarının uygulanması ve bunların yönetmeliklerde yer alması büyük önem arz etmektedir.
3. Çarpma veya darbe kuvvetlerinin ölçümü için vurma başlığı (impactor) üstüne yerleştirilen ivmeölçerlerin sayısının artırılması veya ivmeölçerler yerine çekme ve basınca çalışabilen yüksek kapasiteli hassas yük hücrelerinin kullanılması uygulanan çarpma kuvvetinin daha sağlıklı ölçülmesini sağlayabilir.
4. En yüksek enerjisi seviyesi olan E3 için bazı ivme ve yük değerlerinde beklenmedik düşüşler görülmüştür. Bu durum numune üzerinde oluşan yoğun hasar nedeniyle kiriş gövdesinde süreksizlik meydana gelmesi ve çarpma etkileriyle oluşan gerilme dalgalarının kiriş (katı cisim) gövdesinde ilerleyememesiyle açıklanmıştır. Elde edilen bu sonuçları doğrulamak adına kiriş gövdesinde hasar yoğunluğun olduğu bölge ($L_{effective}$) boyunca birkaç farklı noktada ivme ölçümü yapılması, çalışma sonuçlarını doğrular nitelikte olacaktır.
5. Literatürde yapılan en büyük eksikliklerden biri de yerdeğiştirme ölçümü için mekanik cihazların kullanılmasıdır. Gelecekteki çalışmalarda bu deneysel çalışmada kullanılan ve güvenilirliği ispatlanmış, dinamik ölçüm yapmaya uygun ve kiriş yüzeyine temas etmeyen yerdeğiştirme ölçerler (Lazermetre) kullanılması deneysel çalışmanın güvenilirliğini arttıracaktır.

6. Gelecekte planlanan çalışmalar için uygulanacak çarpma enerjisi, çarpma hızı ve vurma başlığının kütlesi gibi konulara karar vermek ve beklenmedik sonuçlarla karşılaşmamak adına pilot deneyler yapılması gerekmektedir. Pilot deneyler sayesinde muhtemel deney düzeneği problemleri, büyük lokal hasarlar ve göçme mekanizmaları konusunda fikir sahibi olunacaktır.
7. Deneysel çalışmadan elde edilen dinamik büyütme çarpanları (DIF) literatürdeki değerler ile uyumludur ancak bu değer hesaplanırken hasar durumuna bağlı olarak azalması literatürdeki formüllerde göz önüne alınmamıştır. Dinamik büyütme çarpanı ve dinamik yerdeğiştirme değerlerinin değişimi bu çalışmanın ve tamamlanmış diğer deneysel çalışmaların sonuçlarına göre çarpma enerjisi, statik kapasite çarpma hızı, a/d oranı ve V_r/M_r oranı gibi parametrelere bağlı olarak yeniden formülüze edilmelidir.
8. Çarpma deneyleri yüksek iş güvenliği gerektiren katı prosedürlerle uygulanarak yapılmalı, deney sahasına iş güvenliği eğitimi almamış kişiler girmemelidir. Ayrıca deney sahası koruma altına alınmalı ve deney numunelerinden yüksek hızla kopan veya ayrılan parçalar nedeniyle oluşabilecek yaralanmalar ve kazalar önlenmelidir.
9. Gelecekteki çalışmalarda aynı deney prosedürleri, ultra yüksek performanslı betondan üretilmiş numuneler için, derin kırışlar için, yangına maruz kalmış betonarme elemanlar için çarpma kütleleri ve çarpma hızları değişik şekilde uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- Abbas, H., Gupta, N. K., Alam, M. 2004. Nonlinear response of concrete beams and plates under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 30(8), 1039-1053.
- Abrams, D.A. 1917. Effect of Rate of Application of Load on the Compressive Strength of Concrete, *Proceeding of ASTM* 17, Part 2, 364-367.
- ACI Committee 318-14, 2011. Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Adhikary S. D., Fujikake K., Li B. 2015. State-of-the-art review on low-velocity impact response of reinforced concrete beams. *Magazine Concrete Research*, 68: 701–723.
- Adhikary S. D, Li B., and Fujikake K. 2014. Effects of High Loading Rate on Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, V. 111, No. 3: 651-660.
- Adhikary S.D., Li B., Fujikake K. 2015. Residual resistance of impact-damaged reinforced. *Magazine of Concrete Research*, 67: 364–378.
- Adhikary, S. D., Li, B., Fujikake, K. 2012. Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading. *International Journal of Impact Engineering*, 47, 24-38.
- Ahmed, T. U., Ramachandra, L. S., Bhattacharyya S. K. 2001. Elasto-plastic response of free-free beams subjected to impact loads. *International Journal of Impact Engineering*, 25, 661-681.
- Anil O, Akbas O. S., Gezer O., Yimaz C. M., Yorgancilar M. A. 2016. Investigation of the impact behavior of steel and composite pipes with protective layer. *Structural Concrete*, 18: 421–432.
- Anil O., Yilmaz T. 2015. Low velocity impact behavior of shear deficient RC beam strengthened with CFRP strips. *Steel and Composite Structures*, 19(2): 417-439.

- Anil, O., Durucan, C., Erdem, R. T., Yorgancilar, M.A. 2016. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete beams with variable material properties under impact loading. *Construction and Building Materials*, 125, 94-104.
- Arros J., Doumbalski N., 2007. Analysis of aircraft impact to concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*, 277:1241–1249.
- Arsan, Y., 2014. Effects of shear reinforcement on the impact behavior of reinforced concrete slabs. Graduate School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, Master Thesis.
- Arslan, A. 1995. Mixed-mode fracture performance of fibre reinforced concrete under impact loading. *Materials and Structures*, 28(8): 473-478.
- ASCE Petrochemical. 2010. Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. Task Committee on Blast-Resistant Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division. Second edition.
- Atchly, B.L. and Furr, H.L. 1967. Strength and energy absorption capacity of plain concrete under dynamic and static loading. *ACI Journal*, 745-756.
- Banthia, N., Mindess, S., Bentur, A., Pigeon, M. 1989. Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine. *Experimental Mechanics*, 29(1): 63-69.
- Bao X, Li B. 2010. Residual strength of blast damaged reinforced concrete columns. *International Journal of Impact Engineering*, 37: 295–308.
- Barr, B., Baghli, A. 1988. A repeated drop-weight impact testing apparatus for concrete. *Magazine of Concrete Research*, 40(144): 167-176.
- Barr, B., Bouamrata, A. 1988. Development of a repeated drop-weight impact testing apparatus for studying fibre reinforced concrete materials. *Composites*, 19, 453-466.
- Batarlar, B. 2013. Behavior of reinforced concrete slabs subjected to impact loads. Graduate School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, Master Thesis.
- Bischoff, P. H., Perry, S. H. 1995. Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression. *Journal of Engineering Mechanics*, 121(6): 685-693.
- Cağaloğlu, N.Ç. 2010. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures subjected to impact loads. Graduate School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, Master Thesis.

- Chopra A. K. 2015. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Fourth Edition.
- Coşgun, S.İ. 2014. Betonarme plakların darbe yükü etkisindeki davranışlarının sayısal olarak incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Cotsovos, D. M., and Pavlovic M. N. 2008. Numerical investigation of concrete subjected to high rates of uniaxial tensile loading. *International Journal of Impact Engineering*, 35(5): 319–335.
- Cotsovos, D. M., and Pavlovic M. N. 2008. Numerical investigation of concrete subjected to compressive impact loading. Part 1: A fundamental explanation for the apparent strength gain at high loading rates. *Computers and Structures*, 86(1–2): 145–163
- Cotsovos, D. M., and Pavlovic M. N. 2008. Numerical investigation of concrete subjected to compressive impact loading. Part 2: Parametric investigation of factors affecting behavior at high loading rates. *Computers and Structures*, 86(1–2): 164–180.
- Cotsovos, D. M. 2010. A simplified approach for assessing the load-carrying capacity of reinforced concrete beams under concentrated load applied at high rates. *International Journal of Impact Engineering*, 37, 907–917.
- Dancygier A. N., Katz A., Yardimci Y. M., Yankelevsky Z. D. 2012. Behavior of high ductility cement composite beams under low impact. *International Journal of Protective Structures*, 3(2): 177–191.
- Dancygier A. N., Yankelevsky D. Z., Baum H. 1999. Behavior of RC walls with interior plaster coating under exterior hard projectile impact. *ACI Mater. Journal*, 96(1): 116–25.
- Dancygier A. N., Yankelevsky D. Z., Jaegermann C. 2007. Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 34: 1768–1779.
- Dancygier, A.N. and Yankelevsky, D.Z. 1996. High strength concrete response to hard projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*. 18(6): 583–599.
- Delhomme, F., Mommessin, M., Mougin, J. P., Perrotin, P. 2005. Behavior of a structurally dissipating rock-shed: experimental analysis and study of punching effects. *International Journal of Solids and Structures*, 42(14): 4204–4219.

- Demir, A., Caglar, N., Ozturk, H. 2019. Parameters affecting diagonal cracking behavior of reinforced concrete deep beam. *Engineering Structures*, Vol.184, 217-231.
- Do V. T., Pham M. T., Hao H. 2019. Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact. *Engineering Structures*. 183: 443-458.
- Doğangün, A. 2019. *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*, İstanbul: Birsen Yayınevi, İstanbul.
- EN 12390-1. 2002. Testing hardened concrete-Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds. European Committee for Standardization.
- EN 12390-2. 2002. Testing hardened concrete-Part 2: Making and curing specimens for strength tests. European Committee for Standardization.
- EN 12390-3. 2002. Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens European Committee for Standardization.
- EN 12390-4. 2002. Testing hardened concrete-Part 4: Compressive strength-specification for testing machines. European Committee for Standardization.
- Erdem, R.T. 2013. Farklı kesit boyutlarına sahip beton ve betonarme elemanların çarpma etkisi altında incelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Erki, M. A., Meier, U. 1999. Impact loading of concrete beams externally strengthened with CFRP laminates. *Journal of Composites for Construction*, 3(3): 117-124.
- Ersoy, U., Özcebe, G., Tankut, T. 2012. *Reinforced Concrete*. Metu Press, İstanbul.
- Fan W., Liu B. T., Huang X., Sun Y. 2019. Efficient modeling of flexural and shear behaviors in reinforced concrete beams and columns subjected to low-velocity impact loading. *Engineering Structures* 195:22–50.
- Fan W., Shen D., Yang T., Shao X. 2019. Experimental and numerical study on low-velocity lateral impact behaviors of RC UHPFRC and UHPFRC-strengthened columns. *Engineering Structures*, 191: 509–525.
- Fujikake, K., Li, B., Soeun, S. 2009. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation. *Journal of Structural Engineering*, 135(8): 938-950.

- Gholipour G., Zhang C., Mousavi A. A. 2018. Effects of axial load on nonlinear response of RC columns subjected to lateral impact load: Ship-pier collision. *Engineering Failure Analysis*, 91: 397-418.
- Goldston, M., Remennikov, A., Neaz S., M. 2016. Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 113, 220-232.
- Gómez-del Rio, T., Zaera, R., Barbero, E., Navarro, C. 2005. Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature. *Composites Part B: Engineering*, 36(1): 41-50.
- Grime, G. 1934. The measurement of impact stresses in concrete. *Proceedings of the Physical Society*, Vol. 46(2): 196-203.
- Gültop, T., Yılmaz, M. C., Alyavuz, B. 2015. Çarpma yükü altındaki rijit plastik kırışların analitik olarak incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1).
- Gurbuz, T., İlki, A., Thambiratnam, D.P. and Perera N., 2019. Low-elevation impact tests of axially loaded reinforced concrete columns *ACI Structural Journal*, 116-S11, 118-128.
- Habel, K., Gauvreau, P. 2009. Behavior of reinforced and post-tensioned concrete members with a UHPFRC overlay under impact loading. *ASCE Structural Journal*, 135(3): 292-300.
- Huawei L., Yi Chen W., Hao H. 2019. Dynamic response of precast concrete beam with wet connection subjected to impact loads. *Engineering Structures*, 166, 247-263.
- İlki, A., Saatçi, S. ve Gürbüz T. 2015. Betonarme elemanların darbe yükleri altındaki davranışları ve lifli polimer kompozitler ile güçlendirilmesi, TÜBİTAK-114M087, İstanbul.
- Isaac, P., Darby, A., Ibell, T., Evernden, M., 2017. Experimental investigation into the force propagation velocity due to hard impacts on reinforced concrete members. *International Journal of Impact Engineering*, 100, 131-138.
- Jin L., Lan Y., Zhang R., Du X. 2019. Impact performances of RC beams at/after elevated temperature: A meso-scale study. *Engineering Failure Analysis*, 105, 196-214.

- Jordan, J. B., Naito, C. J. 2014. An experimental investigation of the effect of nose shape on fragments penetrating GFRP. *International Journal of Impact Engineering*, 63, 63-71.
- Kantar E. 2009. CFRP ile güçlendirilmiş beton kirişlerin çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Khalighi, Y., Banthia, N. 2011. A Study of FRP–Concrete Bond under Impact. *Applied Mechanics and Materials*, 82, 630-635.
- Kishi N., Mikami H. 2012. Empirical formulas for designing reinforced concrete beams under impact loading. *ACI Structural Journal*, 109(4): 509-519.
- Kishi, N., Bhatti, A. Q. 2010. An equivalent fracture energy concept for nonlinear dynamic response analysis of prototype RC girders subjected to falling-weight impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 37, 103-113.
- Kishi, N., Mikami, H., Matsuoka, K.G., Ando, T. 2002. Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar. *International Journal of Impact Engineering*, 27, 955-968.
- Kluge R.W. 1943, Impact resistance of reinforced concrete slabs. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 14(5): 397-412.
- Koç, U. 2008. Plakların darbe yükü altında analizi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Korucu H., Irfanlioglu A. 2018. Response of reinforced concrete beams to high-velocity fluid impact. Part I: Experiments. *Structural Concrete*. 19, 1101-1114.
- Krauthammer T., Astarlioglu S., Blasko J., Shoh T. B., Ng P. H. 2008. Pressure–impulse diagrams for the behavior assessment of structural components. *International Journal of Impact Engineering*, 35, 771–783.
- Lee Y. J., Shin H-O., Yoo D-Y., Yoon Y-S. 2018. Structural response of steel-fiber-reinforced concrete beams under various loading rates. *Engineering Structures*, 156, 271–283.
- Liao, W., Li, M., Zhang, W., Tian, Z. 2017. Experimental studies and numerical simulation of behavior of RC beams retrofitted with HSSWM-HPM under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 125, 94-104.
- Liu B., Fan W., Gua W., Chen B., Liu R. 2017. Experimental investigation and improved FE modeling of axially-loaded circular RC columns under lateral impact loading. *Engineering Structures*, 152:619-642.

- Louw, J. M., Maritz, G., Loedolff, M. J. 1992. The behaviour of RC columns under impact loading. South African Institution of Civil Engineering (SAICE), 34(11): 371-378.
- Macneely, D.J. and Lash, S.D. 1963. Tensile strength of concrete under dynamic and static loading, ACI Journal, 60 (6): 751-760.
- Marar, K., Eren, Ö., Celik, T. 2001. Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete. Materials Letters, 47(4): 297-304.
- Mörsh E. 1909. Concrete-Steel Construction (Der Eisenbeton-bau), English translation of the 3rd German edition, McGraw-Hill, Book Co., New York.
- Mougin, J. P., Perrotin, P., Mommessin, M., Tonnelo, J., Agbossou, A. 2005. Rock fall impact on reinforced concrete slab: an experimental approach. International Journal of Impact Engineering, 31(2): 169-183.
- Murtiadi, S., Marzouk, H. 2001. Behaviour of high-strength concrete plates under impact loading. Magazine of Concrete Research, 53(1): 43-50.
- Mylrea, T.D., 1940. Effect of impact on reinforced concrete beams. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 36, 581-594.
- Nataraja, M. C., Nagaraj, T. S., Basavaraja, S. B. 2005. Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance. Cement and Concrete Research, 35(12): 2350-2359.
- Ong, K. C. G., Basheerkhan, M., Paramasivam, P. 1999. Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact. Cement and Concrete Composites, 21(5): 391-401.
- Park J.Y., Kim M.S., Scanlon A., Choi H. and Lee Y.H. 2014. Residual strength of reinforced concrete columns subjected to blast loading. Magazine of Concrete Research, 66(2): 60–71.
- Pham, T. M., Hao, H., 2016. Review of Concrete Structures Strengthened with FRP against Impact Loading. The Institution of Structural Engineers, 7, 59-70.
- Pham, T.M., Hong, H. 2017. Effect of the plastic hinge and boundary conditions on the impact behavior of reinforced concrete beams. International Journal of Impact Engineering, 102, 74-85.

- Priestley, M.J.N. 1998. Displacement-Based Approaches to Rational Limit States Design of New Structures. Keynote Address, Proceedings 11 European Conference Earthquake Engineering, Paris.
- Priestly M. J N. 2000. Performance Based Seismic Design. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, 2831, 1-22.
- Ramanna-Sanjeevaiah, N., 2012. Static and impact load response of reinforced concrete beams and slabs with nsm-cfrp retrofitting. Old Dominion University, Department Of Civil and Enviromental Engineering, PhD Thesis.
- Remennikov, A., Kaewunruen, S. 2006. Impact resistance of reinforced concrete columns: experimental studies and design considerations. 19th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Nov. 29 – Dec. 1, 817-824, Christchurch, New Zealand.
- Riera J. D, Iturrioz I. 1998. Discrete elements model for evaluating impact and impulsive response of reinforced concrete plates and shells subjected to impulsive loading. Nuclear Engineering and Design, 179, 135–144.
- Saatci, S., Vecchio, F. J. 2009. Effects of shear mechanisms on impact behavior of reinforced concrete beams. ACI Structural Journal, 106(1): 78-86.
- Sadraie H., Khaloo A., Soltani H. 2019. Dynamic performance of concrete slabs reinforced with steel and GFRP bars under impact loading. Engineering Structures, 191, 62–81.
- Satadru D. A., Li, B., Fujikake, K. 2012. Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading. Journal of Structural Engineering, 135(8): 938-950.
- Sezer, C. 2018. Cfrp şeritler ile güçlendirilmiş betonarme plakların çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Sharma, H., Hurlebaus, S., Gardoni, P. 2012. Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact. International Journal of Impact Engineering, 43, 52-62.
- Suaris, W., Shah, S. P. 1983. Properties of concrete subjected to impact. Journal of Structural Engineering, 109(7): 1727-1741.

- Sukontasukkul, P., Mindess, A. S., Banthia, N. 2002. Penetration Resistance Of Hybrid Fibre RC Under Low Velocity Impact Loading. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, 5-8 June, 187-195, Montréal, Québec, Canada.
- Tang, T., 2002. Behavior of concrete beams retrofitted with composite laminates under impact loading. The University of Arizona Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, PhD Thesis.
- TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- TS 500. 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS 708. 2010 Donatı Çeliği ve Beton Özellikleri. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 206 2017. Beton-Özellik, performans, imalat ve Uygunluk, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Ulzurrun S.D. G., Zanuy C. 2017. Enhancement of impact performance of reinforced concrete beams without stirrups by adding steel fibers. Construction and Building Materials, 145, 166-182.
- Ulzurrun S.D. G., Zanuy C. 2017. Flexural response of SFRC under impact. Construction and Building Materials, 134, 397-411.
- Uzer, T. 2015. Behavior of axial loaded RC columns subjected to impact loading Istanbul Technical University, Earthquake Engineering and Disaster Management Institute, Master Thesis.
- Wang W., Morgenthal G. 2017. Dynamic analyses of square RC pier column subjected to barge impact using efficient models. Engineering Structures, 151, 20-32.
- Wang W., Morgenthal G. 2018. Reliability analyses of RC bridge piers subjected to barge impact using efficient models. Engineering Structures, 166, 485-495.
- Watstein, D. 1953. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete, ACI Journal, 49(8): 729-756.
- Wight, J. K. 2016. Reinforced Concrete Mechanics and Design. New Jersey: Pearson Education Inc.

- Williamson E. B., Bayrak O., Davis C., Williams D. G. 2011. Performance of bridge columns subjected to blast loads. I: Experimental program. ASCE Journal of Bridge Engineering, 16(6): 693-702.
- Williamson E. B., Bayrak O., Davis C., Williams D. G. 2011. Performance of bridge columns subjected to blast loads. II: Results and recommendations. ASCE Journal of Bridge Engineering, 6(6): 703-710.
- Yaşayanlar, S., 2015. Impact resistance of steel fiber reinforced concrete slabs. Graduate School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, Master Thesis.
- Yazıcı, Y.E., 2017. Farklı oranda fiber katkılı betonla doldurulmuş çelik kutu elemanlarının darbe yükü etkisi altında incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Yılmaz C., Demir, A., Dok, G., Öztürk, H., Çağlar, N. 2017. Yüksek Yük Kapasiteli Statik Deneyler İçin Mevcut Bir Eğilme Çerçevesinin Güçlendirilmesi. International Conference on Technology, Engineering and Science, Antalya, 612-616.
- Yılmaz C., Dok, G. (2016). Farklı Çapma Etkilerine Maruz Kalmış Betonarme Kirişlerin Davranışının Belirlenmesi. 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Antalya, 1413-1419.
- Yılmaz, M.C., 2014. Betonarme kirişlerin darbe yükü etkisinde davranışlarının deneysel ve analitik olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Yılmaz, T., 2013. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Yılmaz, T., 2018. “Betonarme kolonların çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Yılmaz, T., Kirac N., Anil Ö. and Sezer C. 2017. Experimental Investigation of Low Velocity Impact Behaviour of RC Two Way Slab Strengthening with CFRP Strips. 7th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Pavia, Italy.
- Yoo, D. Y., Banthia, N. 2017. Size-dependent impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams. Construction and Building Materials. 142, 363-375.

- Yoo, D. Y., Banthia, N., Kim, S. W., Yoon, Y. S. 2015a. Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 126, 233-245.
- Yoo, D. Y., Yoon, Y. S., Banthia, N. 2015b. Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate. *Cement and Concrete Composites*, 64, 84-92.
- Yorgancılar, M.A. 2016. Çimento bağlayıcılı kompozit beton kirişlerin çarpışma davranışının deneysel olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Zanuy C, Ulzurrin S.D. G. Residual behavior of reinforced steel fiber-reinforced concrete beams damaged by impact. *Structural Concrete*. 2018; 1–17.
- Zhai, C., Chen, L., Xiang, H., Fang, Q. 2016. Experimental and numerical investigation into RC beams subjected to blast after exposure to fire. *International Journal of Impact Engineering*, 97, 29-45.
- Zhan, T., Wang, Z., Ning, J. 2015. Failure behaviors of reinforced concrete beams subjected to high impact loading. *Engineering Failure Analysis*, 56, 233-243.
- Zhang C., Gholipour G., Mousavi A. A. 2019. Nonlinear dynamic behavior of simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading. *Engineering Structures*, 181, 124-142.
- Zhang, X. X., Elazim, A. A., Ruiz, G., Yu, R. C. 2014. Fracture behaviour of steel fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates. *International Journal of Impact Engineering*, 71, 89-96.
- Zhao P., Xie L., He B., Zhang Y. 2018. Experimental study of rock-sheds constructed with PE fibres and composite cushion against rockfall impacts. *Engineering Structures*, 177, 175–189.
- Zineddin, M., Krauthammer, T. 2007. Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 34(9): 1517-1534.

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan DOK, 1986 yılında İstanbul/Bakırköy’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 2004 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2009 yılında bitirdi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deprem Mühendisliği programında 2009 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2011 yılında tamamladı. 2011 yılında Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) kapsamında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2012 yılında başladığı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı’ndaki doktora eğitimine Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde devam etti.