

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KOLONLARIN DARBE ETKİSİ ALTINDA
PERFORMANSININ VE ARTIK KAPASİTENİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Abdullah CENGİZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

MART 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KOLONLARIN DARBE ETKİSİ ALTINDA
PERFORMANSININ VE ARTIK KAPASİTENİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Abdullah CENGİZ
(501112014)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin AYDOĞAN

MART 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DETERMINATION OF THE PERFORMANCE AND RESIDUAL CAPACITY
OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER IMPACT EFFECT**

Ph.D. THESIS

**Abdullah CENGİZ
(501112014)**

Department of Civil Engineering

Structural Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Metin AYDOĞAN

MARCH 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501112014 numaralı Doktora Öğrencisi Abdullah CENGİZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BETONARME KOLONLARIN DARBE ETKİSİ ALTINDA PERFORMANSININ VE ARTIK KAPASİTENİN BELİRLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Metin AYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Konuralp GİRĞİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alper İlki
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 04 Ocak 2024
Savunma Tarihi : 19 Mart 2024





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmasının her aşamasında benden desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, karşılaştığım her sorunda çözüm önerileri ile bana yol gösteren, lisansüstü öğrenimimi borçlu olduğum, beraber çalışmaktan ve öğrencisi olmaktan gurur duyduğum, çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Metin AYDOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Tez çalışmasının yürütülmesinde katkılarını esirgemeyen, yönlendirmeleriyle çalışmayı zenginleştiren ve yaşadığım zorluklar nedeniyle anlayış gösteren çok kıymetli hocalarım Prof. Dr. Konuralp GİRGİN ve Prof. Dr. Güray ARSLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın başından sonuna kadar her türlü desteği sağlayan, engin bilgi ve tecrübelerinden sürekli faydalandığım çok değerli hocam Prof. Dr. Alper İLKİ'ye teşekkürü borç bilirim.

Deneysel çalışmanın her anını birlikte yürüttüğümüz, çalışmanın başından sonuna kadar her türlü maddi, manevi ve teknik desteği sağlamaktan kaçınmayan, bu tez çalışmasının öncülü olan çalışmalarıyla kendisinden sürekli olarak istifade ettiğim kıymetli hocam Arş. Gör. Dr. Tuba GÜRBÜZ BÜYÜKKAYIKÇI'ya şükranlarımı sunarım.

Deney sisteminin kurulumunda desteklerini esirgemeyen, deney tecrübeleriyle çalışmaya katkı sağlayan kıymetli ağabeyim İnş. Yük. Müh. Ergün BİNBİR'e, İnş. Yük. Müh. Hakan SARUHAN, İnş. Yük. Müh. M.Fatih ŞAHİN ve Turgay ÖZGÜNAY'a, İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı ile İTÜ Yapı Malzemeleri Laboratuvarı çalışanlarına, deney numunelerinin üretiminde desteğini esirgemeyen Yavuz ARMAĞAN'a ve Armağan İnşaat çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2024

Abdullah CENGİZ
(İnş. Yük. Müh.)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxvii
SUMMARY	xxxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Konusu	1
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. DENEY PROGRAMI	37
3.1 Giriş	37
3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması	38
3.3 Numunelerin Malzeme Özellikleri	40
3.4 Deney Düzenekleri ve Ölçüm Cihazları.....	42
4. DENEY SONUÇLARI.....	47
4.1 Giriş	47
4.2 Statik Deney Sonuçları	48
4.3 Darbe Deneyi Sonuçları	50
4.3.1 Imp-H200 numunesi	50
4.3.2 Imp-H300 numunesi	53
4.3.3 Imp-H350 numunesi	55
4.3.4 Imp-H400 numunesi	58
4.3.5 Imp-H450 numunesi	61
4.3.6 Imp-H500 numunesi	63
4.4 Darbe Deneyi Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	66
4.4.1 Eksenel yükün karşılaştırılması	66
4.4.2 Mesnet tepkilerinin karşılaştırılması	66
4.4.3 Yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması	69
4.4.4 Hasar şekillerinin karşılaştırılması.....	70
5. ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ	73
5.1 Giriş	73
5.2 Artık Kapasite Deney Sonuçları.....	73
5.2.1 Imp-H300-Res numunesi	73
5.2.2 Imp-H350-Res numunesi	75
5.2.3 Imp-H400-Res numunesi	77
5.3 Artık Yük Kapasitelerinin Karşılaştırılması.....	78

6. EKSENEL YÜK DÜZEYİNİN DARBE DAVRANIŞINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ	83
6.1 Giriş	83
6.2 Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması	84
6.3 Kurulan Sonlu Eleman Modelinin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması.....	85
6.4 Eksenel Yük Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi	90
6.4.1 Eksenel yükün bulunmadığı (%0) duruma ait sonlu eleman analizleri.....	90
6.4.2 Eksenel yükün %10 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri	95
6.4.3 Eksenel yükün %20 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri	100
6.4.4 Eksenel yükün %30 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri	106
6.4.5 Eksenel yükün %40 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri	111
6.4.6 Eksenel yükün %50 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri	114
6.5 Eksenel Yük Değişimi Etkisinin Sayısal Olarak Karşılaştırılması.....	118
6.5.1 Mesnet tepkilerinin karşılaştırılması	118
6.5.2 Yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması	122
6.5.3 Hasar şekillerinin karşılaştırılması	124
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
KAYNAKLAR.....	133
EKLER	137
ÖZGEÇMİŞ	145

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaşım Yetkilileri Birliği)
CFRP	: Karbon lifli polimer
CFST	: Concrete Filled Steel Tube (Beton dolgulu çelik tüp)
CMC	: Conventional Monolithic Column (Geleneksel monolitik kolon)
CMM	: Coupled Multi-Degree-of-Freedom Model (Bağlı çok serbestlik dereceli model)
DI	: Damage Index (Hasar İndeksi)
DIF	: Dynamic Increase Factor (Dinamik artış faktörü)
DRI	: Damage Ratio Indice (Hasar Oran İndisi)
EC_{ESF}	: Eurocode equivalent static force (Eurocode statik eşdeğer kuvveti)
ESF	: Equivalent Static Force (Eşdeğer statik kuvvet)
FBIM	: Full Barge Impact Model (Kapsamlı gemi darbe modeli)
FRP	: Lifli polimer
LRFD	: Load and Resistance Factor Design (Yük ve Direnç Faktör Tasarımı)
PCSBC	: Precast Concrete Segmental Bridge Column (Prekast beton segmental köprü kolonu)
PDF	: Peak Dynamic Force (Maksimum dinamik kuvvet)
PIF	: Peak Impact Force (Maksimum darbe kuvveti)
PTMSA	: Peak of the twenty-five mili second moving average (25 ms maksimum hareketli ortalama)
RCBC	: Reinforced Concrete Bridge Column (Betonarme köprü kolonu)
SB_{ESF}	: Stiffness-Based Equivalent Static Force (Rijitlik esaslı eşdeğer statik kuvvet)
UHPFRC	: Ultra yüksek performanslı fiber takviyeli beton



SEMBOLLER

A_c	: Enkesit alanı
A_{sw}	: Donatı alanı
b_w	: Kesit genişliği
b_x, b_y	: Kolon kenar ölçüleri
d	: Etkili kesit yüksekliği
E	: Darbe enerjisi
f_{ctm}	: Betonun çekme dayanımı
f_{cm}	: Beton basınç dayanımı
F_p	: Maksimum darbe kuvveti
F_{su}	: Statik eğilme dayanımı
f_{yk}	: Çeliğin karakteristik akma dayanımı
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Yükseklik
m	: Ağırlık
N	: Eksenel yük
n	: Eksenel yük oranı
N_d	: Tasarım eksenel yükü
P_{dyn}^{max}	: Dinamik kesme kapasitesi
P_s	: Eşdeğer statik yük
s	: Etriye aralığı
v	: Hız
V_{cr}	: Betonarme kesitin kesmede çatlama dayanımı
V_e	: Kesitin eğilme kapasitesine ulaştığı anda oluşan maksimum kesme kuvveti
V_r	: Kesme dayanımı
V_w	: Kesme donatısı katkısı
α	: Kesme/eğilme dayanım oranı
ρ_{min}	: Minimum donatı oranı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Benzer yayınlara ait temel değişkenler	35
Çizelge 3.1 : Deney matrisi	37
Çizelge 3.2 : Beton ve donatılara ait mekanik özellikler.....	41
Çizelge 4.1 : Deney veri tablosu.....	41
Çizelge 4.2 : Deney sonuçları.....	41
Çizelge 5.1 : Yük taşıma kapasiteleri ve yerdeğiştirmeler	79
Çizelge 5.2 : Sekant rijitlik değeri.....	80
Çizelge 6.1 : Sayısal çalışmaya ait deney matrisi.....	83
Çizelge 6.2 : Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının karşılaştırılması.....	89
Çizelge 6.3 : Maksimum yerdeğiştirmeler (mm).....	123
Çizelge 6.4 : Kalıcı yerdeğiştirmeler (mm)	123



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Betonarme bir yapıda darbe hasarı örneği.....	1
Şekil 2.1	: (a) Numunelerin şematik gösterimi, (b) deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ye ve diğ., 2020)	5
Şekil 2.2	: (a) Numune detayları, (b) sonlu eleman modeli ile deneysel sonuçların karşılaştırılması (Li ve diğ., 2020).....	6
Şekil 2.3	: (a) Deney düzeneğinin şematik gösterimi, (b) deney sonuçlarının AASHTO-LRFD formülü ile karşılaştırılması (Cai ve diğ., 2018)	7
Şekil 2.4	: (a) Deney düzeneği, (b) deney matrisi, (c) deney sonuçları (Demartino ve diğ., 2017)	8
Şekil 2.5	: (a) Deney düzeneği, (b) farklı sonlu eleman modelleri sonuçlarıyla deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması (Liu ve diğ., 2017).....	8
Şekil 2.6	: Deneysel sonuçlar (Wang ve diğ., 2011).....	10
Şekil 2.7	: Darbe etkisi sonucu yerdeğiştirmeler (Remennikov ve Kaewunruen, 2006).....	10
Şekil 2.8	: (a) Deney düzeneği, (b) darbe etkisi sonrası çatlak haritası (Gurbuz ve diğ., 2019).....	11
Şekil 2.9	: (a) Deneysel sonuçlara göre hasar durumu, (b) deney sonuçları ile sonlu eleman modelinin karşılaştırılması (Chen ve diğ., 2016)	12
Şekil 2.10	: (a) Deney matrisi, (b) hasarın gelişimi (Demartino ve diğ., 2017) ...	13
Şekil 2.11	: (a) Deney düzeneği, (b) deney sonuçları (Yılmaz ve diğ., 2019)	14
Şekil 2.12	: (a) Deney matrisi, (b) darbe etkisi sonrası ve eksenel yükleme sonrası deneysel sonuçlarla sayısal sonuçların kıyaslanması (Fan ve diğ., 2019)	15
Şekil 2.13	: Darbe sonrası hasar modları (Zhou ve diğ., 2021)	16
Şekil 2.14	: Deneysel çalışmaya ait (a) kolon kesitleri, (b) hasar durumları (AL-Bukhaiti ve diğ., 2022)	17
Şekil 2.15	: (a) Deneysel çalışmada kullanılan numuneler (b) dinamik artış faktörlerinin (DIF) karşılaştırılması (Mirmomeni ve diğ., 2016)	18
Şekil 2.16	: Deney sonrası hasar durumları (Wei ve diğ., 2019).....	19
Şekil 2.17	: Farklı darbe hızlarına ait hasar modları (a) 2.95 m/s, (b) 5.38 m/s, (c) 5.49 m/s, (d) 6.17 m/s (Song ve diğ., 2023)	19
Şekil 2.18	: Şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi (a) kütle düşme yüksekliği 30 cm, (b) kütle düşme yüksekliği 80 cm (Chen ve diğ., 2023).....	20
Şekil 2.19	: Betonarme kolonların ve kompozit kolonların farklı eksenel yük oranları (0, 0.3, 0.5) altında hasar durumları (Ye ve diğ., 2022).....	21
Şekil 2.20	: (a) Numunelerin şematik gösterimi, (b) deney düzeneğinin şematik gösterimi. (Zhang ve diğ., 2016).....	21
Şekil 2.21	: (a) Deney düzeneği, (b) sonlu eleman modelleri. (Yunlei ve diğ., 2019)	22

Şekil 2.22	: (a) Kolon sonlu eleman modeli, (b) kolon ortasına darbe uygulanması durumunda farklı eksenel yük seviyeleri için hasar durumları. (Gholipour ve diğ., 2018)	23
Şekil 2.23	: (a) Kolon sonlu eleman modeli, (b) 50, 150, 300 mm etriye aralıklı ve 900 mm çaplı kolona, 120 km/sa hızla araç çarpması durumu. (Auyeung ve diğ., 2019)	24
Şekil 2.24	: (a) AASHTO-LRFD için önerilen hesap yöntemi, (b) Eurocode için önerilen hesap yöntemi. (Abdelkarim ve diğ., 2017).....	25
Şekil 2.25	: PIF etkisinde kolonun tepkisi ve hasar sınıflandırması. (Do ve diğ., 2019)	26
Şekil 2.26	: (a) C1 ve C2 kolonlarına ait çarpma senaryoları, (b) C1 ve C2 kolonlarının P1 performans seviyesindeki dinamik kesme kapasitesi (MN), (c) C1 ve C2 kolonlarının dinamik kesme talebi. (Sharma ve diğ., 2012)	27
Şekil 2.27	: (a) Gemi darbesi modelinin CMM'ye dönüşümü, (b) Farklı darbe konumlarına ait FBIM, CMM1 ve CMM2 modellerine ait maksimum darbe kuvvetleri, maksimum tepe yerdeğiştirmeleri, maksimum eğilme momentlerinin karşılaştırılması (Wang ve Morgenthal, 2017)	28
Şekil 2.28	: (a) Sonlu eleman modelleri, (b) eksenel yük oranı ve maksimum yerdeğiştirme ilişkisi (Sohel ve diğ., 2020)	29
Şekil 2.29	: (a) Sonlu eleman modelleri, (b) segmental düğüm noktası analizi (Do ve diğ., 2019)	30
Şekil 2.30	: (a) Farklı beton basınç dayanımlarındaki segmental kolonların darbe etkisi altındaki gerilme durumları, (b) 70km/s hızla çarpan aracın kolonda oluşturduğu yanıl yerdeğiştirmeler (Do ve diğ., 2018)	31
Şekil 2.31	: Moment-eğrilik ilişkisi (Hu ve diğ., 2021).....	32
Şekil 2.32	: Kolonlara ait gerilme durumları (Tantrapongsaton ve diğ., 2022).....	33
Şekil 2.33	: Kolonlara ait gerilme durumları (a) H-DS, (b) S-DS, (c) S-ST, (d) R-ST, (e) RC (Li ve diğ., 2023)	34
Şekil 3.1	: Numunelerin isimlendirilmesi	37
Şekil 3.2	: Kolon boyutları ve donatı detayları	38
Şekil 3.3	: Gerinim ölçerlerin (gerinim pulu, strain gauge) yerleştirildiği bölgeler	39
Şekil 3.4	: (a) Kalıp imalatları, (b) kolon donatı imalatları, (c)-(d) donatı silimi	39
Şekil 3.5	: (a) Gerinim ölçerin yerleştirilmesi , (b) ilk kat yalıtımın yapılması, (c) ikinci ve üçüncü kat yalıtımın yapılması, (d) beton dökümü.....	40
Şekil 3.6	: Beton basınç deneyi ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi	40
Şekil 3.7	: Enine donatı çekme deneyi ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	41
Şekil 3.8	: Boyuna donatı çekme deneyi ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri....	41
Şekil 3.9	: Darbe yükleme sisteminin şematik gösterimi	42
Şekil 3.10	: Darbe yükleme sisteminin üç boyutlu gösterimi	43
Şekil 3.11	: Yükleme sisteminin (a) genel görünümü, (b) darbe ağırlığı, (c) batı mesneti, (d) doğu mesneti	43
Şekil 3.12	: Dinamik data toplama sistemi (a) genel görünüm, (b) data analizi....	44
Şekil 3.13	: Statik yükleme sisteminin şematik gösterimi	44
Şekil 3.14	: Yükleme sisteminin (a) genel görünümü, (b) yükleme şekli.....	45
Şekil 3.15	: Statik data toplama sistemi (a) genel görünüm, (b) data analizi.....	45
Şekil 4.1	: Ölçüm cihazlarının yerleşimi (ölçüler mm cinsinden)	47
Şekil 4.2	: Yük-yerdeğiştirme ilişkisi	48
Şekil 4.3	: Yerdeğiştirmelerin hasarla değişimi	48

Şekil 4.4	: Statik yüklemeye ait birim şekildeğişimlerin yüklemeye değişimi (a) boyuna donatılar, (b) etriyeler	49
Şekil 4.5	: Statik yüklemeye ait çatlak haritası	49
Şekil 4.6	: Deney sonrası numunenin hasar durumu	49
Şekil 4.7	: Imp-H200 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri	51
Şekil 4.8	: Imp-H200 kolon numunesine ait (a) yerdeğişimlerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğişimler	51
Şekil 4.9	: Imp-H200 kolon numunesine ait birim şekildeğişimler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.....	52
Şekil 4.10	: Imp-H200 kolon numunesine ait çatlak çizimleri	52
Şekil 4.11	: Imp-H200 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe genel görünümü, (d) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi .	53
Şekil 4.12	: Imp-H300 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri	53
Şekil 4.13	: Imp-H300 kolon numunesine ait (a) yerdeğişimlerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğişimler	54
Şekil 4.14	: Imp-H300 kolon numunesine ait birim şekildeğişimler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.....	54
Şekil 4.15	: Imp-H300 kolon numunesine ait çatlak çizimleri	55
Şekil 4.16	: Imp-H300 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe genel görünümü, (d) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi .	55
Şekil 4.17	: Imp-H350 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri	56
Şekil 4.18	: Imp-H350 kolon numunesine ait (a) yerdeğişimlerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğişimler	56
Şekil 4.19	: Imp-H350 kolon numunesine ait birim şekildeğişimler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.....	57
Şekil 4.20	: Imp-H350 kolon numunesine ait çatlak çizimleri	57
Şekil 4.21	: Imp-H350 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi, (d) darbe uygulanan kenar görünümü	58
Şekil 4.22	: Imp-H400 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri	58
Şekil 4.23	: Imp-H400 kolon numunesine ait (a) yerdeğişimlerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğişimler	59
Şekil 4.24	: Imp-H400 kolon numunesine ait birim şekildeğişimler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.....	59
Şekil 4.25	: Imp-H400 kolon numunesine ait çatlak çizimleri	60
Şekil 4.26	: Imp-H400 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi, (d) darbe uygulanan kenar görünümü	60
Şekil 4.27	: Imp-H450 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri	61
Şekil 4.28	: Imp-H450 kolon numunesine ait (a) yerdeğişimlerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğişimler	61

Şekil 4.29	: Imp-H450 kolon numunesine ait birim şekildeğiştirmeler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.....	62
Şekil 4.30	: Imp-H450 kolon numunesine ait çatlak çizimleri	62
Şekil 4.31	: Imp-H450 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi, (d) darbe uygulanan kenar görünümü	63
Şekil 4.32	: Imp-H500 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri	63
Şekil 4.33	: Imp-H500 kolon numunesine ait (a) yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler	64
Şekil 4.34	: Imp-H500 kolon numunesine ait birim şekildeğiştirmeler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.....	64
Şekil 4.35	: Imp-H500 kolon numunesine ait çatlak çizimleri	65
Şekil 4.36	: Imp-H500 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi, (d) darbe uygulanan kenar görünümü	65
Şekil 4.37	: Normal kuvvet-zaman grafiği.....	66
Şekil 4.38	: Ortalama mesnet tepkisi-zaman grafiği.....	67
Şekil 4.39	: Mesnet tepkisi-zaman grafikleri, (a) doğu mesneti, (b) batı mesneti, (c) toplam	68
Şekil 4.40	: Maksimum mesnet tepkisi-darbe enerjisi ilişkisi	69
Şekil 4.41	: Kalıcı yerdeğiştirmeler	69
Şekil 4.42	: Numunelerin çatlak şekilleri (güney cepheden yapılan çizim).....	71
Şekil 4.43	: Numunelerde hasarın gelişimi	71
Şekil 5.1	: Imp-H300-Res numunesinde statik yükleme deneyi.....	74
Şekil 5.2	: Imp-H300-Res numunesinde yerdeğiştirmeler.....	74
Şekil 5.3	: Imp-H300-Res numunesine ait çatlak haritası (mor işaretli bölgeler statik yükleme anında oluşan hasarları göstermektedir)	74
Şekil 5.4	: Imp-H300 numunesine ait statik yükleme sonrası hasar fotoğrafları, (a) darbe sonrası güney cephe görünümü, (b) darbe sonrası kuzey cephe görünümü, (c) statik yükleme sonrası güney cephe görünümü, (d) statik yükleme sonrası kuzey cephe görünümü.	75
Şekil 5.5	: Imp-H350-Res numunesinde statik yükleme deneyi.....	76
Şekil 5.6	: Imp-H350-Res numunesinde yerdeğiştirmeler.....	76
Şekil 5.7	: Imp-H350-Res numunesine ait çatlak haritası (mor işaretli bölgeler statik yükleme anında oluşan hasarları göstermektedir)	76
Şekil 5.8	: Imp-H350 numunesine ait statik yükleme sonrası hasar fotoğrafları, (a) darbe sonrası güney cephe görünümü, (b) darbe sonrası kuzey cephe görünümü, (c) statik yükleme sonrası güney cephe görünümü, (d) statik yükleme sonrası kuzey cephe görünümü.	76
Şekil 5.9	: Imp-H400-Res numunesinde statik yükleme deneyi.....	77
Şekil 5.10	: Imp-H400-Res numunesinde yerdeğiştirmeler.....	77
Şekil 5.11	: Imp-H400-Res numunesine ait çatlak haritası (mor işaretli bölgeler statik yükleme anında oluşan hasarları göstermektedir)	78
Şekil 5.12	: Imp-H400 numunesine ait statik yükleme sonrası hasar fotoğrafları, (a) darbe sonrası güney cephe görünümü, (b) darbe sonrası kuzey cephe görünümü, (c) statik yükleme sonrası güney cephe görünümü, (d) statik yükleme sonrası kuzey cephe görünümü.	78

Şekil 5.13	: Yük-yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 5.14	: Rijitlik değişimi	79
Şekil 5.15	: Darbe etkisi altındaki numunelere ait toplam mesnet tepkisi-yerdeğiştirme ilişkisi.....	80
Şekil 5.16	: (a) Enerji sönümünün karşılaştırılması, (b) statik kapasite kaybı	81
Şekil 6.1	: Sonlu eleman modellerinin isimlendirilmesi.....	83
Şekil 6.2	: Sonlu eleman modelinin kurulumu	84
Şekil 6.3	: (a) F10H200 numunesine ait gerilme durumları, (b) Imp-H200 numunesine ait çatlak çizimleri, (c) Imp-H200 numunesine ait kalıcı hasar durumu, (d) Imp-H200 numunesine ait hasar gelişimi.....	85
Şekil 6.4	: (a) F10H500 numunesine ait gerilme durumları, (b) Imp-H500 numunesine ait çatlak çizimleri, (c) Imp-H500 numunesine ait kalıcı hasar durumu, (d) Imp-H500 numunesine ait hasar gelişimi.....	86
Şekil 6.5	: (a) F10H200 numunesine ait donatı gerilme durumları, (b) F10H500 numunesine ait donatı gerilme durumları, (c)-(d) Imp-H500 numunesine ait boyuna donatı burkulmaları	87
Şekil 6.6	: H200 numunesine ait (a) yerdeğiştirme zaman grafiği, (b) kolon boyunca kalıcı yerdeğiştirmeler, H500 numunesine ait (c) yerdeğiştirme zaman grafiği, (d) kolon boyunca kalıcı yerdeğiştirmeler	88
Şekil 6.7	: Toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi (a) H200 numunesi, (b) H500 numunesi	88
Şekil 6.8	: Deneysel ve sayısal çalışmaya ait ortalama değerler ve ortalama göreceli hata oranları (a) maksimum yerdeğiştirmeler, (b) kalıcı yerdeğiştirmeler, (c) maksimum toplam mesnet tepkileri	89
Şekil 6.9	: F0 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları	90
Şekil 6.10	: F0 serisine ait kalıcı yerdeğiştirme anında gerilme durumları	91
Şekil 6.11	: F0H600 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki ve T=200 ms anındaki gerilme durumları.....	91
Şekil 6.12	: F0 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki donatılarda oluşan iç kuvvetler	92
Şekil 6.13	: (a) F0H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler, (b) F0H600 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler	93
Şekil 6.14	: Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F0H200 numunesi, (b) F0H600 numunesi, (c) F0 serisi karşılaştırması	93
Şekil 6.15	: Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F0H200 numunesi, (b) F0H600 numunesi.....	94
Şekil 6.16	: F0 serisine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.....	94
Şekil 6.17	: F10 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları	95
Şekil 6.18	: F10 serisine ait kalıcı yerdeğiştirme anında gerilme durumları	96
Şekil 6.19	: F10H600 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki ve T=200 ms anındaki gerilme durumları	96
Şekil 6.20	: F10 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki donatılarda oluşan iç kuvvetler	97
Şekil 6.21	: F10H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	97
Şekil 6.22	: F10H550 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	98

Şekil 6.23	: F10H600 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	98
Şekil 6.24	: Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F10H200 numunesi, (b) F10H600 numunesi, (c) F10 serisi karşılaştırması.....	99
Şekil 6.25	: Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F10H200 numunesi, (b) F10H550 numunesi, (c) F10H600 numunesi.....	100
Şekil 6.26	: F10 serisine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.....	100
Şekil 6.27	: F20 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları	101
Şekil 6.28	: F20 serisine ait kalıcı yerdeğiştirme anında gerilme durumları	101
Şekil 6.29	: F20H450 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki ve T=200 ms anındaki gerilme durumları	102
Şekil 6.30	: F20 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki donatılarda oluşan iç kuvvetler.....	102
Şekil 6.31	: F20H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	102
Şekil 6.32	: F20H400 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	103
Şekil 6.33	: F20H450 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	103
Şekil 6.34	: Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F20H200 numunesi, (b) F20H450 numunesi, (c) F20 serisi karşılaştırması.....	104
Şekil 6.35	: Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F20H200 numunesi, (b) F20H400 numunesi, (c) F20H450 numunesi.....	105
Şekil 6.36	: F20 serisine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.....	105
Şekil 6.37	: F30 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları	106
Şekil 6.38	: F30 serisine ait kalıcı yerdeğiştirme anında gerilme durumları	106
Şekil 6.39	: F30H400 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki ve T=200 ms anındaki gerilme durumları	107
Şekil 6.40	: F30 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki donatılarda oluşan iç kuvvetler.....	107
Şekil 6.41	: F30H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	107
Şekil 6.42	: F30H350 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	108
Şekil 6.43	: F30H400 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	108
Şekil 6.44	: Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F30H200 numunesi, (b) F30H400 numunesi, (c) F30 serisi karşılaştırması.....	109
Şekil 6.45	: Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F30H200 numunesi, (b) F30H350 numunesi, (c) F30H400 numunesi.....	110
Şekil 6.46	: F30 serisine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.....	110
Şekil 6.47	: F40H200 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki anındaki gerilme durumları.....	111
Şekil 6.48	: F40H250 numunesinde zamana göre gerilme durumları.....	111
Şekil 6.49	: F40H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	112
Şekil 6.50	: F40H250 numunesinde zamana bağlı oluşan birim şekildeğiştirmeler	112

Şekil 6.51	: Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F40H200 numunesi, (b) F40H250 numunesi, (c) F40 serisi karşılaştırması	113
Şekil 6.52	: Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F40H200 numunesi, (b) F40H250 numunesi.....	114
Şekil 6.53	: F40H200 numunesine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.....	114
Şekil 6.54	: F50H200 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki anındaki gerilme durumları	114
Şekil 6.55	: F50H250 numunesinde zamana göre gerilme durumları	115
Şekil 6.56	: F50H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.....	115
Şekil 6.57	: F50H250 numunesinde zamana bağlı oluşan birim şekildeğiştirmeler	112
Şekil 6.58	: Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F50H200 numunesi, (b) F50H250 numunesi, (c) F50 serisi karşılaştırması	116
Şekil 6.59	: Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F50H200 numunesi, (b) F50H250 numunesi.....	117
Şekil 6.60	: F50H200 numunesine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.....	117
Şekil 6.61	: H200 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri.....	118
Şekil 6.62	: H300 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri.....	119
Şekil 6.63	: H400 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri.....	120
Şekil 6.64	: H500 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri.....	121
Şekil 6.65	: H600 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri.....	121
Şekil 6.66	: Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi (a) H200 darbe yüksekliği, (b) H300 darbe yüksekliği, (c) H400 darbe yüksekliği, (d) H500 darbe yüksekliği, (e) H600 darbe yüksekliği.....	122
Şekil 6.67	: Kalıcı yerdeğiştirmeler (a) H200 darbe yüksekliği, (b) H300 darbe yüksekliği, (c) H400 darbe yüksekliği, (d) H500 darbe yüksekliği, (e) H600 darbe yüksekliği	123
Şekil 6.68	: P200 potansiyometresine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.....	124
Şekil 6.69	: H200 darbe yüksekliğine ait gerilme durumları	124
Şekil 6.70	: Farklı eksenel yük düzeylerine ait gerilme durumları (a) H300 darbe yüksekliği, (b) H400 darbe yüksekliği, (c) H400 darbe yüksekliği....	125
Şekil A.1	: Curve ve line komutunun kullanımı	138
Şekil A.2	: Etriyelerin oluşturulması	138
Şekil A.3	: Etriye grubunun oluşturulması	139
Şekil A.4	: Donatı kafesinin oluşturulması.....	139
Şekil A.5	: Betonun modellenmesi	139
Şekil A.6	: Darbe ağırlığının modellenmesi	140
Şekil A.7	: Düğüm noktalarının tanımlanması	140
Şekil A.8	: Sınır koşullarının tanımlanması.....	141
Şekil A.9	: Eksenel yükün tanımlanması.....	141
Şekil A.10	: Donatıların tanımlanması	142
Şekil A.11	: Darbe ağırlığının tanımlanması	142
Şekil A.12	: Betonun tanımlanması	143



BETONARME KOLONLARIN DARBE ETKİSİ ALTINDA PERFORMANSININ VE ARTIK KAPASİTENİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Betonarme yapılar işlevine göre değişen kullanım ömürleri boyunca üzerine gelebilecek yükler düşünülerek, mevcut yönetmelikler göz önüne alınarak tasarlanırlar. Yapıya sürekli olarak etki eden zati yükler ve hareketli yüklerden başka rüzgar yükleri, deprem yükleri gibi dinamik etkiler de tasarımda göz önüne alınan yükler arasındadır. Taşıyıcı sistemlerin tasarımında göz önüne alınan bu yükler dışında, konumu veya kullanım fonksiyonu farklı olan yapıların bilinenden farklı risklere maruz kalması da olasıdır. Köprüler, viyadükler, otoparklar veya yol güzergahında bulunan yapılar sıklıkla araç çarpmalarına maruz kalabilmektedir. Yapılan az sayıda çalışmaya rağmen betonarme kolonların darbe etkisi altındaki davranışı tam olarak ortaya konulamamıştır.

Bu tez çalışması kapsamında eksenel yüklü betonarme kolonların farklı enerji düzeylerinde uygulanan darbe etkisi altındaki davranışı incelenerek darbe etkisi sonrası artık taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Farklı eksenel yük düzeyleri altında farklı darbe enerjisine maruz kalan numunelerin davranışının belirlenmesi amacıyla sayısal modeller oluşturularak analiz edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan araştırma tam ölçekli, eksenel yüklü betonarme kolonların darbe etkisi altındaki artık taşıma kapasitelerinin deneysel olarak incelendiği ilk araştırmadır.

Tez çalışmasının ilk bölümünde çalışmanın konusu ve kapsamı açıklanmıştır. İkinci bölümde, darbe etkisi altında betonarme yapı elemanlarının davranışının deneysel ve sayısal olarak araştırıldığı çalışmalar sunulmuştur. Literatürde bulunan çalışmaların birçoğunun ölçekli numuneler üzerinde yapıldığı, eksenel yük etkisinin çoğunlukla ihmal edildiği saptanmıştır. Bununla birlikte darbenin etkitildiği kolon bölgesindeki farklılıkların davranışı değiştirdiği görülmüştür. Darbe sonrası artık kapasitelerin deneysel olarak incelendiği az sayıda çalışmanın ölçekli numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olduğu, bu çalışmalarda darbe uygulanan bölgenin kolon üst veya orta bölgesinden gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

Çalışmanın bir sonraki kısmında deney programı açıklanmıştır. Çalışma kapsamında 30x30x320 cm boyutunda ve geleneksel betonarme kolonları temsil edecek donatı konfigürasyonunda numuneler üretilmiştir. Donatılara gerinim ölçerler yerleştirilerek birim şekil değiştirme ölçümlerinin yapılması sağlanmıştır. Deneysel çalışma, iki çelik reaksiyon duvarı arasına yerleştirilen statik ve dinamik yükleme sistemleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kolonlar reaksiyon duvarları arasında bulunan biri kayıcı, diğeri sabit mesnetler üzerine yatay olarak yerleştirilmiştir. Bu mesnetler üzerinde bulunan yük ölçerler yardımıyla mesnet tepkileri ölçülmüştür. Batı reaksiyon duvarından hidrolik kriko yardımıyla 270 kN sabit eksenel yük uygulanmış ve bu kriko ucuna yük kontrolünün sağlanması amacıyla yük ölçer yerleştirilmiştir. Kolon alt bölgesine 50 cm ara ile yerleştirilen potansiyometrelerden yer değiştirme ölçümleri yapılmıştır. Darbe yükü, içinde kılavuz rayları bulunan çelik kule içinden darbe ağırlığının serbest

düşürülmesiyle oluşturulmuştur. Statik yükleme ise yine darbe uygulanan bölgeye kurulan yükleme sisteminde hidrolik kriko yardımıyla yapılmıştır. Bu kriko ucuna da yük ölçümünün yapılması amacıyla yük ölçer yerleştirilmiştir. Tüm ölçümler dinamik ve statik veri toplama sistemleri ve yazılımları aracılığıyla yapılmıştır. Deneyler esnasında eksenel yük ölçümleri, mesnet tepkileri, yerdeğiştirmeler ve donatılarda oluşan birim şekildeğiştirmeler ölçülerek çatlak şekilleri ve hasar durumları incelenmiştir.

İlk olarak referans numune üzerinde statik yükleme deneyi yapılmıştır. Statik yükleme, darbe uygulanan bölge ile aynı noktadan gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda numunenin 176.9 kN yük taşıma kapasitesinde olduğu görülmüştür. Bu deneyde numune 81 mm yerdeğiştirmeye ulaştıktan sonra betonda ezilmelerin başlamasıyla yükleme sonlandırılmış ve 71 mm kalıcı yerdeğiştirmeye ulaşıldığı saptanmıştır. Deney esnasında gerinim ölçerlerden alınan birim şekildeğiştirme değerlerinden numunenin eğilme baskın davranış gösterdiği anlaşılmıştır.

İkinci olarak, referans numune ile eşdeğer numuneler üzerinde darbe deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde darbe etkisi, farklı darbe enerjisine karşılık gelecek şekilde, 585 kg ağırlığındaki cismin 2.0, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 metre yüksekliklerden serbest düşürülmesiyle oluşturulmuştur. Başlangıçta sabit 270 kN olarak uygulanan eksenel yükün darbe esnasında kısa süre içinde çok yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Eksenel yük düzeyi, deney sonucunda, hasar düzeyi yüksek numunelerde başlangıç düzeyinin altına gerilerken az hasarlı numunelerde başlangıçtaki değere yakın değerler almıştır. Darbenin uygulandığı bölgenin mesnet tepkileri üzerinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın konumda bulunan mesnette diğer mesnetten daha büyük değerlere ulaşılmıştır. Bununla birlikte toplam mesnet tepkileri, uygulanan darbe enerjileri birbirinden farklı olsa da, neredeyse tüm numunelerde benzer değerlerde seyretmiştir. Darbe enerjisinin artmasıyla birlikte numuneler ağır hasar alana kadar yerdeğiştirmelerin arttığı görülmüştür. Uygulanan darbe enerjisi görece yüksek olan numunelerde, davranış kesme baskın davranışa doğru dönüşürken, yerdeğiştirmeler de yaklaşık olarak aynı seviyede ölçülmüştür. Düşük darbe enerjisi uygulanan numunelerde eğilme hasarları görülürken darbe enerjisi arttıkça kesme çatlakları artmış, nihai olarak en yüksek darbe enerjisine ulaşıldığında numune kesme göçmesiyle hasar almıştır. Uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla birlikte boyuna donatılar ve etriyeler akmaya erişmiş, boyuna donatılarda burkulmalar gözlenmiştir.

DeneySEL çalışmanın son aşamasında darbe hasarlı numuneler üzerinde artık kapasitelerin belirlenmesi amacıyla statik yükleme deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda, uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla birlikte yük taşıma kapasiteleri önemli ölçüde azalmıştır. 22.96 kJ darbe enerjisi uygulanan numunede yük taşıma kapasitesi referans numunenin yük taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak yarısı değerine kadar azalmıştır. Numunelerin rijitlikleri de darbe etkisiyle birlikte azalmıştır. Referans numunenin sekant rijitliği 15.5 Gpa olmasına karşın bu değer 22.96 kJ darbe enerjisine maruz kalan kolon için 5.9 Gpa değerine kadar azalmıştır. Başlangıçta 81 mm maksimum yerdeğiştirme kapasitesi bulunan referans numunede yerdeğiştirme kapasitesi 37.8 mm'ye kadar düşmüştür. Yük taşıma kapasitesi ve yerdeğiştirme kapasitesi büyük ölçüde azalan darbe hasarlı numunelerin enerji yutma kapasiteleri de benzer şekilde azalmıştır. Darbe enerjisindeki artışla birlikte dinamik enerji yutma kapasitesi %56'dan %76'ya yükselirken, statik enerji yutma kapasitesindeki kayıp %53'ten %82'ye yükselmiştir.

Tez çalışmasında yer alan sayısal analiz bölümünde, deneysel olarak incelenen numunelerle aynı özelliklere sahip numunelerin farklı eksenel yük düzeyleri altındaki davranışı incelenmiştir. Bu bölümde eksenel yüksüz durumla birlikte %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında eksenel yük düzeylerindeki kolonların farklı darbe enerjileri altındaki davranışı incelenmiştir. Kurulan sonlu eleman modelleriyle deneysel analiz sonuçlarının kabul edilebilir seviyede benzeştiği ortaya konmuştur. Özellikle mesnet tepkileri, hasar şekilleri ve donatı birim şekildeğişikliklerinde sonlu eleman modellerinin deneysel sonuçlarla örtüştüğü görülmüştür. Sayısal analizlerde darbe enerjisindeki ve eksenel yük düzeyindeki artışın mesnet reaksiyonları üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte aynı eksenel yük düzeyindeki numunelere uygulanan darbe enerjisi arttıkça yerdeğişikliklerin de arttığı görülmüştür. Uygulanan darbe enerjisinin eşit olduğu numunelerde eksenel yük düzeyi arttıkça, betonarme kolon üzerindeki gerilmelerin ve yerdeğişikliklerin azaldığı saptanmıştır. Ancak belirli bir eksenel yük düzeyinden sonra, artan yerdeğişikliklerle birlikte, boyuna donatıların burkulması sonrasında numunelerin göçme bölgesine geçtiği görülmüştür. Bu nedenle gerilmeler ve yerdeğişiklikler küçük olsa da eksenel yük düzeyi küçük olan numunede hasar oranı düşükken eksenel yük oranı yüksek olan numunenin göçme durumuna geçebildiği saptanmıştır.



DETERMINATION OF THE PERFORMANCE AND RESIDUAL CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER IMPACT EFFECT

SUMMARY

Reinforced concrete structures are designed considering the loads that may occur during their lifetime and taking into account current regulations. In addition to dead loads and live loads that affect the structure, dynamic effects such as wind loads and earthquake loads are also among the loads taken into account in the design. Apart from these loads taken into consideration in the design of the structural systems, it is also possible that structures with different locations or usage functions may be exposed to different risks than known. Bridges, viaducts, parking lots or structures located on the road route may frequently be subject to vehicle collisions. Despite a small number of studies, the behavior of reinforced concrete columns under impact has not been fully revealed.

Within the scope of this thesis, the behavior of axially loaded full scale reinforced concrete columns was examined under impact applied at different energy levels and their post-impact residual capacities was determined. Numerical models were created and analyzed to determine the behavior of specimens exposed to different impact energy under different axial load levels. The research conducted within the scope of this thesis is the first experimental research in which the post-impact residual capacity of full-scale, axially loaded reinforced concrete columns under impact.

In the first chapter of the thesis, the subject and scope of the study are explained. In the second chapter, studies in which the behavior of reinforced concrete structural elements under impact are investigated experimentally and numerically are presented. It has been determined that most of the studies in the literature were conducted on scaled specimens and the axial load effect was mostly neglected. In addition, it has been observed that differences on location of impacted area is change the behavior. It has been determined that a few studies examining post-impact residual capacities experimentally have been carried out on scaled specimens. Also these studies, the impact area was upper or middle region of the column.

In the next part of the study, the experimental program is explained. Within the scope of the study, specimens were prepared with a size of 30x30x320 cm and a reinforcement configuration that would represent conventional reinforced concrete columns. Strain gauges were placed on the reinforcement and strains were measured. The experimental study was carried out with the help of static and dynamic loading systems placed between two steel reaction walls. The columns are placed horizontally on two supports, one on roller supports and the other on fixed supports, located between the reaction walls. Support reactions were measured with the help of loadcells on these supports. A constant axial load of 270 kN was applied from the western reaction wall with the help of a hydraulic jack, and a loadcell was placed at the end of this jack to ensure load control. Displacement measurements were made from

potentiometers placed at 50 cm intervals at the bottom of the column. The impact load is created by freely dropping the impactor through a steel tower with guide rails inside. Static loading was applied with the help of a hydraulic jack installed in the area where the impact was applied. A loadcell is placed at the end of this jack to measure the load. All measurements were made with dynamic and static data acquisition systems and softwares. During the experiments, loads, support reactions, displacements and rebar strains were measured. Crack maps and failure modes were examined.

Firstly, a static loading test was performed on the reference specimen. As a result of the experiment, it was seen that the specimen had a load carrying capacity of 176.9 kN. In this test, after the specimen reached a displacement of 81 mm, the loading was terminated with the beginning of crushing in the concrete and it was determined that a residual displacement was 71 mm. It was understood from the strain values taken from the strain gauges that the specimen have a flexure dominant behavior.

Secondly, impact tests were carried out on equivalent specimens to the reference specimen. In these experiments, the impact effect was created by free dropping a 585 kg impactor from heights of 2.0, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 meters, corresponding to different impact energy. It was observed that the axial load, initially applied as a constant 270 kN, reached very high values in a short time during the impact. As a result of the experiment, the axial load level decreased below the initial level in the specimens with high damage levels, while it reached values close to the initial value in the specimens with less damage. It has been observed that the region where the impact is applied plays an important role on the support reactions. Greater values were reached at the support located close to the impact area than at the other. However, the total support responses remained at similar values in almost all specimens, even though the applied impact energies were different. It was observed that as the impact energy increased, the displacements increased until the specimens were severely damaged. In specimens with relatively high applied impact energy, the behavior changed towards shear-dominated behavior, while the displacements were measured at approximately the same level. While flexural damages were observed in the specimens to which low impact energy was applied, shear cracks increased as the impact energy increased. When the highest impact energy was reached, the specimens was damaged by shear failure. With the increase in the applied impact energy, the longitudinal reinforcements and stirrups reached yielding. Also buckling was observed in the longitudinal reinforcements.

In the final stage of the experimental study, static loading tests were carried out on impact damaged specimens to determine the residual capacities. As a result of these experiments, the load carrying capacities decreased significantly with the increase of the applied impact energy. In the specimen to which 22.96 kJ impact energy was applied, the load carrying capacity decreased to approximately half of the load carrying capacity of the reference specimen. The stiffness of the specimens also decreased with the impact effect. Although the secant stiffness of the reference sample was 15.5 Gpa, this value decreased to 5.9 Gpa for the column exposed to 22.96 kJ impact energy. In the reference specimen, which initially had a maximum displacement capacity of 81 mm, the displacement capacity decreased to 37.8 mm. The energy absorption capacity of impact damaged specimens, whose load carrying capacity and displacement capacity decreased significantly, also decreased similarly. With the increase in impact energy, the dynamic energy absorption capacity increased from 56% to 76%, while the loss in static energy absorption capacity increased from 53% to 82%.

In the numerical analysis section of the thesis study, impact behavior of specimens under different axial load levels was examined. In this section, the behavior of columns under different impact energies at 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% axial load levels are examined. It has been observed that the developed finite element model results and experimental analysis results are similar at an acceptable level. It has been revealed that the finite element models are in a good agreement with the experimental results, especially in support reactions, damage patterns and rebar strains. Numerical analysis showed that the increase in impact energy and axial load level did not have a significant effect on the support reactions. However, at the same axial load level, it has been observed that as the impact energy increases, the displacements also increase. It has been determined that, at the same impact energy level, as the axial load level increases, the stresses and displacements on the reinforced concrete column decrease. However, it was observed that the specimens collapse after the longitudinal reinforcements buckled with increasing displacements after a certain axial load level. For this reason, although the stresses and displacements are small, specimens with a high axial load level can collapse.





1. GİRİŞ

1.1 Tezin Konusu

Geleneksel betonarme yapılar kullanım süreleri içinde ortaya çıkması muhtemel yükler göz önüne alınarak tasarlanırlar. Yapıya etkiyen zati yükler ve hareketli yükler yanında deprem ve rüzgar yükleri gibi dinamik etkiler de tasarımda göz önüne alınan temel yükler olarak sıralanabilir. Taşıyıcı sistem tasarımında göz önüne alınan bu yükler dışında, darbe yükleri, fonksiyonu ya da konumu gereği birçok yapıya etkimesi muhtemel dinamik yükler arasında sayılabilir. Köprüler, viyadükler gibi ulaştırma yapılarının taşıyıcı sistem elemanları, gemi ve araç çarpmalarına maruz kaldıkları gibi aktif yol güzergahı üzerinde bulunan geleneksel betonarme yapılar ile fabrika ve otopark kolonları da bu tip dinamik etkilere maruz kalabilmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 : Betonarme bir yapıda darbe hasarı örneği.

Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemelerinden olan beton ve çeliğin davranışının yükleme hızıyla değiştiğinin bilinmesine rağmen darbe etkisi gibi anlık yüksek impulsa sahip yüklemelerin betonarme kolonların davranışı üzerine etkisi yeterince ortaya konulamamıştır. Yapılan az sayıda çalışma ile betonarme kolonların darbe etkisi altındaki davranışının önemli ölçüde değiştiği ortaya konmuş olmasına rağmen, geleneksel betonarme yapıları temsil edecek kolonlara ait çalışmaların yetersizliği, eksenel yük düzeylerindeki farklılıklar, darbe uygulanan bölgelerdeki değişiklikler, darbe esnasında donatıların davranışı ve darbe sonrası yük taşıma

kapasitelerindeki değişimin yeterince ortaya konulamamış olması bu alandaki eksikliklerden bazıları olarak sıralanabilir.

Tez çalışması kapsamında, geleneksel betonarme yapıları temsil edecek şekilde üretilmiş tam ölçekli eksenel yüklü kolonların farklı darbe enerjileri altındaki davranışını deneysel olarak incelenmiştir. Bu kolonlar üzerine serbest düşen ağırlıkla darbe etkisi oluşturularak, hasar şekilleri, göçme modları ve artık yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel olarak test edilen betonarme kolonlar sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yine farklı eksenel yük koşulları altında kolonlar üzerindeki darbe etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Tez çalışmasının amacı; eksenel yüklü tam ölçekli betonarme kolonların farklı darbe enerjileri altındaki davranışının incelenerek, darbe sonrası artık yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda deneye tabi tutulan kolonların yerdeğiştirmeleri, hasar şekilleri, göçme modları ve darbe sonrası kullanılabilirlik durumları değerlendirilecektir. Statik yükleme durumuyla karşılaştırmalı olarak darbe hasarlı numunelerin artık yük taşıma kapasiteleri belirlenecektir. Deneysel çalışma ile sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen kolonlar kıyaslanarak farklı eksenel yük durumları da sayısal olarak incelenecektir.

Tez çalışması, darbe deneyleri, artık yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan statik yükleme deneyleri, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modellemelerle darbe davranışının incelenmesi olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Toplamda 7 bölümden oluşan tez çalışmasının içeriği aşağıda sıralanmıştır.

“Giriş” olarak adlandırılan birinci bölümde tezin konusu, amacı ve kapsamı açıklanmıştır.

İkinci bölümde tez konusu ile ilgili yapılmış çalışmalara ait literatür özeti verilmiş ve bu çalışmanın özgün değeri tanımlanmıştır.

Üçüncü bölümde deney programı açıklanmış, deney düzenekleri, deneyde kullanılan ölçüm aletleri, veri analiz yöntemi açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde statik yükleme deneyi ile darbe deneylerinin sonuçları sunulmuştur.

Beşinci bölümde artık yük taşıma kapasitesinin belirlenmesine yönelik deney sonuçları sunulmuştur.

Altıncı bölümde farklı eksenel yük oranlarına sahip numunelerde darbe etkisi, sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak, sayısal olarak incelenmiştir.

Yedinci ve son bölümde ise sonuçlar değerlendirilerek gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

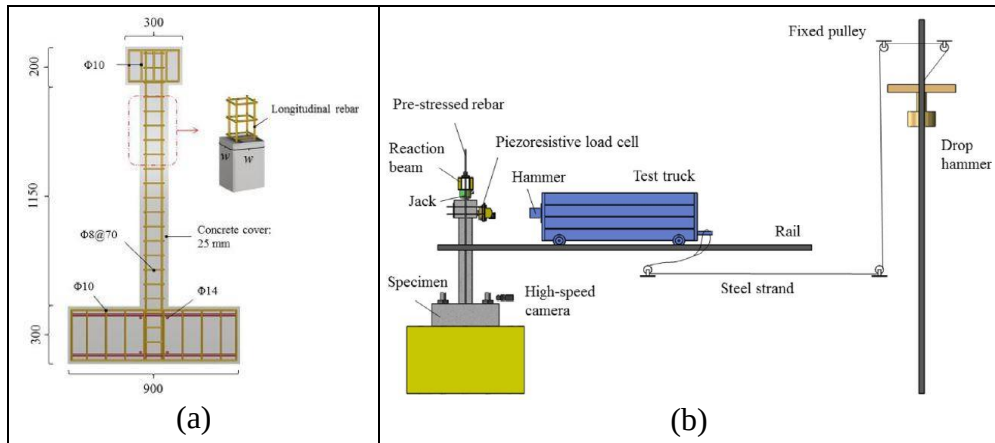




2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

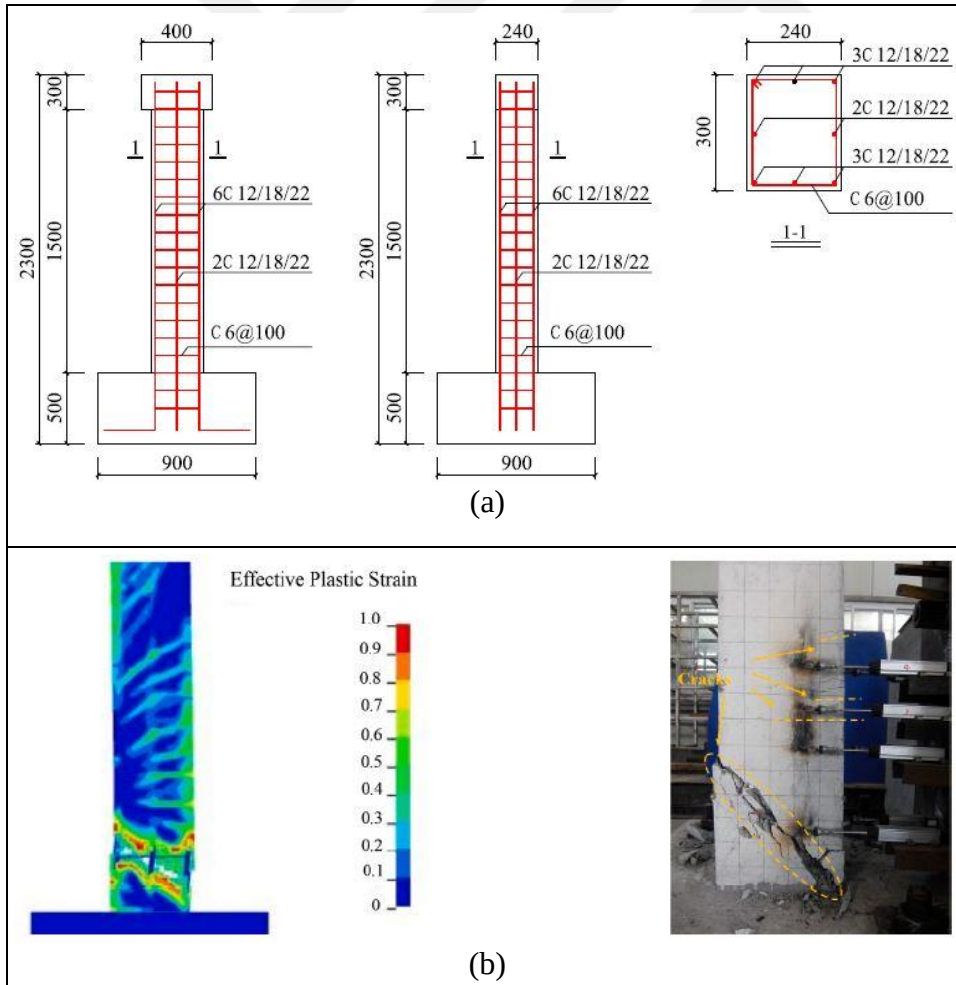
Darbe etkisi, yapı elemanlarının davranışını değiştiren, kısa süreli, ani ve dinamik bir etkidir. Döşemelerin, kirişlerin ve kolonların darbe etkisi altında davranışını araştıran birçok çalışma yapılmıştır. Kolonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmaların birçoğu ölçekli numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda narinlik, donatı oranı, eksenel yük oranı, darbe ağırlığı ve hızı gibi parametreler incelenmiştir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Ye ve diğ. (2020) eksenel yüklü betonarme narin kolonların yatay statik ve dinamik yükler altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Narinlik oranı, boyuna donatı oranı ve eksenel yük oranının değişken olarak seçildiği ondört adet kare kesitli betonarme kolon 0.8 m/s yatay darbe yüküne maruz bırakılmıştır (Şekil 2.1). Daha sonra, darbe hasarı alan numunelerin artık kapasitelerinin değerlendirilmesi amacıyla statik yükleme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, eksenel yükün olmadığı kolonlarda artık deformasyon, maksimum yerdeğiştirmenin %52.4'üne ulaşırken, eksenel yüklü kolonlarda numunenin darbe sonrası neredeyse eski konumuna ulaştığı görülmüştür. Hafif darbe hasarlı altı numune üzerinde yapılan statik testlerde ise hasarlı kolonların referans kolona oranla statik yük taşıma kapasitenin %7 ila %14 arasında azaldığı saptanmıştır. Deneysel çalışmada darbe etkisindeki numunelerde enerji yutma kapasitesinin %70 ila %90 arasında değiştiği belirtilmiştir.



Şekil 2.1 : (a) Numunelerin şematik gösterimi, (b) deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ye ve diğ., 2020).

Li ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, betonarme köprü kolonlarının darbe yükleri altında davranışını incelemek amacıyla altı adet 1/5 ölçekli betonarme kolon numunesi üzerinde darbe deneyi yapılmış ve deney sonuçları kamyon çarpması simüle edilerek sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 2.2). Çalışmada boyuna donatı oranı ve darbe hızı değişken olarak seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre, tüm numunelerde kesme güç tükenmesi hasar modu görülmüştür. Atalet kuvvetlerinin etkisiyle, deformasyonların darbe kuvvetinden bir süre sonra meydana geldiği saptanmıştır. Hasar seviyesi, maksimum darbe kuvveti, darbe uygulanan bölgedeki maksimum yerdeğiştirme ve enerji dağılımının darbe hızının artmasıyla arttığı, boyuna donatı oranıyla ters orantılı geliştiği görülmüştür. Sayısal çalışmada, statik yükleme durumundan farklı olarak, plastik mafsalsın kesme güç tükenmesi durumundan evvel etriyenin akmasıyla meydana geldiği bulunmuştur. Yine sayısal çalışmalarda, darbe esnasındaki eksenel yük oranındaki değişimin köprü kolonlarının darbeye karşı tasarımında dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.



Şekil 2.2 : (a) Numune detayları, (b) sonlu eleman modeli ile deneysel sonuçların karşılaştırılması (Li ve diğ., 2020).

Cai ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, farklı kesit boyutlarında, ölçekli 15 adet betonarme kolon darbe etkisi altında, farklı narınlık oranı, darbe ağırlığı ve darbe hızı parametreleri göz önüne alınarak deneysel olarak araştırılmıştır (Şekil 2.3a). Çalışma kapsamında, çatlak oluşumu, darbe kuvveti, deformasyonlar, birim şekildeğiştirmelerin değişimi ve enerji dağılımı tartışılmıştır. Deney sonuçlarına göre, darbe yükü altındaki davranış, salınım aşaması, stabilizasyon aşaması ve boşaltma aşaması olarak üçe ayrılmıştır. Darbe ağırlığındaki ve hızındaki artışın sırasıyla ortalama darbe kuvvetini ve darbe süresini artırdığı görülmüştür. AASHTO-LRFD standardında sunulan, yapısal elemanın rijitliğini hesaba katmadan sadece darbe ağırlığı ve hızını hesaba katan ampirik formül ile bulunan eşdeğer statik yükün ($P_s = 1.2 \times 10^5 v \sqrt{DWT}$), deneysel çalışma sonucu bulunan F_p (maksimum darbe kuvveti) ve F_{su} (statik eğilme dayanımı) değerleri ile kıyaslandığında oldukça güvenli olduğu vurgulanmıştır (Şekil 2.3b).

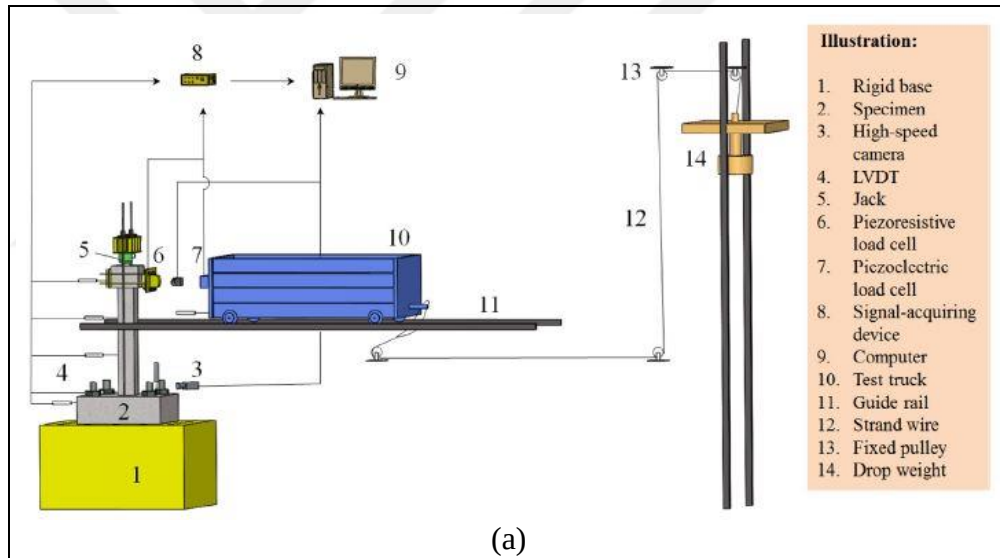


Table 4

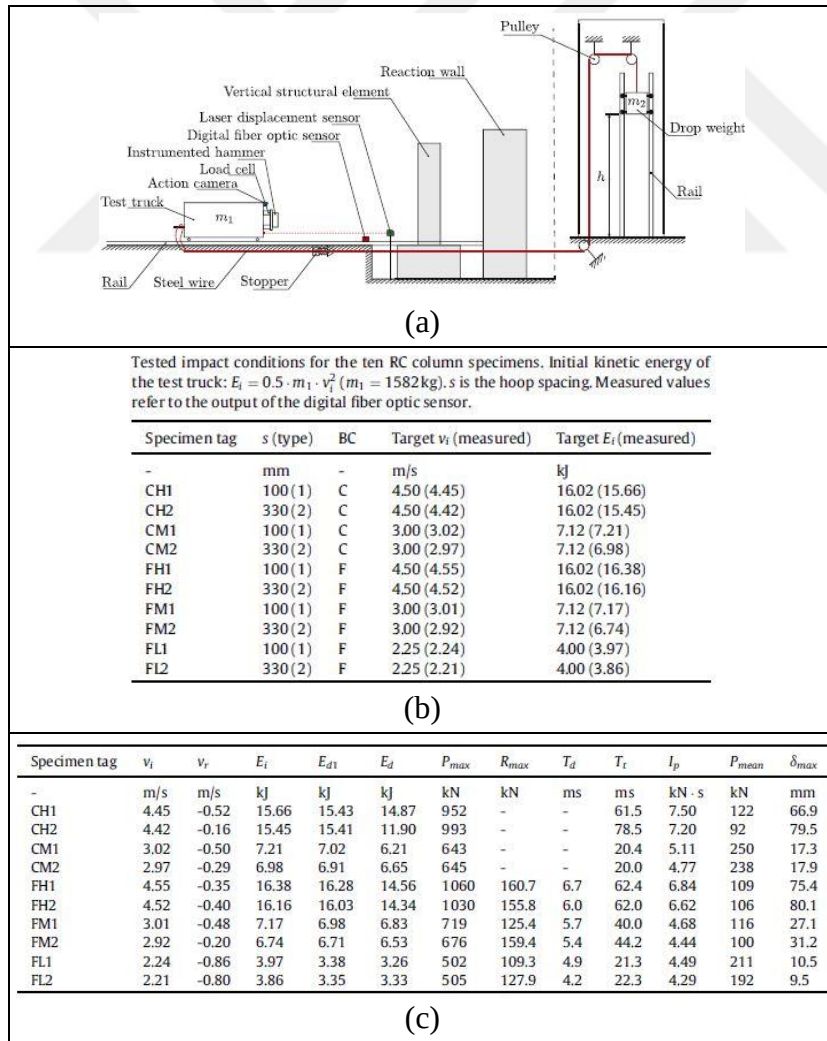
Comparison between experimental results and P_s calculated by Eq. (2).

Specimen	P_s (kN)	P_s/F_p	P_s/F_{su}	Specimen	P_s (kN)	P_s/F_p	P_s/F_{su}
DL120-1.2-0.8	105.43	2.84	14.89	DL150-1.2-0.8	145.33	2.27	9.72
DL120-1.5-0.8	119.12	3.41	16.83	DL150-1.8-0.8	146.44	2.57	9.79
DL120-1.8-0.8	142.82	2.83	20.18	DL180-1.5-0.4	75.47	3.10	2.46
DL150-1.5-0.4	49.36	5.55	3.30	DL180-1.5-0.8	111.47	3.09	3.63
DL150-1.5-0.6	88.82	3.22	5.94	DL180-1.5-1.2	193.69	2.41	6.31
DL150-1.5-0.8	115.07	2.59	7.69	DL180-1.2-0.8	106.15	3.52	3.46
DL150-1.5-1.0	140.28	3.05	9.38	DL180-1.8-0.8	149.07	2.07	4.86
DL150-1.5-1.2	178.69	3.03	11.95				

(b)

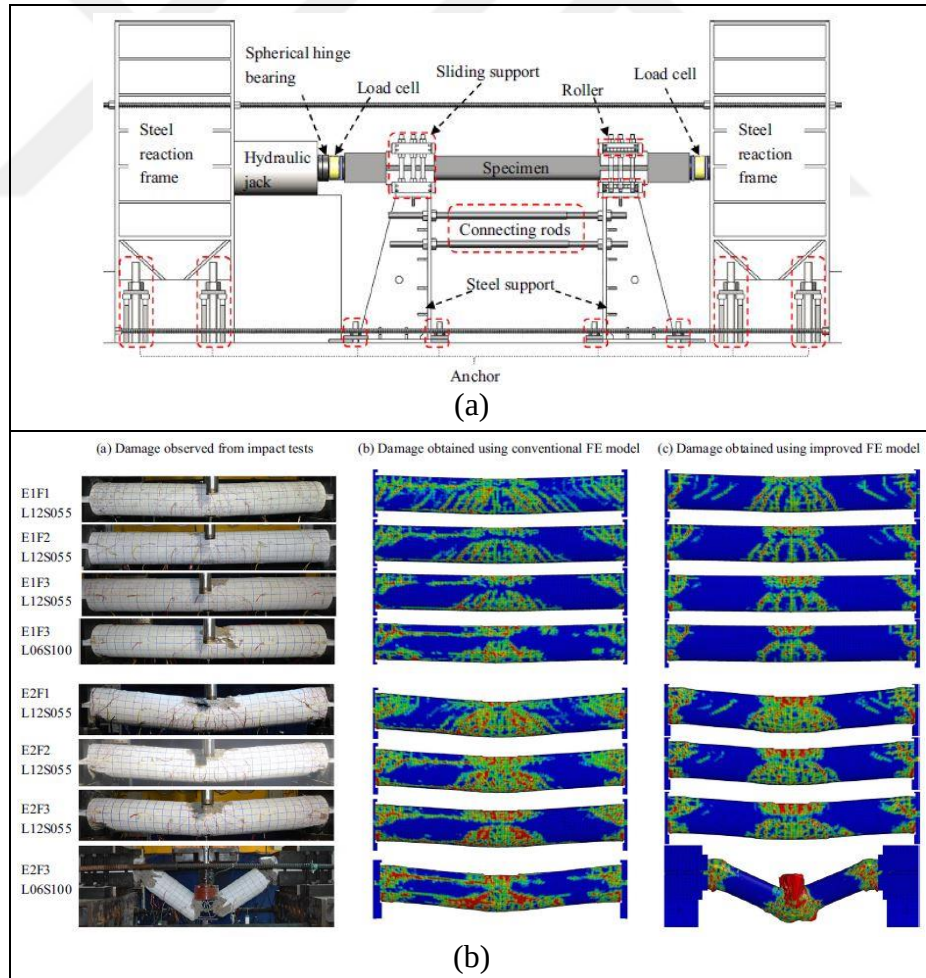
Şekil 2.3 : (a) Deney düzeneğinin şematik gösterimi, (b) deney sonuçlarının AASHTO-LRFD formülü ile karşılaştırılması (Cai ve diğ., 2018).

Demartino ve diğ. (2017) kesme dayanımı yetersizliği bulunan, dairesel kolonların yanal darbe yükleri altında davranışını incelemiştir (Şekil 2.4a). Çalışmada, dairesel bir betonarme köprü kolonunu temsil eden 1/3 ölçekli, etriye aralığı (100 mm, 330 mm), darbe hızları (2.25, 3.00, 4.50 m/s) ve mesnet koşulları (konsol, ankastre) farklı 10 adet betonarme kolon üzerinde darbe deneyleri yapılmıştır (Şekil 2.4b). Çalışma sonucunda darbe hızı arttıkça ankastre mesnetli kolonlarda konsol kolonlara göre daha fazla hasar görülmüştür. Hem ankastre hem de konsol kolonlarda, donatı oranı düşük olan kolonlarda daha fazla hasar görülmüştür. Darbe kuvvetinin toplam süresinin darbe hızıyla arttığı saptanmıştır. Tüm testlerde temelden darbe uygulanan noktaya kadar, enine donatı oranı düşük olan kolonlarda daha fazla olmak üzere, kesme çatlakları oluşmuştur. Çalışma kapsamında darbe kuvveti-zaman, reaksiyon kuvveti-zaman, yükseklik-yerdeğiştirme, darbe kuvveti-yerdeğiştirme, enerji yayılımı-darbe hızı vb. birçok ilişki gösterilmiştir (Şekil 2.4c).



Şekil 2.4 : (a) Deney düzeneği, (b) deney matrisi, (c) deney sonuçları (Demartino ve diğ., 2017).

Liu ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, eksenel yüklü betonarme kolonlar üzerinde düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.5a). Farklı eksenel yük seviyesine ve iki farklı boyuna donatı oranına sahip on adet dairesel kesitli betonarme kolon, düşen kütle sistemiyle darbe yüklemesine maruz bırakılmış, deneysel sonuçlar ile sonlu eleman modelinden elde edilen sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda eksenel yükün varlığı, kolonların deformasyonu düşük olduğunda olumlu bir etki yaratırken, düşük donatı oranına sahip kolonlarda yüksek enerjili bir darbe durumunda yıkıcı etkiler meydana getirmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, betonarme kirişler için kullanılan geleneksel sonlu eleman modellerinin darbe yüklerine maruz kalan eksenel yüklü betonarme kolonlar için yeterli doğruluk sağlamadığı görülmüştür. Çalışma kapsamında önerilen sonlu eleman modelinde kullanılan beton modelinde sargılama etkisinin dikkate alınması, çatlak açılma-kapanma etkileri ve donatının kayma-kenetlenme davranışının dikkate alınmasıyla deneysel sonuçlarla uyumlu sayısal sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 2.5b).



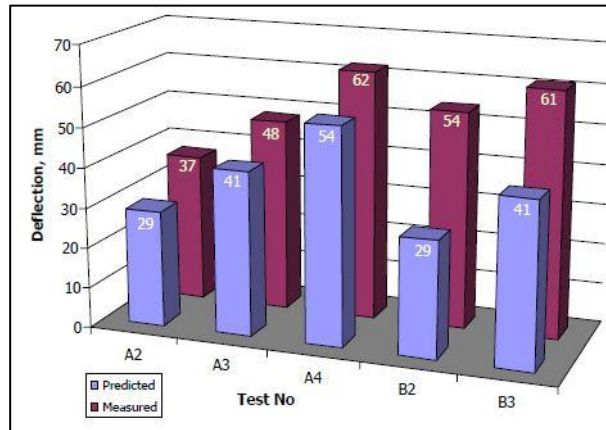
Şekil 2.5 : (a) Deney düzeneği, (b) farklı sonlu eleman modelleri sonuçlarıyla deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması (Liu ve diğ., 2017).

Wang ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada, yanal darbe yükü altındaki betonarme kolonların dinamik tepkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada boyuna donatı, enine donatı ve yükleme hızları değişken olarak seçilmiştir. Enine donatı oranının kolonun göçme modunu etkileyen en önemli faktör olduğu, etriye aralığı fazla olan kolonların kesme göçmesine, etriye aralığı düşük olan kolonlarınsa eğilme göçmesine yatkın olduğu bulunmuştur. Boyuna donatı oranı ve yükleme hızının göçme modu üzerinde önemli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, göçme yükü, kolon ortasında yanal yerdeğiştirme, ilave eksenel yük ve uç momentleri, boyuna donatının artmasıyla artarken, yükleme hızının artmasıyla göçme yükünün %6 ila %21 oranında artış gösterdiği bulunmuştur (Şekil 2.6).

specimens	failure mode	ultimate disp. δ/h	ultimate load /kN	max. axial force /kN	max. trans. force /kN	max. end moment /kN·m
S-218-0-1	shear	0.2160	200	240	280	94
S-318-0-1	flexural-shear	0.3895	260	225	400	115
S-218-0-2	shear	0.3326	204	256	275	83
S-318-0-2	flexural	0.4420	-	373	351	118
S-218-0.25-1	flexural	0.3960	267	578	588	142
S-318-0.25-1	flexural	0.4590	290	577	401	148
S-218-0.25-2	flexural	0.4472	283	577	728	56
S-318-0.25-2	flexural	0.3725	353	599	555	187

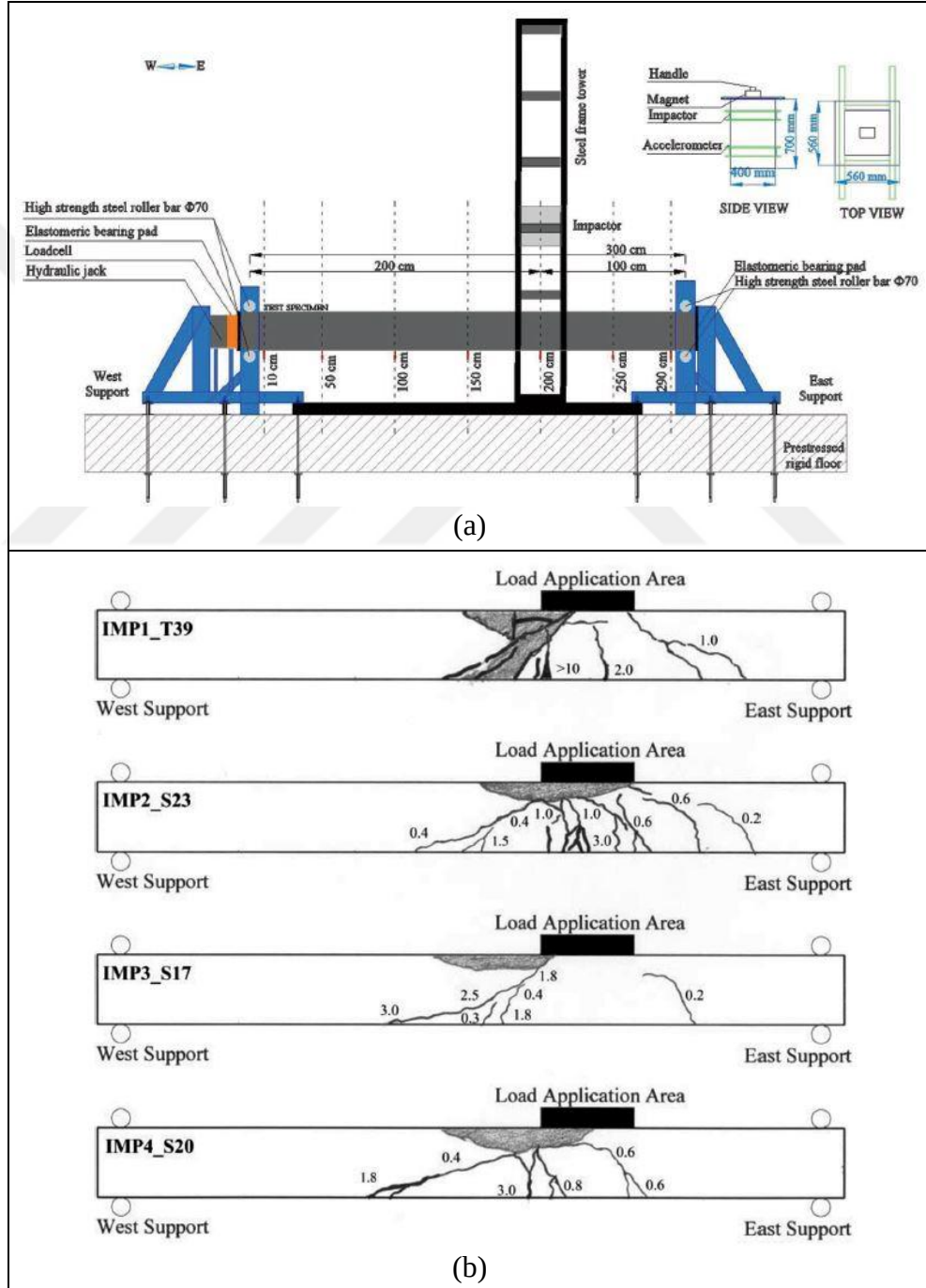
Şekil 2.6 : Deneysel sonuçlar (Wang ve diğ., 2011).

Remennikov ve Kaewunruen (2006) tarafından yapılan çalışmada, çeyrek ölçekli betonarme kolonlar üzerinde düşen kütle darbe deneyleri yapılmış, sonuçlar statik yükleme deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 2.7). Geleneksel betonarme kolonlarda darbe yükleri altında kesme göçmesinin muhtemel olduğu ortaya konmuştur.



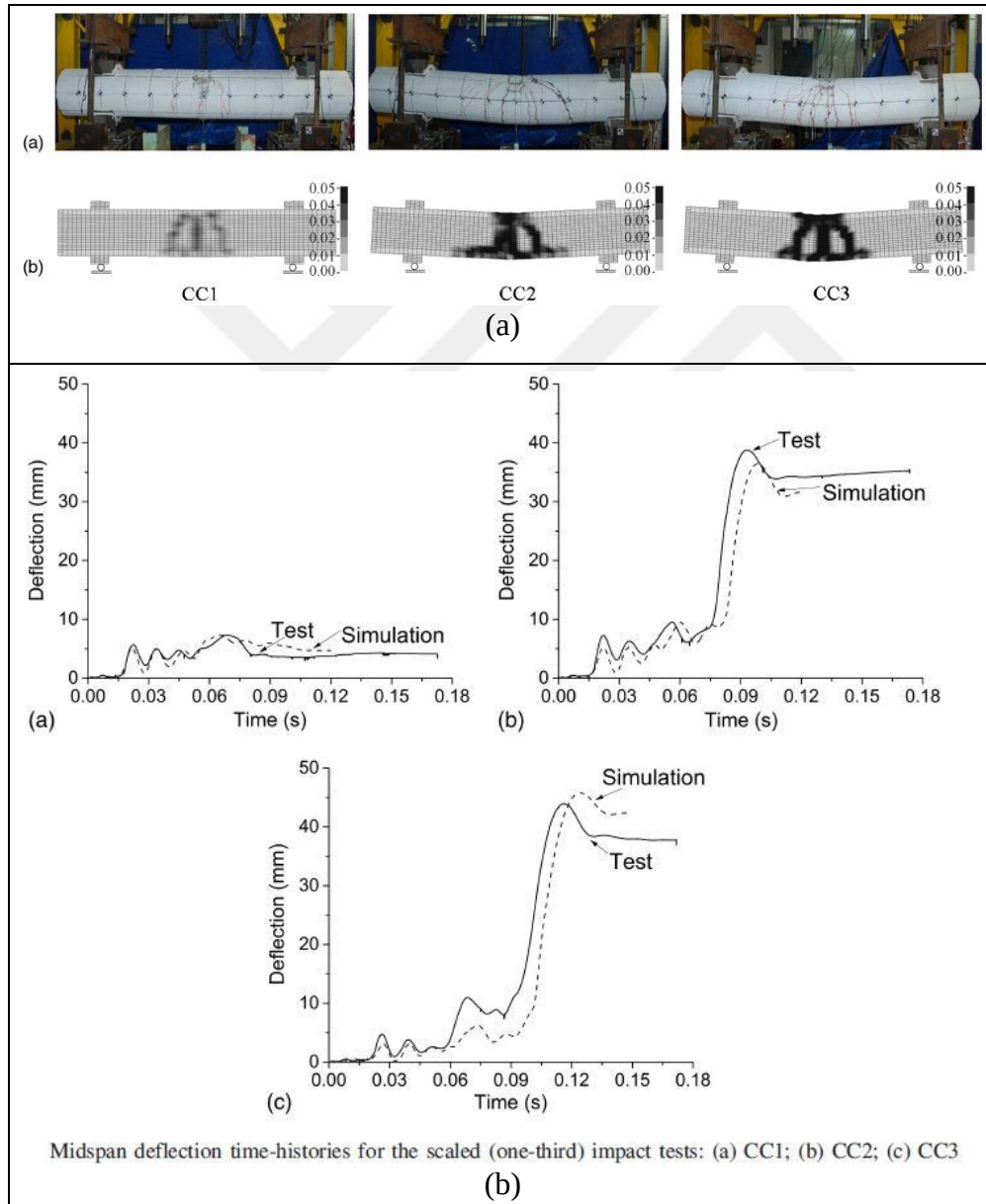
Şekil 2.7 : Darbe etkisi sonucu yerdeğiştirmeler (Remennikov ve Kaewunruen, 2006).

Gurbuz ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, dört adet tam ölçekli, eksenel yüklü betonarme kolon numunesi düşen kütle test sistemi altında, yaklaşık olarak araç tampon yüksekliği seviyesinden darbe etkisine maruz bırakılmıştır (Şekil 2.8a). Çalışma sonunda, numune ortasına düşen kütle testlerine kıyasla betonarme kolonların davranışını önemli ölçüde değiştirecek şekilde simetrik olmayan hasarlar meydana gelmiştir. Statik yükleme koşulları altında eğilme kritik olan kolonların, darbe yükleri altında kesme açısından yetersiz olduğu saptanmıştır (Şekil 2.8b).



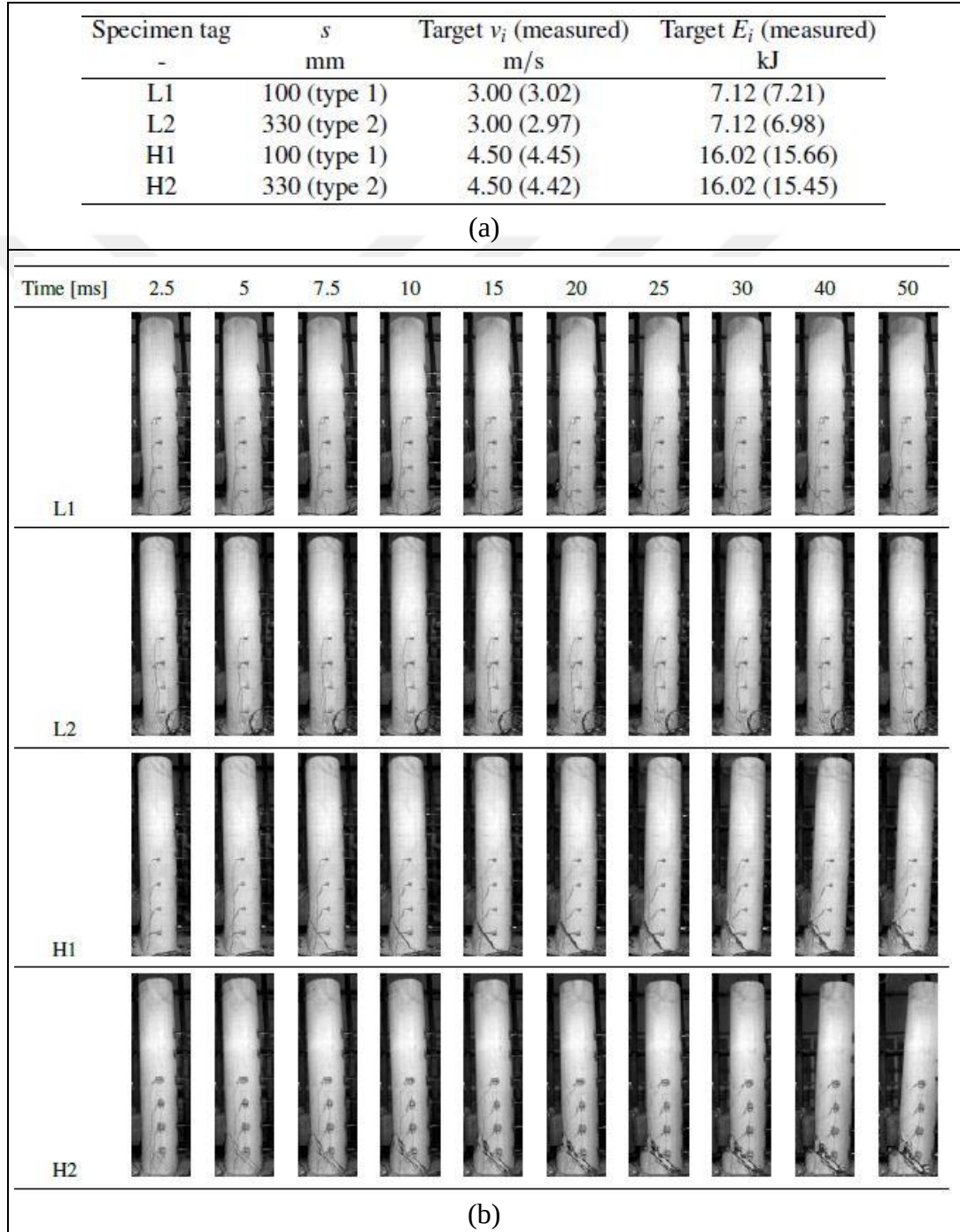
Şekil 2.8 : (a) Deney düzeneği, (b) darbe etkisi sonrası çatlak haritası (Gurbuz ve diğ., 2019).

Chen ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada, betonarme köprü kolonlarının kamyon çarpması altındaki davranışını incelemek üzere üç adet dairesel kesitli betonarme kolon numunesine darbe testleri yapılmış, sonuçlar sonlu eleman modelleriyle karşılaştırılarak sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma ile kolonların yapısal tepkilerinin sadece darbe enerjisinden değil aynı zamanda ilgili darbe hızı ve darbe kütesinden de etkilendiği gösterilmiştir. Çalışma kapsamında hasar modları, reaksiyon kuvvetleri ve orta açıklık yerdeğiştirmelerinin deneysel ve sayısal sonuçları kıyaslanmıştır (Şekil 2.9).



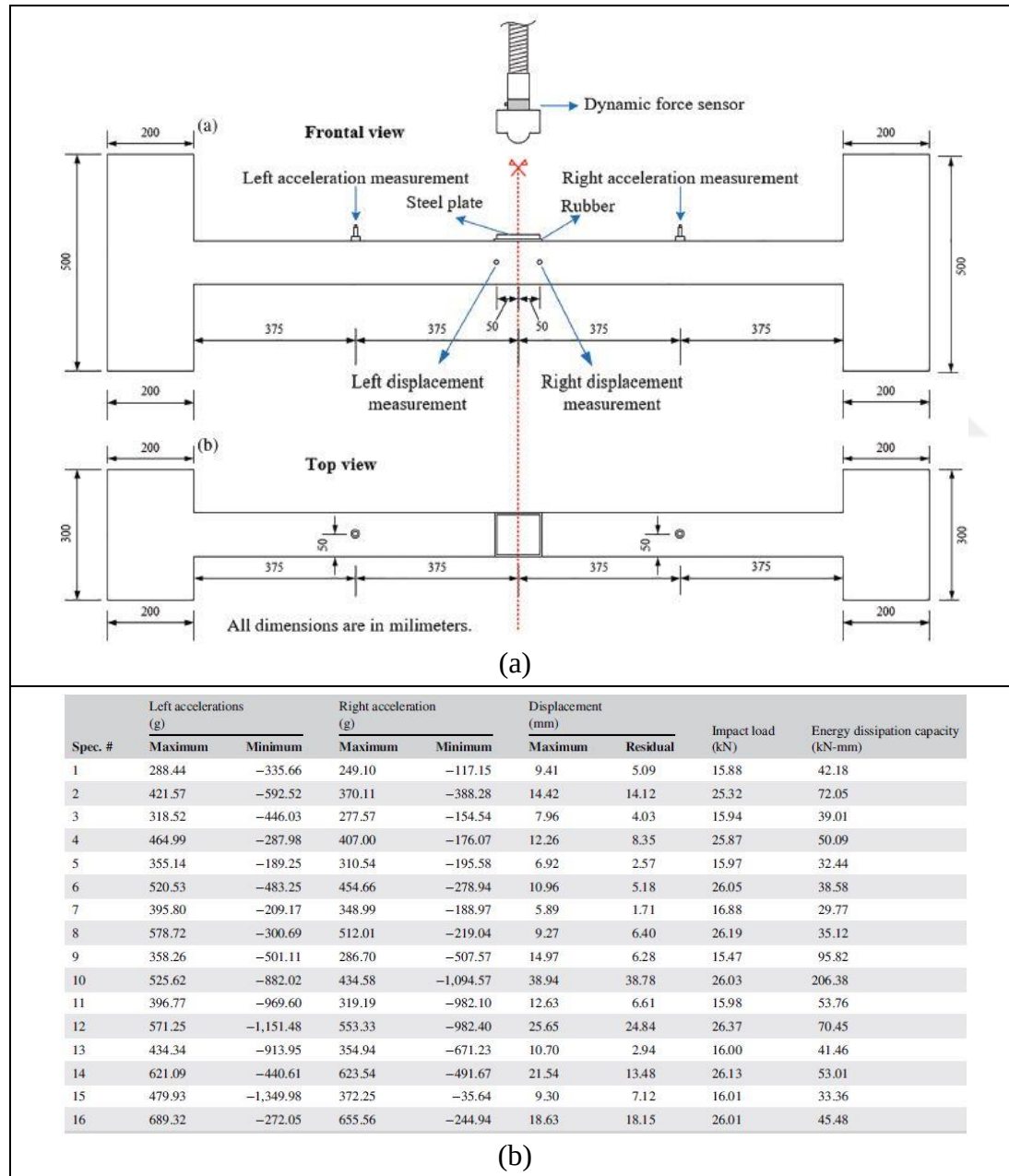
Şekil 2.9 : (a) Deneysel sonuçlara göre hasar durumu, (b) deney sonuçları ile sonlu eleman modelinin karşılaştırılması (Chen ve diğ., 2016).

Demartino ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, dairesel kesitli, 1/3 ölçekli, konsol betonarme kolonlar üzerinde darbe deneyleri yapılmıştır (Şekil 2.10). Çalışma kapsamında üretilen iki farklı etriye aralığına sahip 330 mm çaplı, 1700 mm yüksekliğindeki numuneler deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda kolon tabanından darbe noktasına kadar diyagonal bir kesme çatlağı görülmüştür.



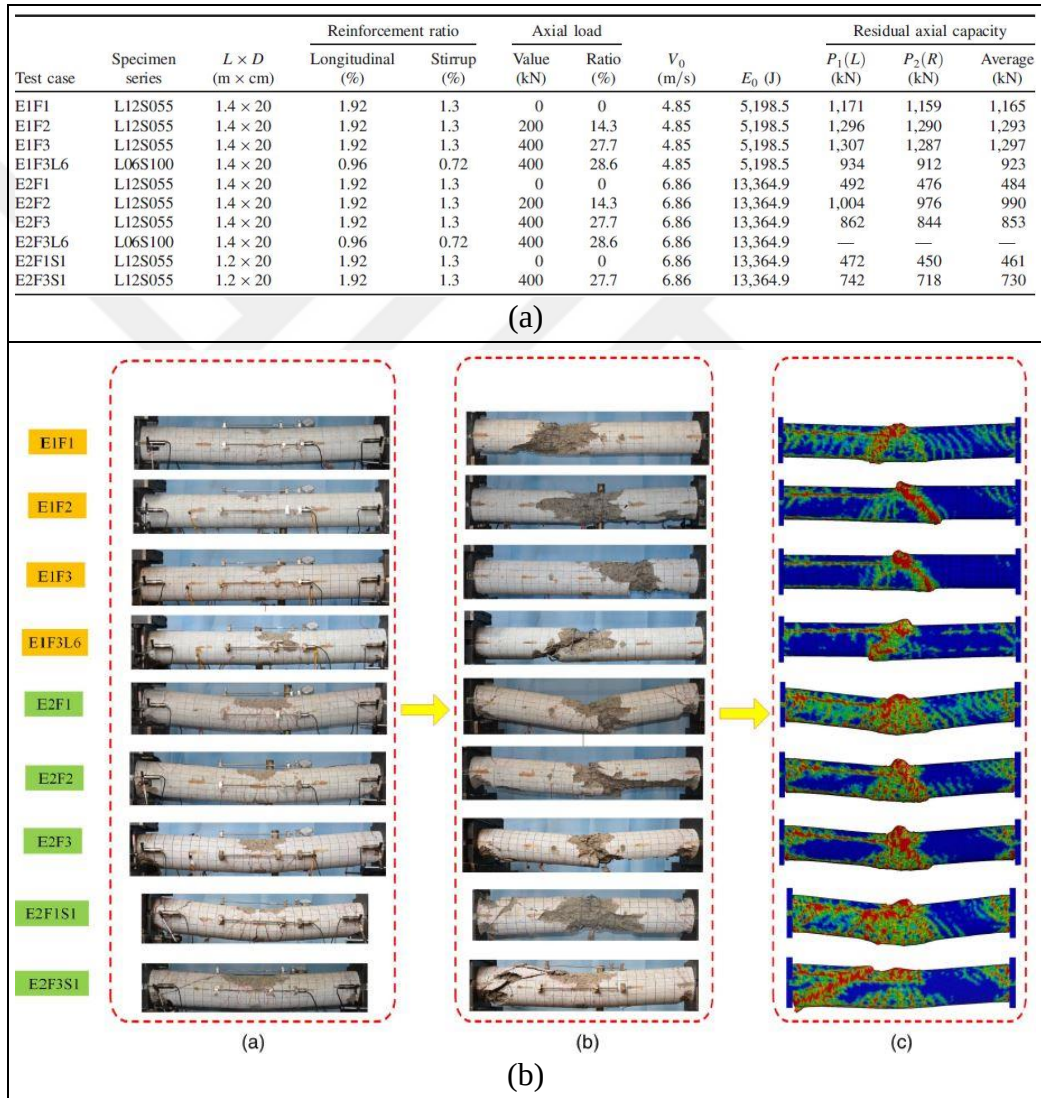
Şekil 2.10 : (a) Deney matrisi, (b) hasarın gelişimi (Demartino ve diğ., 2017).

Yılmaz ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, 100x100x1500 mm boyutlarında, 1/3 ölçekli on altı kare kesitli betonarme kolona düşen ağırlık test sistemi kullanılarak darbe deneyi yapılmıştır (Şekil 2.11a). Çalışma kapsamında eksenel yük seviyesi, darbe enerjisi ve kesme donatısı oranı değişken olarak seçilmiştir. Çalışma ile kolonlara etkiyen yanal darbe yükünün artmasıyla kolonlarda ölçülen ivme değerleri, maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler ile enerji yutma kapasitesi artmıştır. Kesme donatısı oranının artmasıyla benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Eksenel yük oranının artmasıyla kolonlarda ölçülen ivme değerleri artmış, maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler ile enerji yutma kapasiteleri azalmıştır (Şekil 2.11b).



Şekil 2.11 : (a) Deney düzeneği, (b) deney sonuçları (Yılmaz ve diğ., 2019).

Fan ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, dairesel betonarme köprü kolonlarının darbe etkisi sonrasında artık eksenel yük kapasiteleri sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada boyuna ve enine donatı oranı, eksenel yük oranı ve darbe hızı değişken olarak seçilmiştir (Şekil 2.12a). Yanal darbe yüklemesinin neden olduğu artık deformasyonlar arttıkça, artık eksenel dayanımların azaldığı, kesme darbe hasarının, eğilme darbe hasarına oranla eksenel kapasitede daha fazla azalmaya neden olduğu görülmüştür. Deneysel çalışma sonuçları ile sonlu eleman modelleriyle yapılan çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 2.12b).



Şekil 2.12 : (a) Deney matrisi, (b) darbe etkisi sonrası ve eksenel yükleme sonrası deneysel sonuçlarla sayısal sonuçların kıyaslanması (Fan ve diğ., 2019).

Zhou ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada farklı etriye aralıklı ve farklı eksenel yük oranlı kolonların darbe etkisi altındaki davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Eksenel yük oranı fazla olan numunelerde kalıcı yerdeğiştirmelerin ve

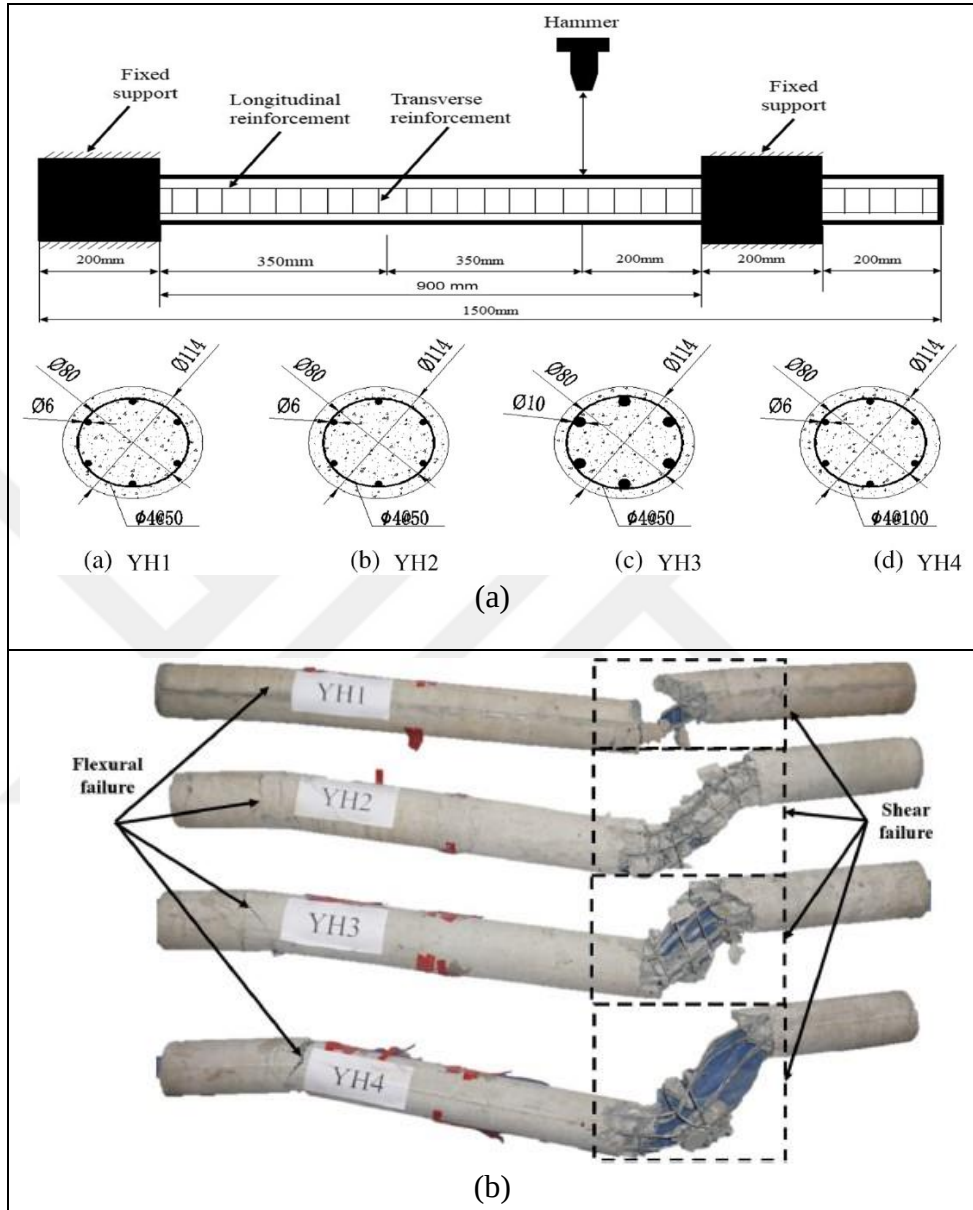
hasar oranının daha az olduğu görülmüştür. Etriye aralığı az olan numunelerin kesme hasarına daha yatkın olduğu, etriye aralığı azaldıkça hasarın eğilmeye doğru yaklaştığı saptanmıştır. Çalışma sonucunda kolonların dinamik kesme kapasitesinin belirlenmesinde basitleştirilmiş bir hesaplama yöntemi önerilmiştir. Statik kesme kapasitesinin 4.17 katı değerinin yaklaşık dinamik kesme kapasitesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Şekil 2.13).

Component crack pattern and failure mode.			
Specimens	Crack		Failure mode
	Impact face	Main crack	
Z1-150-0.2			Punch failure
Z2-100-0.2			Bending-shear failure
Z3-50-0.2			Bending-shear failure
Z4-50-0.3			Bending-shear failure
Z5-50-0.4			Bending failure

Şekil 2.13 : Darbe sonrası hasar modları (Zhou ve diğ., 2021).

Al-Bukhaiti ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada, boyuna ve enine donatı oranları farklı, eksenel yüksüz, ölçekli dört kolon numunesi üzerinde darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda, numunelerin tamamında darbe hızıyla artan hasar düzeyi, yerdeğiştirmeler ve kesme hasarı gözlenmiştir. Boyuna donatı oranının artmasıyla hasarın azaldığı, hasar görülen bölgenin küçüldüğü saptanmıştır. Etriye oranının etkisinin ise kısıtlı olduğu vurgulanmıştır (Şekil 2.14). Al-Bukhaiti ve diğ.

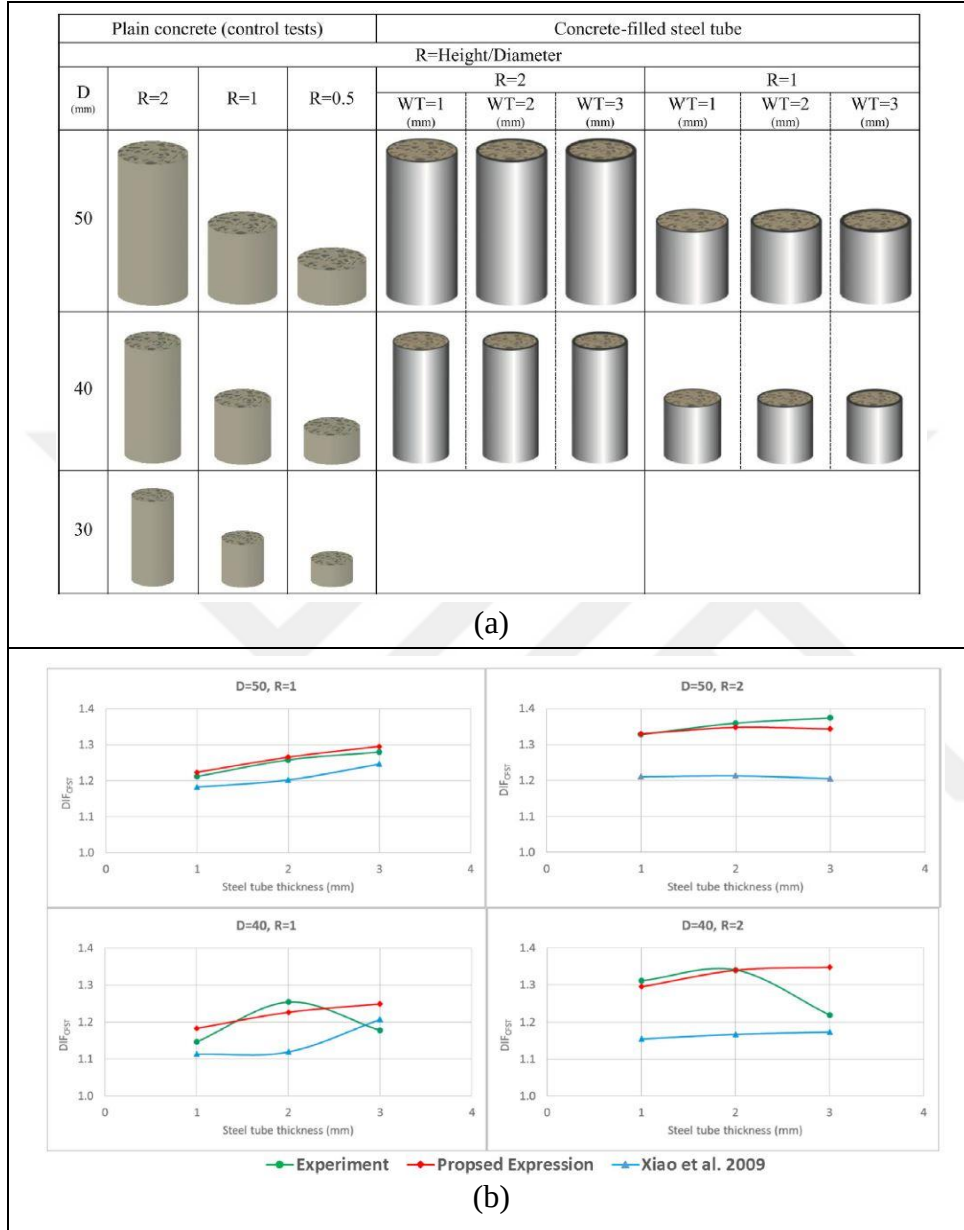
(2023) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise deneysel çalışması yapılan numuneler modellenerek sonuçlar karşılaştırılmış ve kalan kesme kapasiteleri teorik olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.14 : Deneysel çalışmaya ait (a) kolon kesitleri, (b) hasar durumları (AL-Bukhaiti ve diğ., 2022).

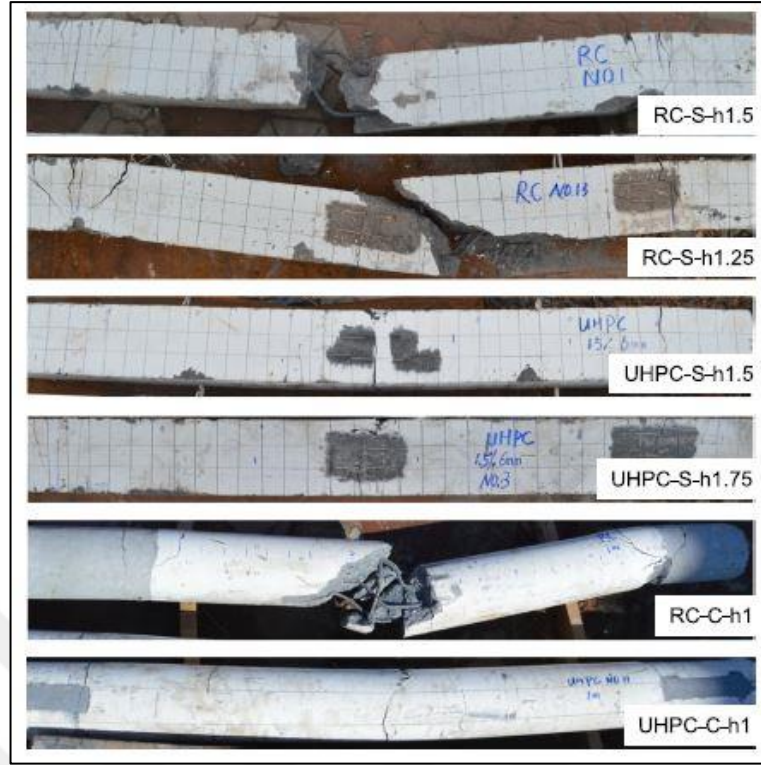
Mirmomeni ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada, darbeye maruz beton dolgulu çelik tüp kolonların (CFST) boyut etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla farklı yükseklik/çap oranında ve farklı çelik boru çapı ve et kalınlığında silindirik kolonlar deneysel olarak incelenmiş, referans betonarme kolon ve içi boş çelik tüp kolonla kıyaslanmıştır (Şekil 2.15a). Çalışma sonucunda, CFST kolonlarda numunelerin en-boy oranı ne kadar büyükse dinamik artış faktörü (DIF) değerleri o kadar yüksek olur. Uç sınır koşullarının sürtünme seviyesi ile DIF değerleri orantılıdır. Akma gerilmesi için

dinamik artış faktörünün (DIFy) artan yükseklik/çap oranı ile arttığı, artan çap/et kalınlığı oranı ile azaldığı bulunmuştur. Çalışma sonucunda deneysel sonuçlar ile uyumlu bir dinamik artış faktörü hesabı sunulmuştur (Şekil 2.15b).



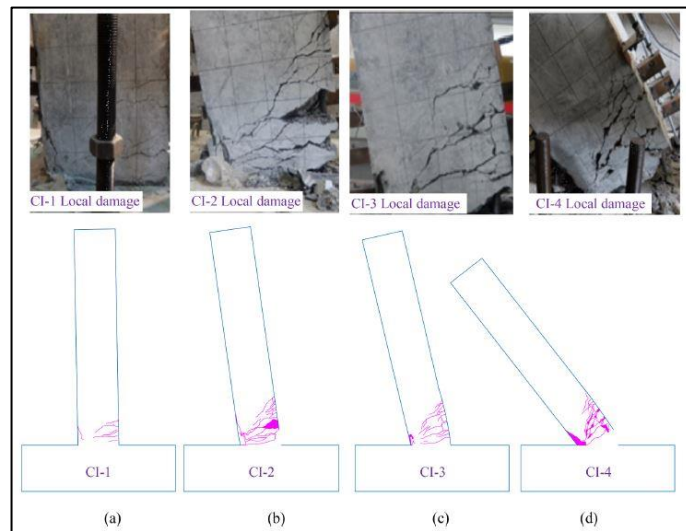
Şekil 2.15 : (a) Deneysel çalışmada kullanılan numuneler, (b) dinamik artış faktörlerinin (DIF) karşılaştırılması (Mirmomeni ve diğ., 2016).

Wei ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, normal dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı dairesel ve kare kesitli betonarme kolonların darbe etkisi altındaki davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma, ölçekli kolonların ortasına ağırlık düşürülmesi ile oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda normal dayanımlı betonarme kolonlarda kesme hasarı, ultra yüksek dayanımlı betonarme kolonlarda ise eğilme hasarı gözlenmiştir (Şekil 2.16).



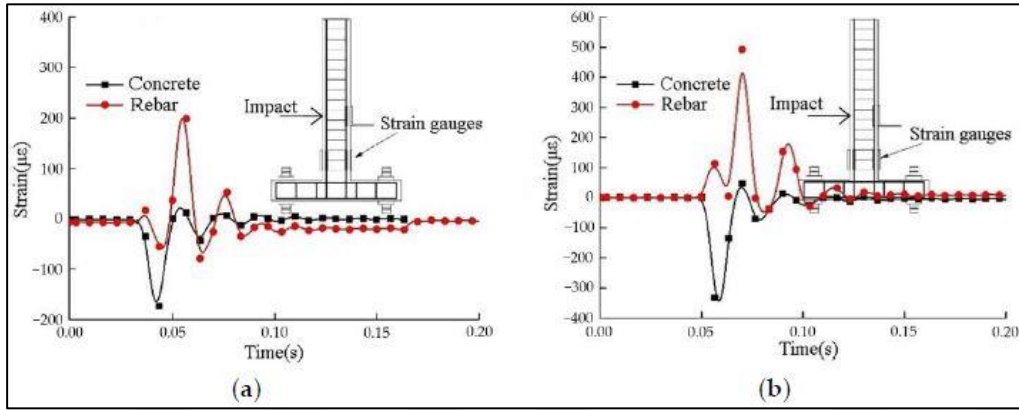
Şekil 2.16 : Deney sonrası hasar durumları (Wei ve diğ., 2019).

Song ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada darbe hızı ile betonarme kolonların dönme ilişkisi incelenmiştir. Bu amaçla üretilen beş betonarme kolon ve sonlu eleman modelleri incelenmiştir. Sayısal çalışmada darbe hızı, boyuna donatı oranı ve eksenel yük oranı değişken olarak seçilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma sonucunda darbe sonrası moment-dönme ilişkisini elde etmeye yönelik bir ampirik yaklaşım önerilmiştir (Şekil 2.17).



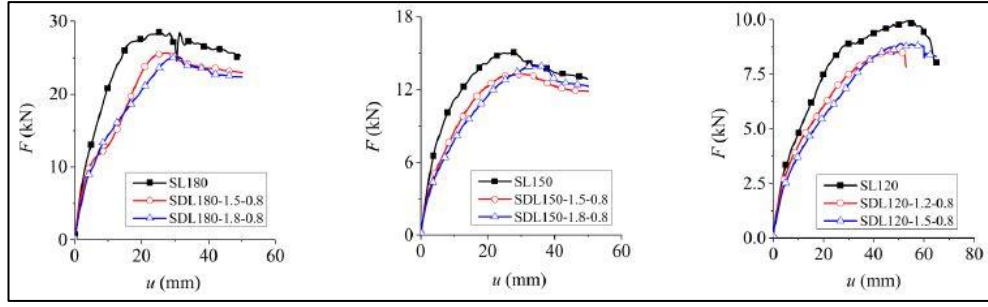
Şekil 2.17 : Farklı darbe hızlarına ait hasar modları (a) 2.95 m/s, (b) 5.38 m/s, (c) 5.49 m/s, (d) 6.17 m/s (Song ve diğ., 2023).

Chen ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada, farklı ölçülerde ve farklı eksenel yük seviyesindeki betonarme kolonların farklı darbe yükleri altındaki davranışı, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla ölçekli betonarme kolon numunelerine farklı yükseklikten, farklı ağırlıktaki kütleler çarpılarak hasar modları belirlenmiş ve birim şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Çalışmanın sayısal kısmında ise darbe enerjisi, enine ve boyuna donatı oranı, narinlik oranı, eksenel yük oranı, beton basınç dayanımı gibi faktörler incelenmiştir. Çalışma sonucunda, boyuna donatı oranı arttığında darbe hasarının ve plastik şekildeğiştirmelerin azaldığı, kolon yüksekliği arttıkça yerdeğiştirmelerin arttığı, narinliğin yatay hasar modunda önemli bir değişikliğe yol açmadığı saptanmıştır (Şekil 2.18).



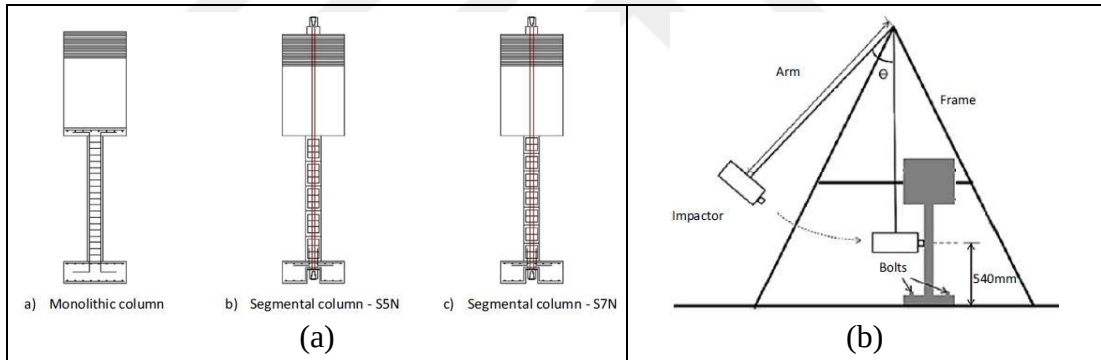
Şekil 2.18 : Şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi (a) kütle düşme yüksekliği 30 cm, (b) kütle düşme yüksekliği 80 cm (Chen ve diğ., 2023).

Ye ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada, eksenel yüklü, kare kesitli toplam on altı adet ölçekli betonarme kolon numunesi darbe etkisi altında incelenmiş ve altı numunede darbe sonrası artık yük taşıma kapasitesi ölçülmüştür. Deneysel çalışma kapsamında kesme açıklığı oranı, darbe ağırlığı ve darbe hızı değişken olarak seçilmiş ve darbe kuvveti, yerdeğiştirme, birim şekildeğiştirme, çatlak şekilleri ve hasar modları incelenmiştir. Çalışma sonucunda atalet etkilerinin betonarme kolonların dinamik davranışında önemli rol oynadığı görülmüştür. Park-Ang hasar tespit modelinin modifiye edilmesiyle, darbe sonrası taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde kullanılabileceği saptanmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : Betonarme kolonların ve kompozit kolonların farklı eksenel yük oranları (0, 0.3, 0.5) altında hasar durumları (Ye ve diğ., 2022).

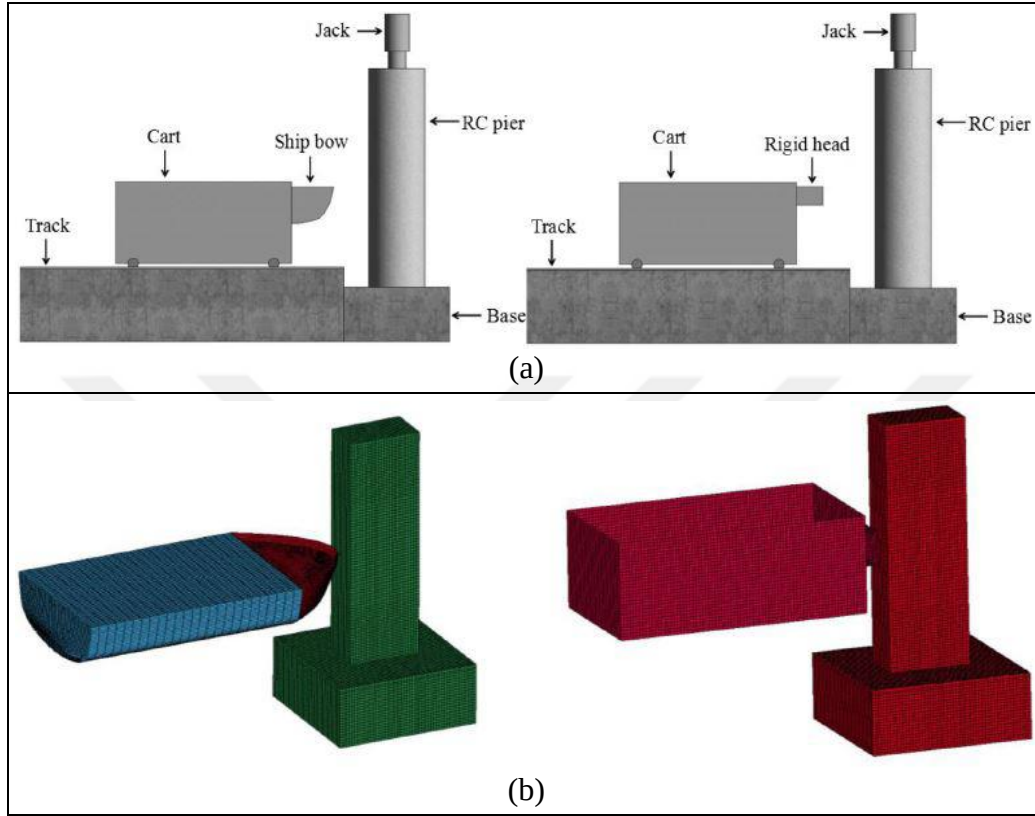
Zhang ve diğ. (2016) ardgermeli prekast segmental kolonların darbe etkisi altındaki davranışını incelemiştir. Bu amaçla aynı yükseklikte farklı sayıda segmentten oluşan ardgermeli iki kolon ve bir adet referans monolitik kolon sarkaç vasıtasıyla yanal darbe etkisine maruz bırakılmış, darbe yükü-zaman eğrileri, kolonda meydana gelen deformasyonlar ve göçme modu araştırılmıştır (Şekil 2.20). Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre daha fazla segmente sahip ardgermeli kolonun diğer kolonlara göre darbe etkisi altında daha esnek olduğu bulunmuştur.



Şekil 2.20 : (a) Numunelerin şematik gösterimi, (b) Deney düzeneğinin şematik gösterimi. (Zhang ve diğ., 2016).

Yunlei ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, gemi pruvası modeli üzerinde yarı statik bir basınç testi ve sayısal simülasyonlar gerçekleştirilerek pruvanın statik özellikleri belirlenmiş hem gemi-köprü kolonu çarpışmasının ölçekli model testleri hem de sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.21). Çalışma sonucunda eşdeğer basitleştirilmiş bir pruva modeli sunulmuş, deneysel ve sayısal simülasyonlarla darbe esnasındaki davranış incelenmiştir. Farklı darbe hızlarına ve farklı pruva rijitliklerine sahip gemilerin çarpışma sonrası köprü kolonlarının darbe kuvveti ve dinamik tepkisi deneysel olarak incelenmiş, rijit başlığın gemi pruvasından 3.5 kat daha fazla pik darbe kuvvetine sahip olduğu bulunmuştur. Sayısal simülasyonlarda köprü kolonlarının nonlinear malzemelerle tanımlanmasında, rijit

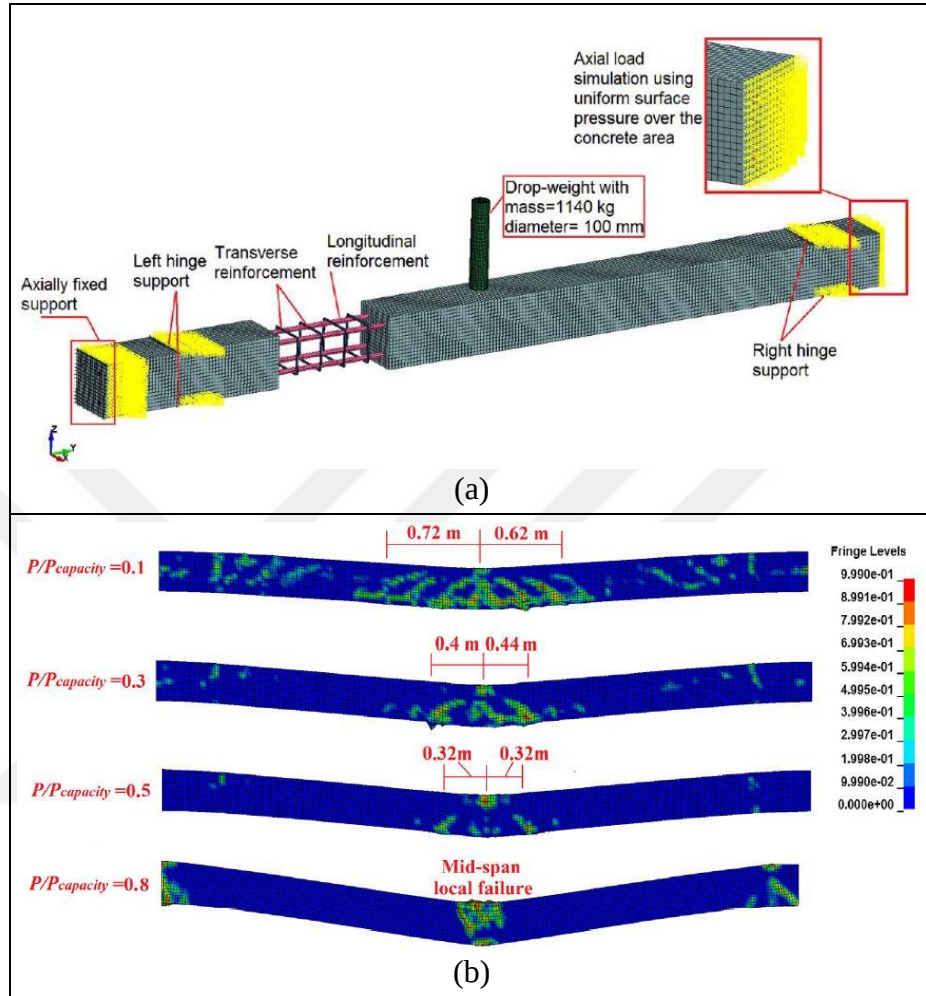
veya elastik malzemelerle tanımlanması durumuna göre daha gerçekçi sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Ölçekli deneysel çalışma ile sayısal simülasyon karşılaştırması yapıldığında, sayısal simülasyonlarda %8.2 farkla güvenilir sonuçlar elde edildiği vurgulanmıştır.



Şekil 2.21 : (a) Deney düzeneği, (b) sonlu eleman modelleri. (Yunlei ve diğ., 2019).

Gholipour ve diğ. (2018) yatay darbe yükleri altındaki betonarme kolonlar üzerinde eksenel yükün etkisini sayısal olarak incelemiştir (Şekil 2.22a). Sonlu elemanlar modeli üzerinde yatay olarak konumlandırılan betonarme kolonların farklı bölgeleri (kolon tabanından 0.5 m ve 1.0 m mesafe) üzerine, düşen kütle simülasyonu yapılarak, farklı darbe hızlarında (1, 5, 10 m/s) ve farklı eksenel yük oranları altındaki (eksenel yük kapasitesinin %10, %30, %50, %80 oranları) davranış araştırılmıştır. Kolon üzerinde darbe uygulanan bölgenin orta noktadan mesnete yaklaşmasıyla göçme modunun eğilme hakim güç tükenmesi durumundan, eğilme-kesme veya kesme hakim güç tükenmesi moduna dönüşebileceği bulunmuştur. Kolon orta noktasına darbe uygulanması durumunda, eksenel yük oranının artmasının, maksimum darbe kuvvetini artırdığı ve atelet kuvvetleri, eğilme momenti, kesme kuvveti gibi iç kuvvetlerin artmasına neden olduğu ortaya çıkarılmıştır (Şekil 2.22b). Bununla birlikte çalışmada

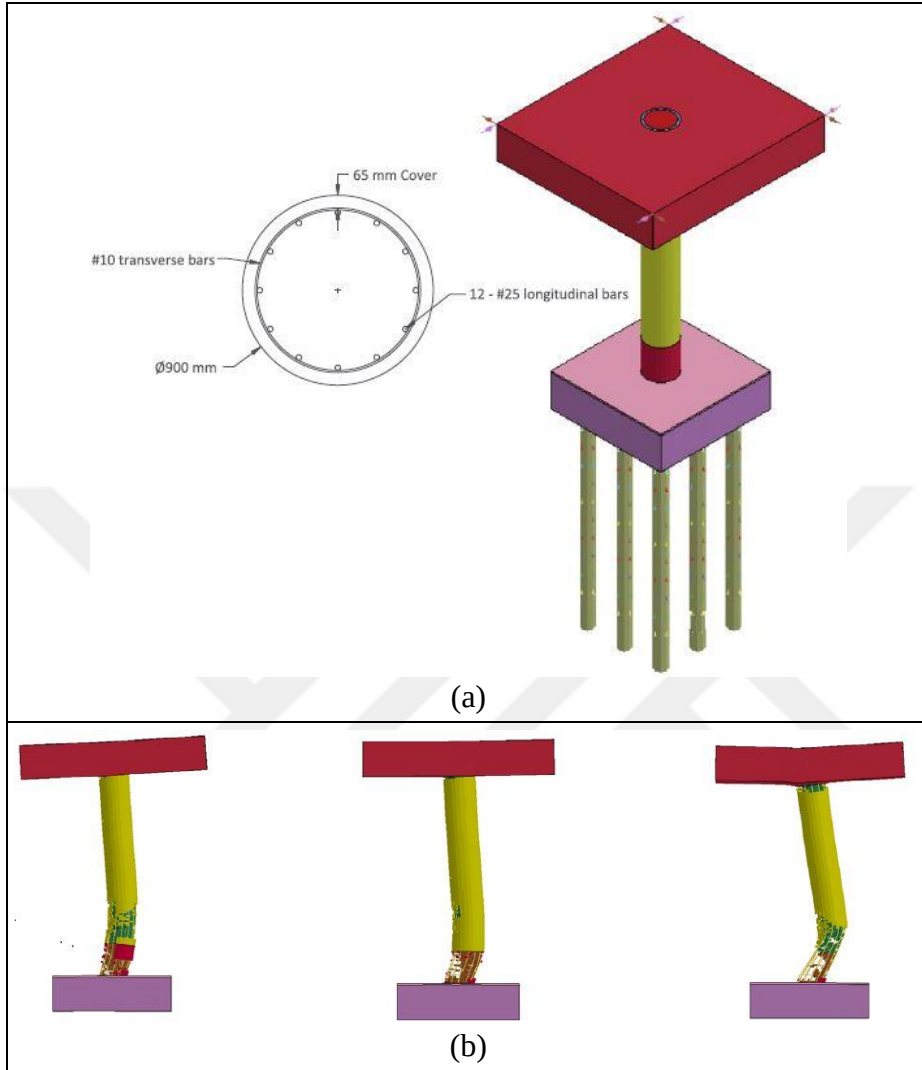
gemi çarpmasına maruz kalan askılı bir köprü yapısına ait kolonun üstyapısının olması ve olmaması durumlarını içeren bir çarpma senaryosu altındaki davranışı sonlu elemanlar simülasyonu ile incelenmiştir.



Şekil 2.22 : (a) Kolon sonlu eleman modeli, (b) kolon ortasına darbe uygulanması durumunda farklı eksenel yük seviyeleri için hasar durumları. (Gholipour ve diğ., 2018).

Auyeung ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, köprü kolonlarına araç çarpması simüle edilerek araç hızı, köprü kolonu çapı, enine donatı oranındaki değişimlerin performans üzerindeki etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, 8142 kg ağırlıklı bir kamyonun 50, 150, 300 mm etriye aralığında ve 600, 900, 1200 mm çaplı köprü kolonlarına, 55, 80, 120 km hızlarla çarpmasıyla oluşan dinamik etkiler karşılaştırılarak yeni bir hasar oranı indisi (DRI: damage ratio indice) önerilmiştir (Şekil 2.23). Araç darbe hızının darbe kuvvetini ve dolayısıyla köprü kolonunun kesme talebini belirleyen ana faktör olduğu, kesme veya eğilme türü güç tükenmesi durumu

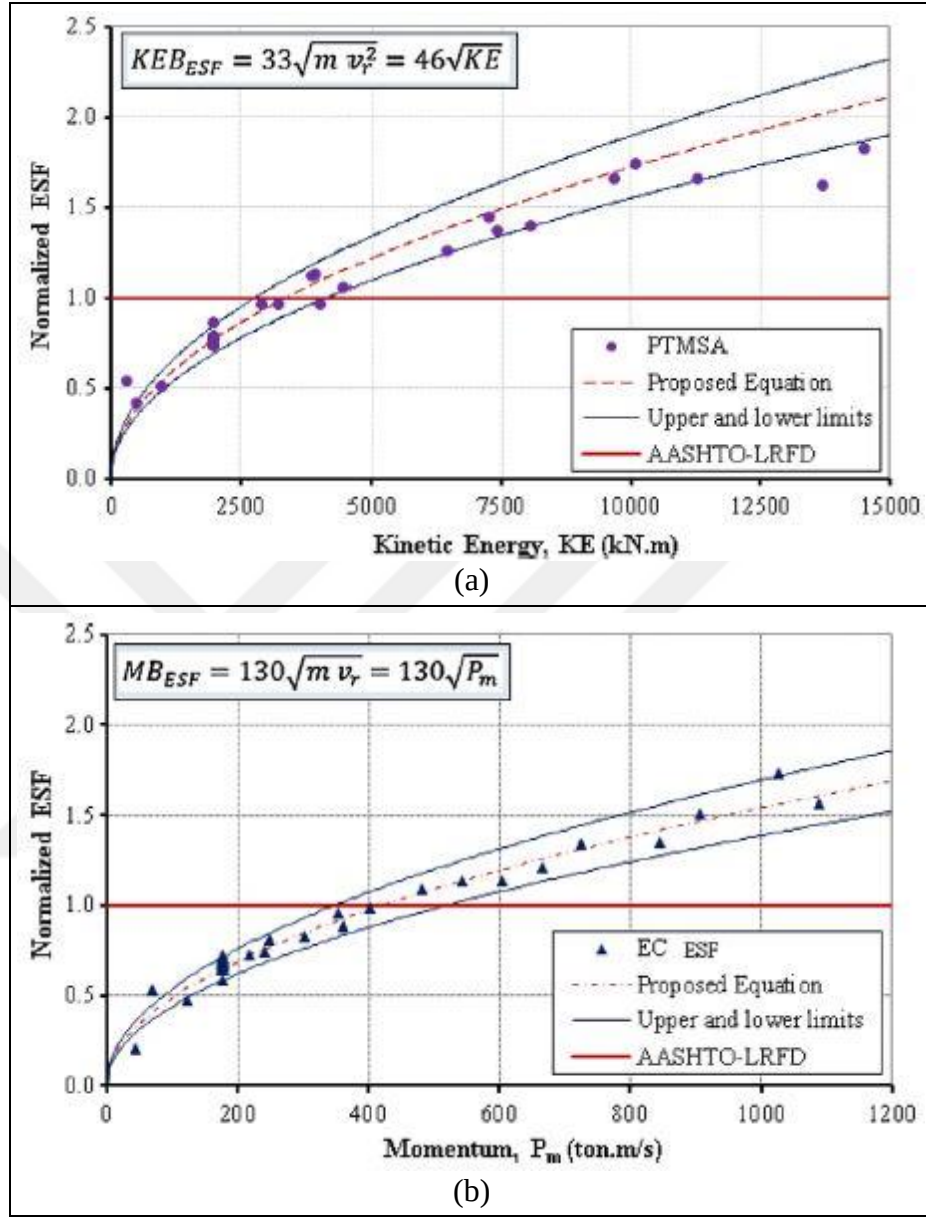
oluşmasının kolon çapı ile ilintili olduğu, enine donatı oranının ise lokal hasarlara karşı koyma kapasitesini belirlediği ortaya koyulmuştur.



Şekil 2.23 : (a) Kolon sonlu eleman modeli, (b) 50, 150, 300 mm etriye aralıklı ve 900 mm çaplı kolona, 120 km/sa hızla araç çarpması durumu. (Auyeung ve diğ., 2019).

Abdelkarim ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, betonarme köprü kolonlarına araç çarpması sonlu elemanlar modeliyle analiz edilerek, maksimum dinamik kuvvet (PDF:peak dynamic force) ve eşdeğer statik kuvvet (ESF:equivalent static force) incelenmiştir. Bu amaçla beton modelleri, enine/boyuna donatı oranları, kolonun boyutu, konumu ve sınır koşulları, eksenel yük oranı, araç kütlesi ve hızı gibi birçok parametre üzerinde çalışılmıştır. Rijitlik esaslı eşdeğer statik kuvvet (SB_{ESF} :stiffness-based equivalent static force), Eurocode statik eşdeğer kuvveti (EC_{ESF} :Eurocode equivalent static force) ve 25 ms maksimum hareketli ortalama (PTMSA: peak of the twenty-five mili second moving average) yöntemleri uygulanarak eşdeğer statik

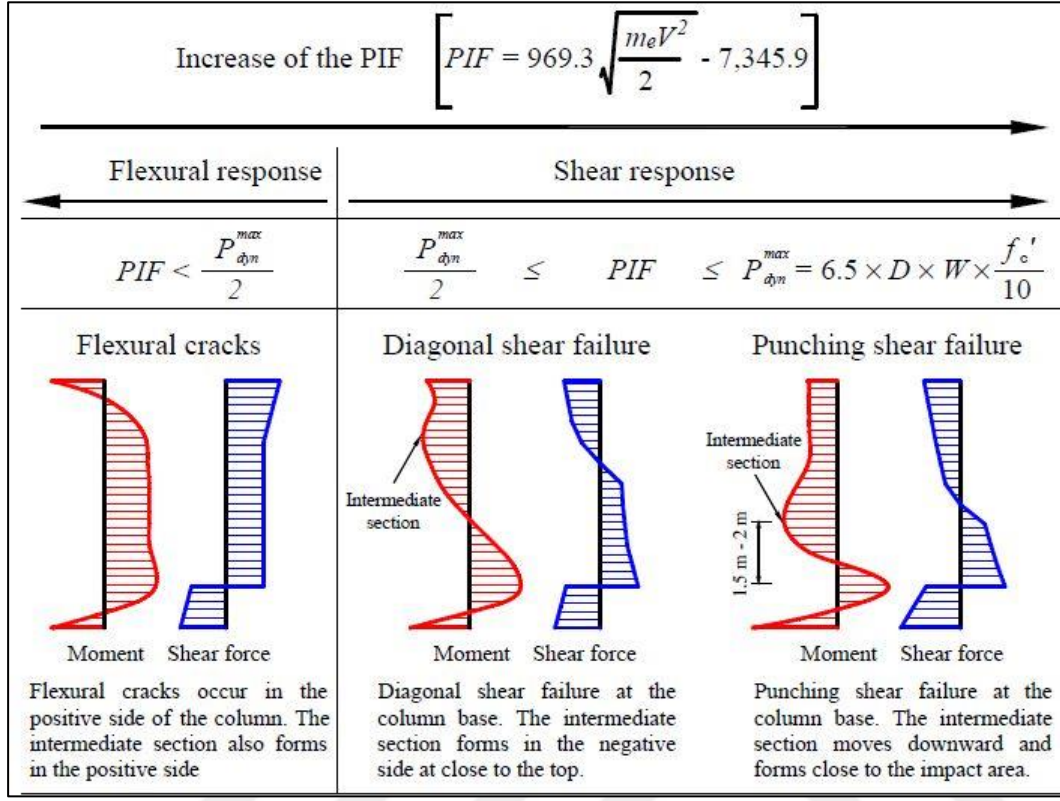
kuvvet hesaplanmış, Eurocode ve AASHTO-LRFD şartnameleri ile kıyaslanarak her iki şartname için de yeni bir hesap yöntemi önerilmiştir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 : (a) AASHTO-LRFD için önerilen hesap yöntemi, (b) Eurocode için önerilen hesap yöntemi. (Abdelkarim ve diğ., 2017).

Do ve diğ. (2019) araç çarpmalarına maruz köprü kolonlarının (RCBC: reinforced concrete bridge column) darbe yükleri altındaki dinamik tepkilerini ve hasar durumlarını incelemek amacıyla sayısal simülasyonlardan yararlanmıştır. Çalışmada orta büyüklükte bir kamyon ve tırın kolonlara çarpması, tampon, motor, kasa ve yük durumları ayrı ayrı ele alınarak, kolonların farklı narinlik, enkesit boyutu, doyunu ve enine donatı oranları, eksenel yük oranını da içerecek şekilde analiz edilmiştir. Kolonun maksimum dinamik kesme kapasitesine (P_{dyn}^{max}) ve darbeden kaynaklanan

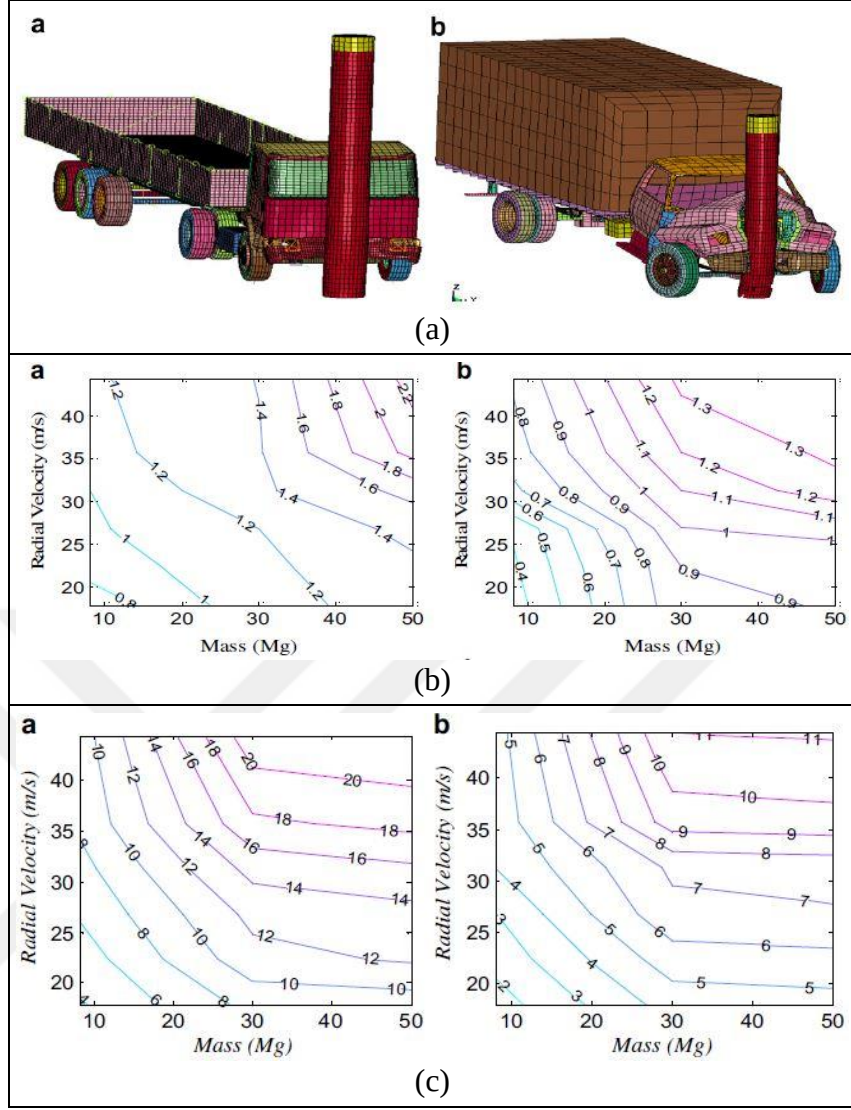
maksimum darbe kuvvetine (PIF: peak impact force) bağlı olarak göçme modu, eğilme ($PIF < 0.5P_{dyn}^{max}$) veya kesme ($PIF > 0.5P_{dyn}^{max}$) olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 : PIF etkisinde kolonun tepkisi ve hasar sınıflandırması. (Do ve diğ., 2019).

Thilakarathna ve diğ. (2010) eksenel yüklü betonarme kolonların araç darbesi altındaki davranışını değerlendirmek amacıyla literatürdeki deneysel çalışma sonuçlarından yararlanarak nonlineer bir model geliştirmiştir. Çalışma sonucunda darbe etkisinin sonlu elemanlar modelleriyle analizi esnasında gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için kullanılması gereken malzeme modelleri ve yükleme koşulları sunulmuştur.

Sharma ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, farklı performans seviyeleri için araç darbelerine maruz kalan bir betonarme kolonun dinamik kesme kuvveti kapasitesi ve talebinin tahminine yönelik bir araştırma yapılmıştır (Şekil 2.26). Önerilen prosedür, statik veya yarı statik analize dayalı metodolojiyi, yapılara araç darbesinin gerçekçi bir temsili olan dinamik analize kaydırır. Dinamik kesme kuvveti talebi darbenin şiddetine bağlı olarak farklı talep seviyelerinde kategorize edilir (Şekil 2.26).

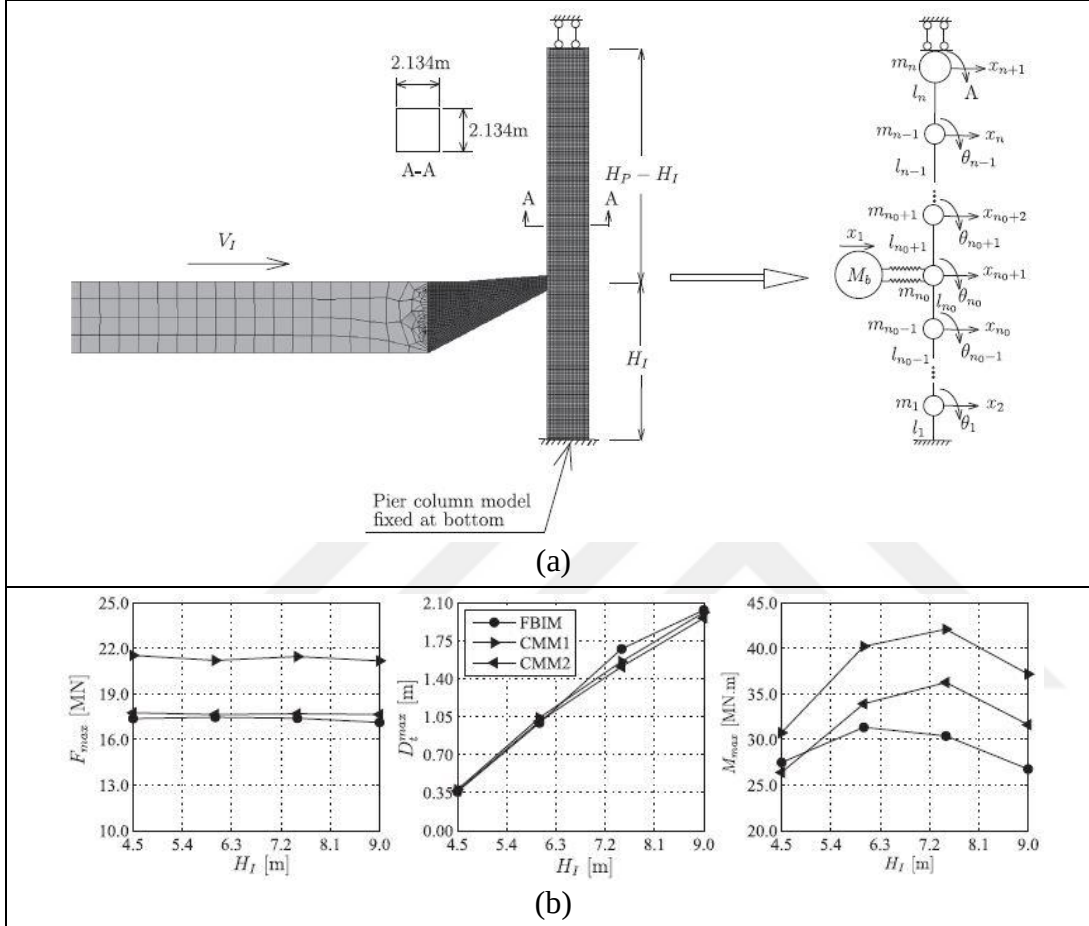


Şekil 2.26 : (a) C1 ve C2 kolonlarına ait çarpma senaryoları, (b) C1 ve C2 kolonlarının P1 performans seviyesindeki dinamik kesme kapasitesi (MN), (c) C1 ve C2 kolonlarının dinamik kesme talebi. (Sharma ve diğ., 2012).

Yuan ve Harik (2010) tarafından yapılan çalışmada, köprü kolonlarının gemi çarpmaları altındaki davranışı sayısal olarak incelenmiş ve AASHTO (AASHTO: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaşım Yetkilileri Birliği) yöntemine benzer şekilde elle hesap yapmayı mümkün kılacak denklemler önerilmiştir.

Wang ve Morgenthal (2017) tarafından yapılan çalışmada, ankastre temelli kare kesitli köprü kolonu elemanlarının malzeme nonlinearlik durumları da göz önüne alınarak, bağlı çok serbestlik dereceli model (CMM: the coupled multi-degree-of-freedom model) test edilmektedir (Şekil 2.27a). Bu kapsamda uzun zaman ve kaynak gerektiren kapsamlı gemi darbe modeli (FBIM: full barge impact model), azaltma katsayısı içermeyen CMM1 modeli ve azaltma katsayısı kullanılan CMM2 modelleri; farklı

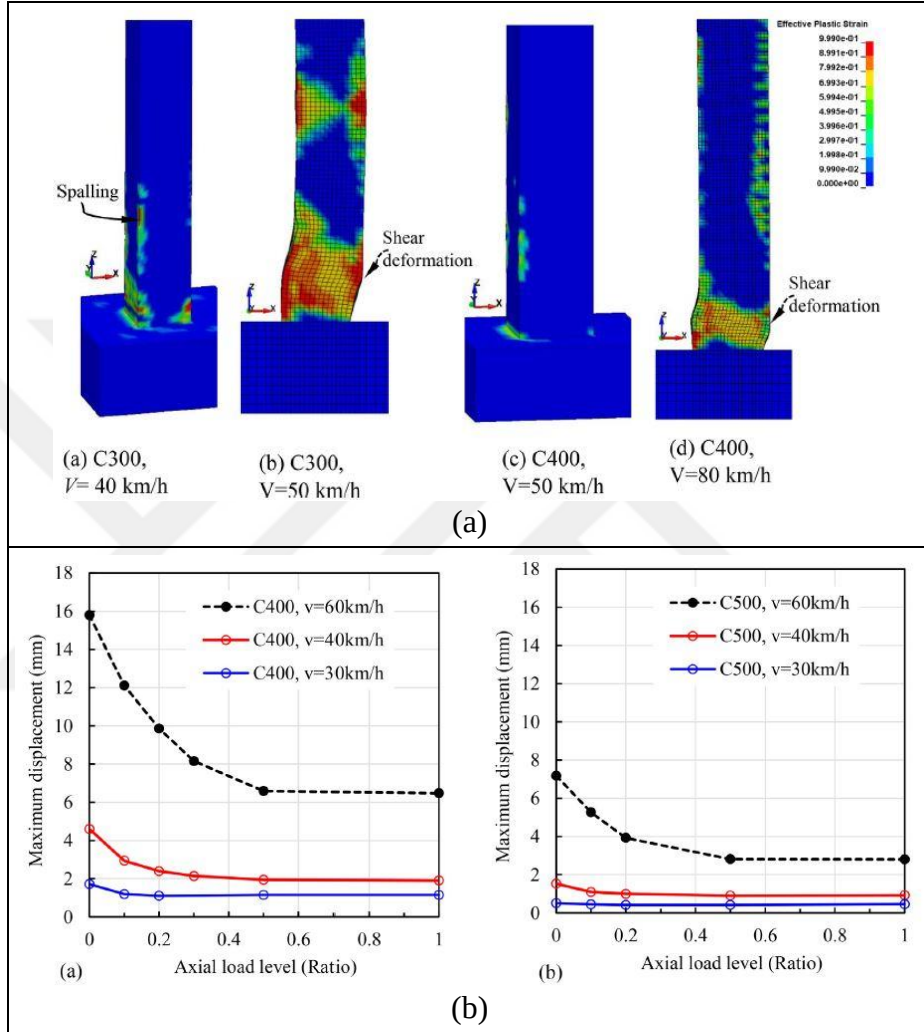
gemi kütleleri, darbe hızları, darbe konumları, kolon yükseklikleri ve boyuna donatı oranlarında kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda önerilen CMM modeliyle, farklı gemi çarpması darbe senaryoları için darbe kuvveti-zaman grafiklerinin ve betonarme köprü kolonlarının dinamik tepkilerinin doğru bir şekilde hesaplanabildiği açıklanmıştır (Şekil 2.27b).



Şekil 2.27 : (a) Gemi darbesi modelinin CMM'ye dönüşümü, (b) farklı darbe konumlarına ait FBIM, CMM1 ve CMM2 modellerine ait maksimum darbe kuvvetleri, maksimum tepe yerdeğiştirmeleri, maksimum eğilme momentlerinin karşılaştırılması (Wang ve Morgenthal, 2017).

Sohel ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, 2203 kg ağırlığındaki bir aracın eksenel yüklü kare kesitli betonarme bir kolona çarpması sayısal simülasyonlarla değerlendirilmiştir (Şekil 2.28a). Çalışmada farklı araç hızları, kolon boyutları ve eksenel yük oranları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda küçük kenar ölçüsüne sahip kolonların (<300x300 mm) düşük araç hızlarında (<60 km/s), araç çarpması nedeniyle kesme göçmesine yatkın olduğu bulunmuştur. Kolon üzerindeki eksenel yükün yanal yerdeğiştirmeyi azaltıcı bir faktör olduğu gösterilmiştir (Şekil 2.28b). Çalışma kapsamında darbe kuvveti-zaman grafiğinden hesaplanan eşdeğer statik kuvvetin

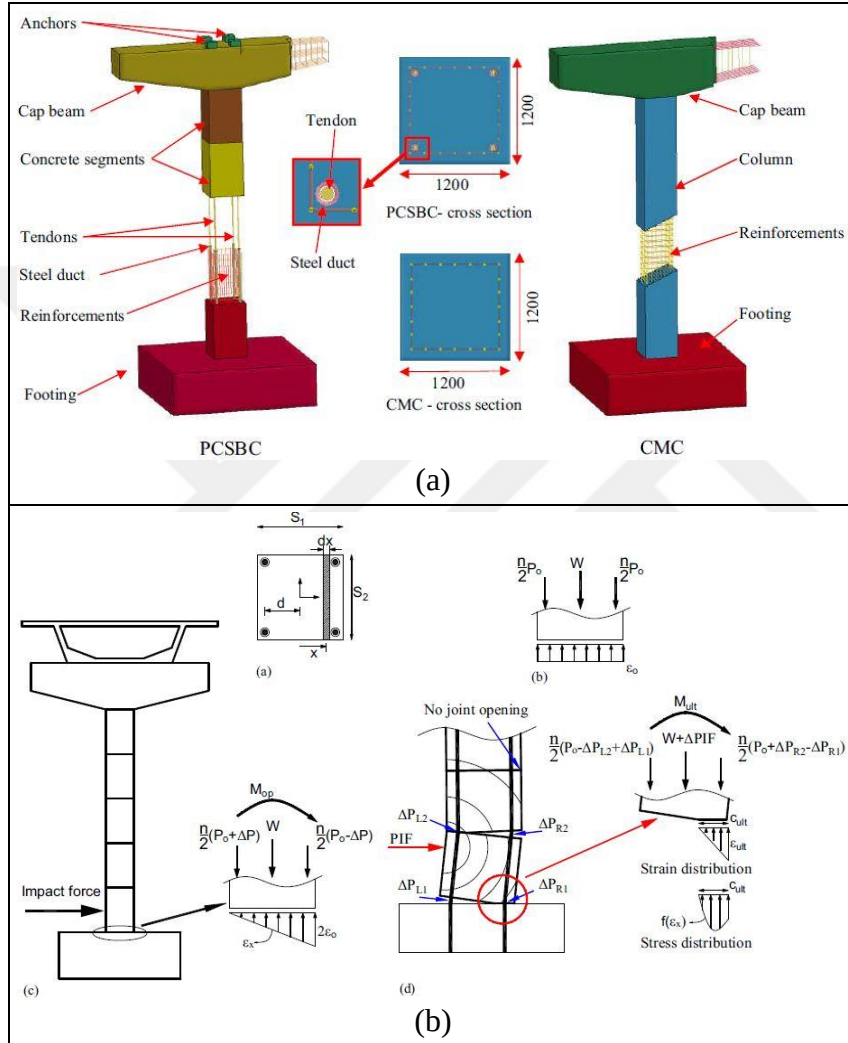
(ESF: Equivalent Static Force), darbe hızının 10 km/s'den fazla olduğu durumlarda Eurocode 1 (EC 1) yönetmeliğindeki değerden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Çalışma ile otopark ve yol kenarı kolonlarının tasarım ve güçlendirilmesinde kullanılmak üzere, ESF ile kolon kesme kapasitesi arasındaki oran olarak tanımlanan hasar indeksi (DI: Damage Index) önerilmiştir.



Şekil 2.28 : (a) Sonlu eleman modelleri, (b) eksenel yük oranı ve maksimum yerdeğiştirme ilişkisi (Sohel ve diğ., 2020).

Do ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, prekast beton segmental köprü kolonlarının (PCSBC: Precast Concrete Segmental Bridge Column) kamyon darbelerine karşı performansı sayısal olarak incelenmiş ve bu kolona karşı gelen bir geleneksel monolitik kolonla (CMC: Conventional Monolithic Column) karşılaştırılmıştır (Şekil 2.29a). Çalışma sonucunda PCSBC ve CMC'nin benzer darbe kuvveti-zaman ilişkisi gösterdiği saptanmıştır. Yüksek darbe kuvvetleri altında PCSBC'lerde kesmeden kaynaklanan kayma ve segmental düğüm noktalarında açılma

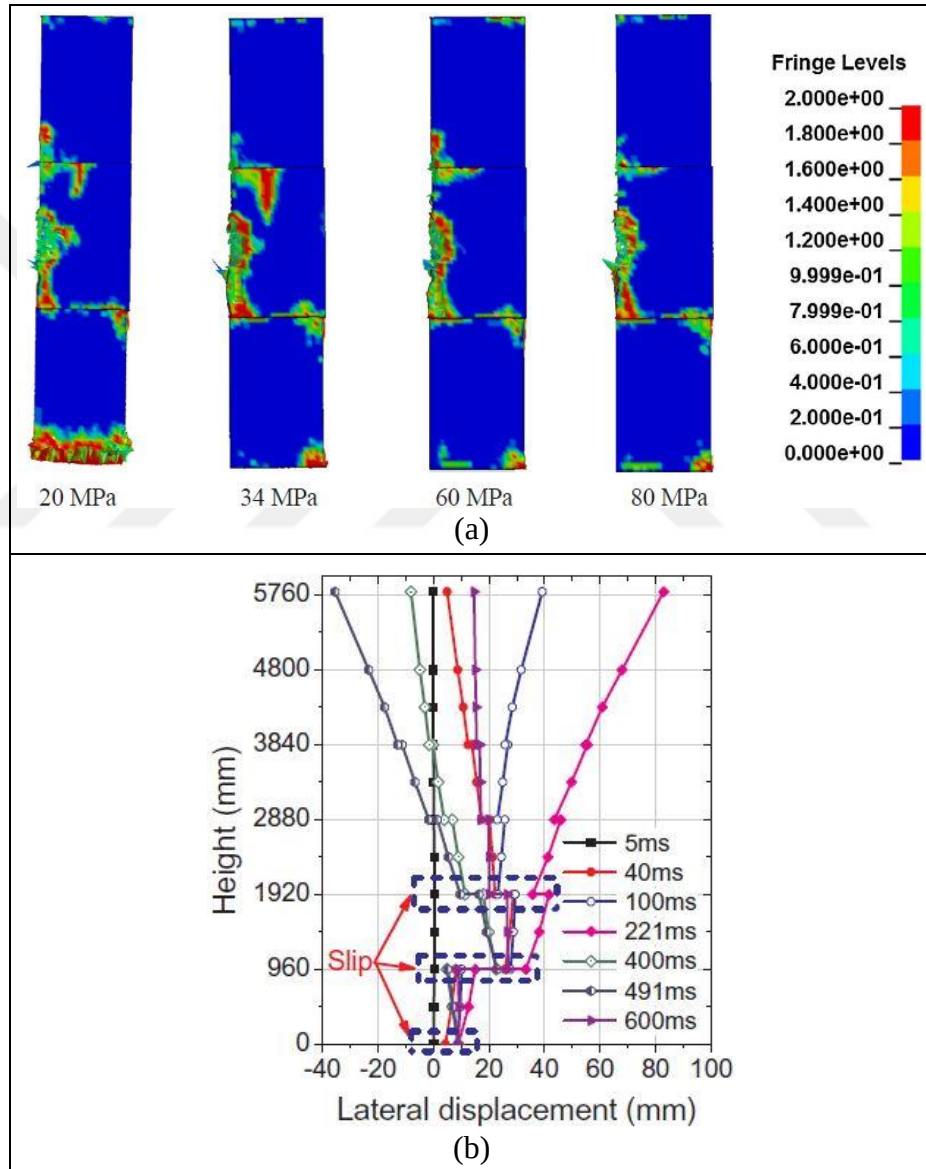
nedeniyle CMC'ye oranla daha küçük eğilme momentleri oluşmuştur. PCBSC'lerde göçme esas olarak en alt iki segmentte oluşan hasar nedeniyle meydana gelmiş, en alt segment tarafından absorbe edilen enerji tüm kolon tarafından absorbe edilen enerjinin %80'ini oluşturmuştur. Çalışma ile segmental düğüm noktasının açılma eğilme momenti ve nihai eğilme momentini tahmin etmede kullanılabilecek analitik yöntem önerilmiştir (Şekil 2.29b).



Şekil 2.29 : (a) Sonlu eleman modelleri, (b) segmental düğüm noktası analizi (Do ve diğ., 2019).

Do ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, prekast beton segmental kolonların araç çarpması altındaki davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, geçmiş deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla doğrulanmış bir sonlu eleman modeli kurularak, segmental kolon üzerindeki darbe etkisi farklı öngerme seviyesi, prekast segment parça sayısı, beton dayanımı ve araç hızı altında incelenmiştir. Çalışma sonucunda, öngerme seviyesinin segmentler arasındaki görece kaymaları ve

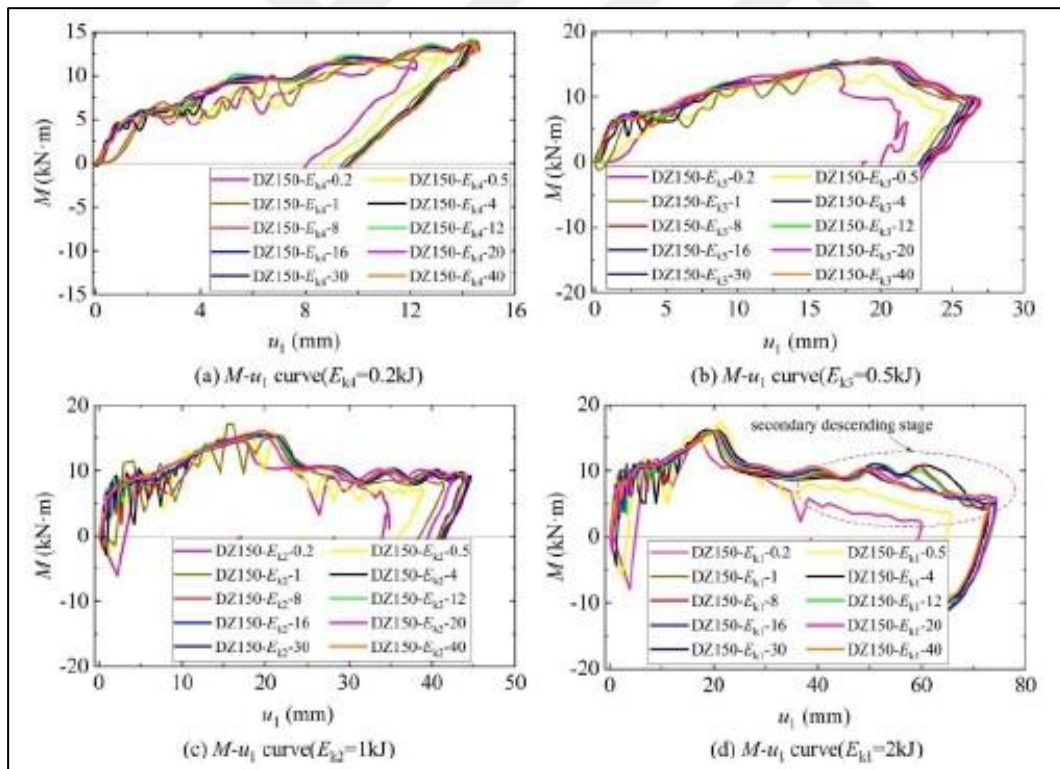
kolonun yanal yerdeğiştirmesini önemli ölçüde azalttığı ancak darbe kuvveti üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Segment sayısının azalması kolonun kendini merkezleme (self-centering) kabiliyetini artırırken daha küçük yanal yerdeğiştirmelere neden olur. Yine segment sayısının darbe kuvveti üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Beton basınç dayanımının segmental kolonun göçme moduna etkisi bulunurken, kalıcı yerdeğiştirme üzerindeki etkisi sınırlıdır (Şekil 2.30). Darbe hızının artırılmasının her zaman pik darbe kuvvetini artırmayacağı saptanmıştır.



Şekil 2.30 : (a) Farklı beton basınç dayanımlarındaki segmental kolonların darbe etkisi altındaki gerilme durumları, (b) 70km/s hızla çarpan aracın kolonda oluşturduğu yanal yerdeğiştirmeler (Do ve diğ., 2018).

Zhao ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonların darbe altındaki direnç mekanizması ve güvenilirlik analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında literatürdeki deneysel sonuçlardan yararlanılarak bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş, darbe uygulanan konum, sınır koşulları, kolon narinliği ve darbe hızındaki değişikliklerin kolonun dinamik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sayısal çalışma sonucunda, kolonun darbe yükleri altındaki güvenilirliğinin darbe hızına, darbe kütlelerine, kesit alanına ve beton dayanımına duyarlı olduğu bulunmuştur.

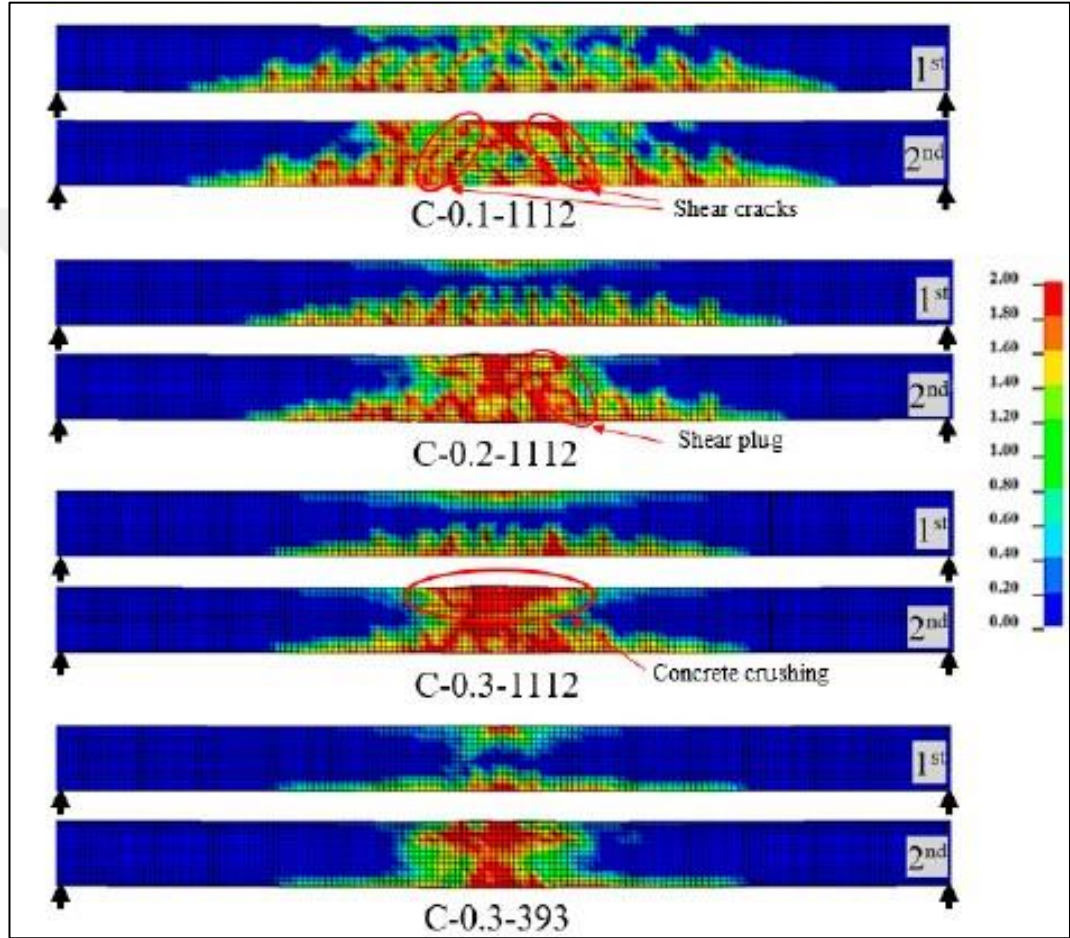
Hu ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada betonarme kolonların farklı kinetik enerjileri altındaki davranışı sayısal olarak incelenmiş, yerdeğiştirmeler ve iç kuvvet değişimleri incelenmiştir. Dört farklı darbe enerjisi düzeyi, her biri on farklı kütle-hız birleşimiyle oluşturularak toplamda kırk farklı parametre test edilmiştir. Çalışma sonucunda, yapısal elemanlarda oluşan hasarın taban eğilme momenti veya taban eğilme momenti ile kolon tepe yerdeğiştirmesi göstergeleri kullanılarak değerlendirilebileceği saptanmıştır (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 : Moment-eğrilik ilişkisi (Hu ve diğ., 2021).

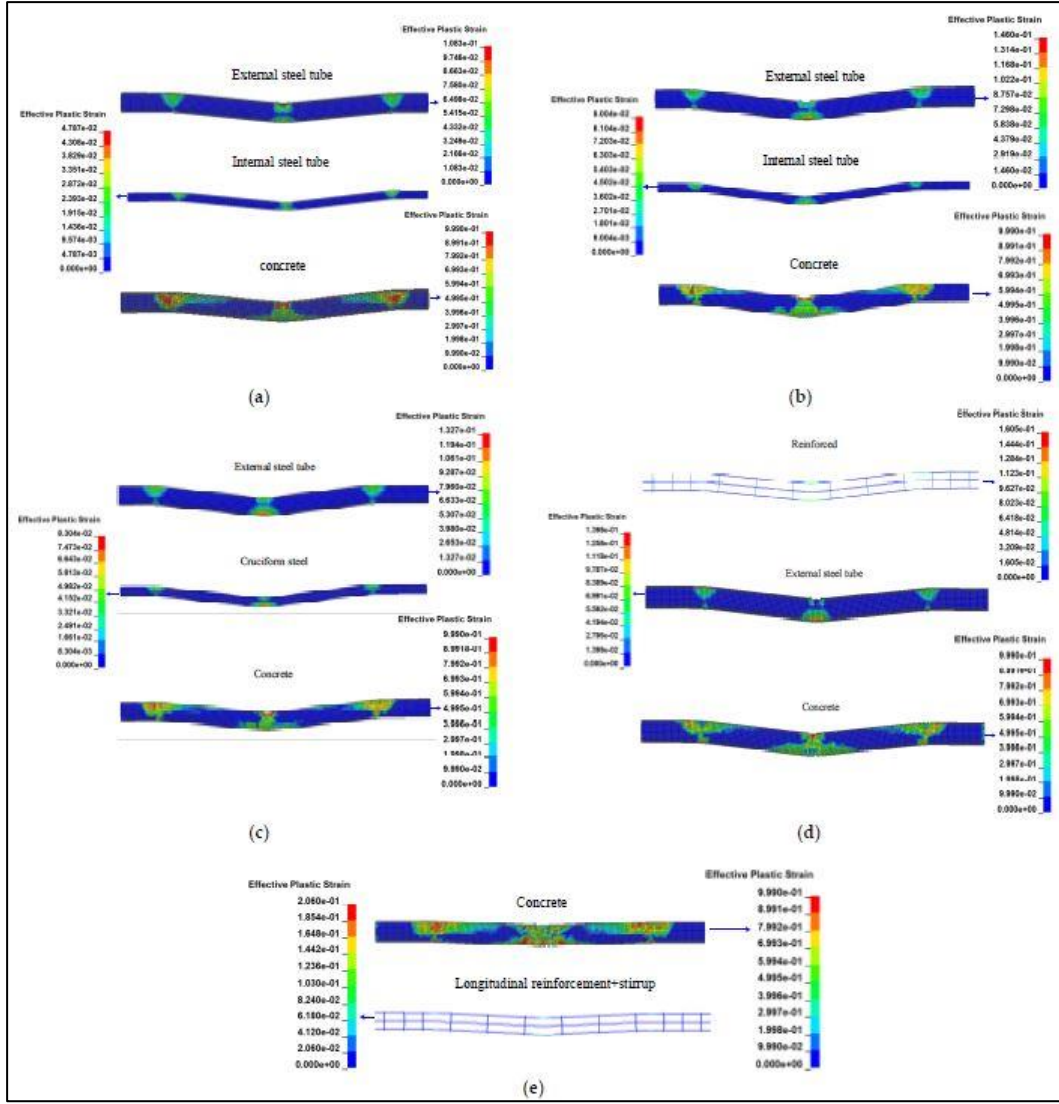
Tantrapongsaton ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada birden fazla darbe etkisine maruz kalmış betonarme kolonlar üzerinde sayısal bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında, numune ortasına serbest düşen kütle simülasyonu ile eşit enerjili çift darbe etkisine maruz kalan özdeş onaltı betonarme kolon numunesi, dört farklı

eksenel yük oranında test edilmiştir. Çalışma sonucunda momentum seviyesinin eşdeğer darbe enerjisine maruz kalan numuneler için belirleyici olduğu saptanmıştır. Yüksek momentumlu darbelerde büyük yerdeğiştirmelerle birlikte global eğilme hasarları görülürken, düşük momentumlu darbelerde küçük yerdeğiştirmelerle birlikte lokal hasarların olduğu görülmüştür. Eksenel yükün darbe direncini artırdığı görülürken, ilk darbeye eğilme hasarı alan numunelerin ikinci darbeye kesme hasarı alabildiği saptanmıştır (Şekil 2.32).



Şekil 2.32 : Kolonlara ait gerilme durumları (Tantrapongsaton ve diğ., 2022).

Li ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada, betonarme ve kompozit kolonların darbe etkisi altındaki davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında tamamı dairesel kesitli olmak üzere, geleneksel betonarme (RC), betonarme dolgulu çelik tüp (R-ST), çelik takviyeli beton dolgulu çelik tüp (S-ST), içi boş beton dolgulu çift çelik tüp (H-DS) ve içi beton dolgulu çift çelik tüp (S-DS) kolonlara farklı eksenel yük ve farklı darbe hızları uygulanmıştır. Çalışma sonucunda kompozit kolonların geleneksel betonarme kolonlara göre darbe davranışının önemli ölçüde iyileştiği, eksenel yük oranı arttıkça darbe direncinin azaldığı saptanmıştır (Şekil 2.33).



Şekil 2.33 : Kolonlara ait gerilme durumları (a) H-DS, (b) S-DS, (c) S-ST, (d) R-ST, (e) RC (Li ve diğ., 2023).

Tez çalışması kapsamında, aksenal yüklü, tam ölçekli betonarme kolonlar, tampon yüksekliği seviyesinden (kolon alt bölgesi) darbe etkisine maruz bırakılacak, deney sonrası artık kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla darbe uygulanan bölgeden statik yüklemeye tabi tutulacaktır.

Yukarıda özeti verilen deneysel çalışmalardan darbe uygulanan bölgesi kolon alt bölgesi olan veya darbe sonrası kalan kapasiteyi belirleme yönelik test yapılan çalışmalar Çizelge 2.1’de sıralanmıştır. Gürbüz ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada darbe uygulanan bölge, aksenal yük durumu ve tam ölçekli olması bakımından tez çalışmasında yapılan deneylerle benzerlik gösterirken, darbe sonrası kapasitelerin belirlenmesine yönelik testler yapılmamıştır. Chen ve diğ. (2023) ise benzer testleri ölçekli numuneler üzerinde gerçekleştirmiş, çalışmasında darbe sonrası

artık kapasitelere yer vermemiştir. Al-Bukhaiti ve diğ. (2022), Demartino ve diğ. (2017), Li ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda ise darbe uygulanan bölge tez çalışmasında yapılan deneylerle benzerlik gösterirken, bu çalışmalarda eksenel yük bulunmadığı gibi darbe sonrası kapasitelerin belirlenmesine yönelik çalışma yapılmamıştır. Fan ve diğ. (2019), Wei ve diğ. (2019) ile Ye ve diğ. (2020, 2022) tarafından yapılan çalışmalar hem darbe uygulanan bölge hem de deney numunelerinin ölçekli olması bakımından tez çalışmasından farklılık göstermektedir.

Çizelge 2.1 : Benzer yayınlara ait temel değişkenler.

Yayın	Ölçek Durumu	Eksenel Yük Durumu	Darbe Uygulanan Kolon Bölgesi	Darbe Sonrası Statik Test
Al-Bukhaiti vd. (2022)	Ölçekli	Yok	Alt bölge	Yok
Chen vd. (2023)	Ölçekli	Var	Alt bölge	Yok
Demartino vd. (2017)	Ölçekli	Yok	Alt bölge	Yok
Fan vd. (2019)	Ölçekli	Var	Orta bölge	Var
Gürbüz vd. (2019)	Tam Ölçekli	Var	Alt bölge	Yok
Li vd. (2020)	Ölçekli	Yok	Alt bölge	Yok
Wei vd. (2019)	Ölçekli	Var	Orta bölge	Var
Ye vd. (2020)	Ölçekli	Var	Üst bölge	Var
Ye vd. (2022)	Ölçekli	Var	Üst bölge	Var
Tez Çalışması	Tam Ölçekli	Var	Alt bölge	Var

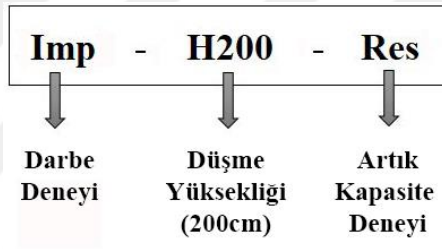
Bu tez çalışması, bilindiği kadarıyla, alt bölgesinden (<1.2 m) darbe etkisine maruz kalan tam ölçekli kolonların darbe sonrası artık kapasitelerinin belirlendiği tam ölçekli ilk çalışmadır.



3. DENEY PROGRAMI

3.1 Giriş

Tez çalışması kapsamında betonarme kolonların darbe yükleri altındaki davranışı ve darbe etkisi sonrasında kolon kapasitesinde meydana gelen değişiklikler deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Darbe deneylerinde oluşması muhtemel veri kayıpları düşünülerek üretilen yedek numuneler de dahil olmak üzere toplamda 17 adet tam ölçekli betonarme kolon numunesi üretilmiştir. Deneyde kullanılan numunelerle ilgili notasyon bilgileri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Numunelerin isimlendirilmesi.

Araştırma kapsamında üretilen deney numunelerinin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bir numune (Sta) statik yükler altında teste tabi tutularak, statik yükleme altındaki davranışı belirlenmiştir. Numunelerden altısına sırasıyla 2.0, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 ve 5.0 metre yüksekliklerinden 585 kg ağırlığındaki cismin serbest düşürülmesiyle darbe kuvveti uygulanmıştır. Böylece farklı enerji seviyesindeki darbe kuvvetinin betonarme kolonlar üzerindeki etkisinin araştırılması planlanmıştır. Darbe hızları ve darbe enerji düzeyleri denklem 3.1 yardımıyla hesaplanmıştır. Denklemde m , darbe ağırlığını, g , yerçekimi ivmesini, h , darbe yüksekliğini ve v , darbe hızını temsil etmektedir. Deneysel çalışmanın son aşamasında ise üç numune üzerinde, darbe etkisi sonrası artık yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla statik yükleme deneyi yapılmıştır.

$$E = m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Çizelge 3.1 : Deney matrisi.

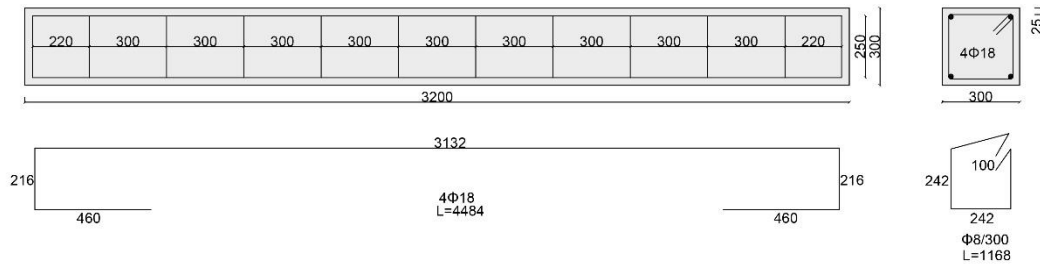
Numune Adı	Darbe Yüksekliği (m)	Darbe Enerjisi (kJ)	Artık Statik Kapasite Testi
Sta	-	-	-
Imp-H200	2.00	11.48	-
Imp-H300	3.00	17.22	Imp-H300-Res
Imp-H350	3.50	20.09	Imp-H350-Res
Imp-H400	4.00	22.96	Imp-H400-Res
Imp-H450	4.50	25.82	-
Imp-H500	5.00	28.69	-

3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Yapılan ön araştırmaya dayanılarak deney numunelerinin boyutları, donatı detayları ve eksenel yük seviyesi az katlı yapılardaki giriş katı kolonlarını temsil edecek şekilde seçilmiştir. Tüm numunelerde eksenel yükün sabit ve denklem 3.2 ile hesaplanan eksenel yük oranının %10 seviyelerinde (yaklaşık 270 kN) olacak şekilde uygulanması planlanmıştır. Denklemde n , eksenel yük oranını, N eksenel yük seviyesini, f_{cm} beton basınç dayanımını, b_x ve b_y ise kolonun kenar ölçülerini göstermektedir.

$$n = \frac{N}{f_{cm} \cdot b_x \cdot b_y} \quad (3.2)$$

Bütün numunelerde kesit boyutları, boyuna donatı oranları ve malzeme özellikleri (betonarme çeliği ve beton mekanik özellikleri) eşdeğerdir. Numune boyutları ve detayları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

**Şekil 3.2 : Kolon boyutları ve donatı detayları.**

Kolonların boyuna donatısı minimum ($4\Phi 18$, $\rho_{min}=0.01$) donatı oranını sağlamakla birlikte (TS 500, 2000); kesme donatısı ($\Phi 8/300$) yönetmeliklerde verilen minimum kesme donatısı şartını sağlamayacak şekilde seçilmiştir. Deney numunelerinin kesme kapasiteleri hesaplanırken, betonarme kesitin kesmede çatlama dayanımı (V_{cr}), mevcut betonun çekme dayanımı (f_{ctm}), kesit ölçüleri (b_w , d , A_c) ve tasarım eksenel yük oranı (N_d) kullanılarak denklem 3.3 ile; kesme donatısı katkısı (V_w), mevcut çeliğin akma dayanımı (f_{yw}), kesme donatısı kesit alanı (A_{sw}), etriye aralığı (s) kullanılarak denklem

3.4 ile hesaplanmıştır. Kesme dayanımı denklem 3.5'te, betonarme kesitin çatlama dayanımı (V_{cr}) ile kesme donatısı katkısının (V_w) toplamı olarak alınmıştır.

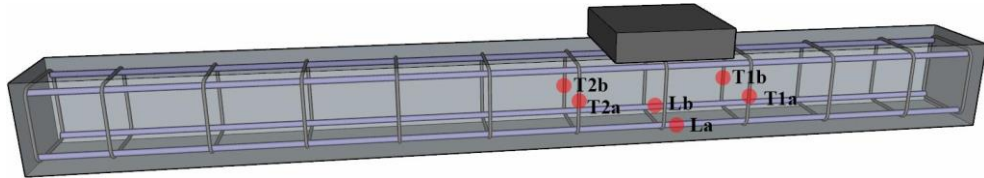
$$V_{cr} = 0.65f_{ctm}b_wd(1 + 0.07\frac{N_d}{A_c}) \quad (3.3)$$

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s}f_{yw}d \quad (3.4)$$

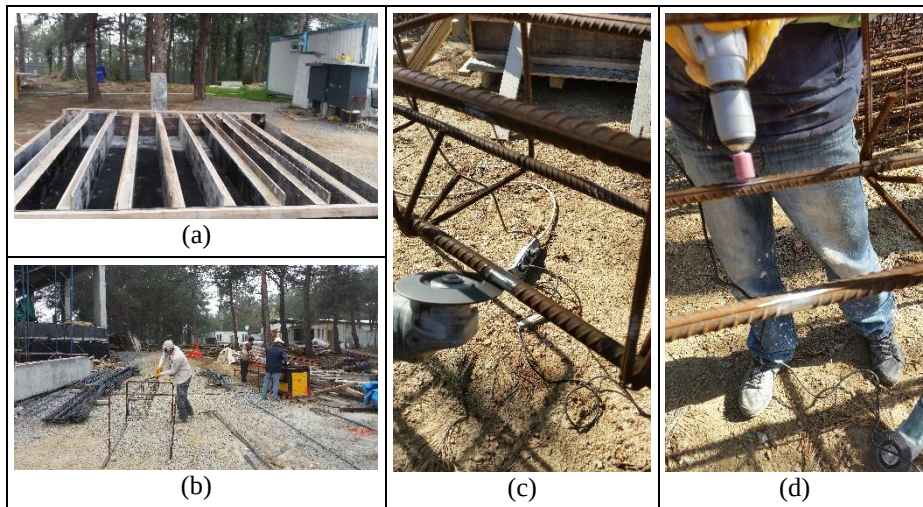
$$V_r = V_{cr} + V_w \quad (3.5)$$

Deney numunelerinin tasarım kesme/eğilme dayanımlarının oranı $\alpha=V_r/V_e=1.10$ olarak hesaplanmıştır. Başka bir ifadeyle, numuneler statik yükleme altında eğilme kritik ($\alpha \geq 1$) olacak şekilde tasarlanmıştır.

Her biri 30x30x320 cm boyutlarında hazırlanan betonarme kolon kalıpları yatay olarak konumlandırılmıştır. Darbe uygulanacak bölgeye en yakın etriyelerden ikisine ikişer adet ve darbe uygulanacak bölgenin karşısındaki kenara yakın iki boyuna donatıya birer adet olmak üzere her kolon numunesine, donatılarda kullanıma uygun tipte, 6 adet FLA-5 tipi birim şekildeğiştirme ölçer (gerinim pulu, strain gauge) yerleştirilmesi planlanmıştır (Şekil 3.3). Kolon donatıları Şekil 3.2'de verilen detaylara göre hazırlandıktan sonra birim şekildeğiştirme ölçerlerin yerleştirileceği bölgelerin nervürleri silinip zımparalanarak pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. (Şekil 3.4).



Şekil 3.3 : Gerinim ölçerlerin (gerinim pulu, strain gauge) yerleştirildiği bölgeler.



Şekil 3.4 : (a) Kalıp imalatları, (b) kolon donatı imalatları, (c)-(d) donatı silimi.

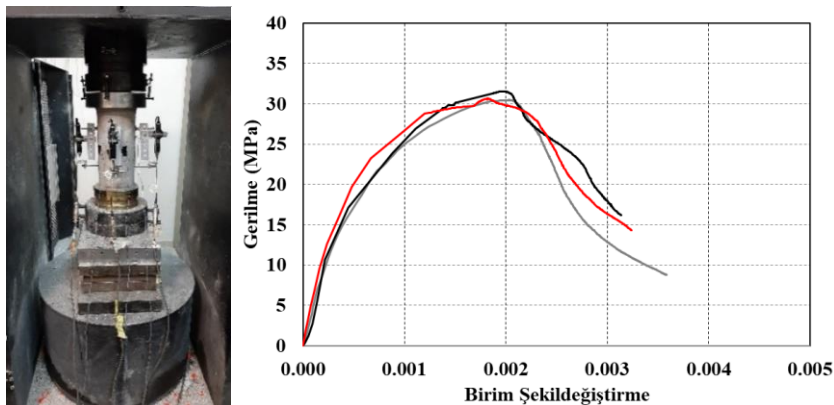
Daha sonra bu kısımlar temizlenerek, hızlı yapıştırıcı yardımıyla birim şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Şekil değiştirme ölçerlerde agrega ve sudan dolayı oluşması muhtemel hasarları önlemek amacıyla, üç kat su yalıtım yapılmıştır (Şekil 3.5b,c). Sayılan işlemlerin ardından donatılar kalıplara yerleştirilerek betonlanmıştır (Şekil 3.5d).



Şekil 3.5 : (a) Gerinim ölçerin yerleştirilmesi, (b) ilk kat yalıtımın yapılması, (c) ikinci ve üçüncü kat yalıtımın yapılması, (d) beton dökümü.

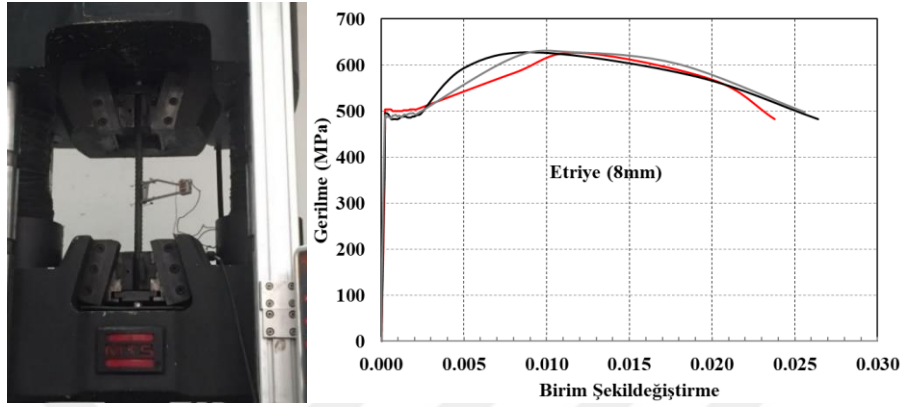
3.3 Numunelerin Malzeme Özellikleri

Betonarme kolon numunelerinin üretiminde C25/30 sınıfı beton kullanılmıştır. Beton dökümü esnasında alınan üç farklı standart silindir (150x300 mm) numunenin deney günü (704, 712, 730. gün) basınç testi yapılmış (TS EN 12390-3, 2019) ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi çıkarılmıştır. Üç numuneye ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 3.6’da verilmiştir.

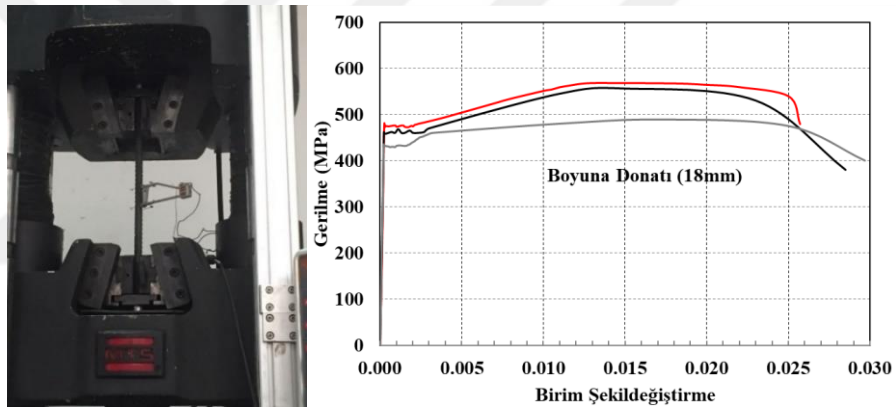


Şekil 3.6 : Beton basınç deneyi ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.

Kolon boyuna donatılarından alınan (18 mm) numuneler ile etriyelerden alınan (8 mm) üçer numune üzerinde TS 708 (2016)'ya uygun olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Deney sonucu numunelere ait ortalama gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri çıkarılmıştır (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8).



Şekil 3.7 : Enine donatı çekme deneyi ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.



Şekil 3.8 : Boyuna donatı çekme deneyi ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Betonarme kolon numunelerine ait beton karışım oranı ve basınç dayanımı ile donatı çeliğine ait mekanik özellikler Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 : Beton ve donatılara ait mekanik özellikler.

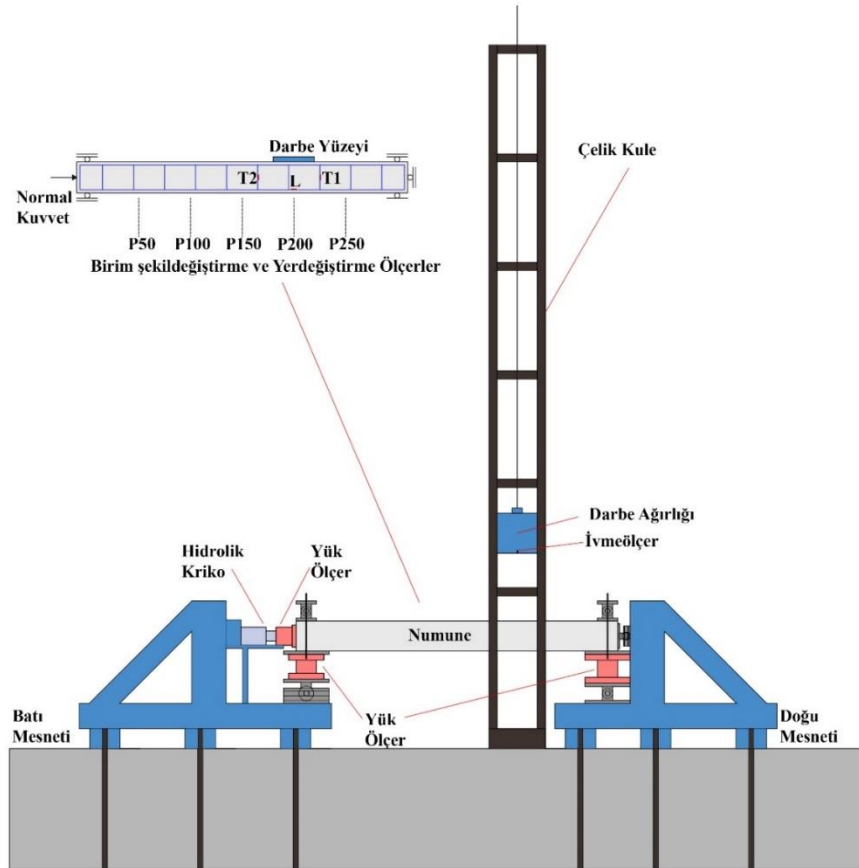
Beton Karışım Oranı ve Basınç Dayanımı					
Çimento	Su	İnce	İri	En Büyük	Basınç
(kg/m ³)	(kg/m ³)	Agrega/Kum	Agrega	Dane Boyutu	Dayanımı f _c '
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(mm)	(MPa)
245	162	384	1573	22	30.9

Donatı Çeliği Mekanik Özellikleri				
Donatı Türü	Çap	Akma	Kopma	Elastisite Modülü
	(mm)	Dayanımı	Dayanımı	
	(mm)	(MPa)	(MPa)	(GPa)
Boyuna Donatı	18	459	538	200.5
Etriye	8	501	630	202.9

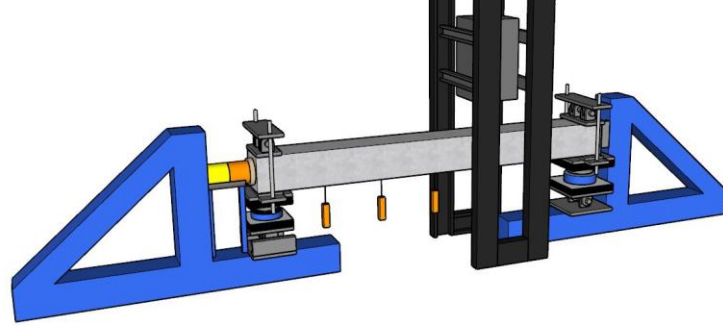
3.4 Deney Düzenekleri ve Ölçüm Cihazları

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen statik yükleme deneyleri ve darbe deneyleri, İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan yükleme çerçeveleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Darbe çerçeve sistemi, maksimum 7.0 m yükseklikten darbe uygulamaya imkan verecek çelik kule ve üzerinde mesnetlerin bulunduğu iki adet rijit çelik reaksiyon duvarından oluşur. Yatay olarak konumlandırılan betonarme kolon numunesine, batı reaksiyon duvarına yerleştirilen elektrikli kriko yardımıyla eksenel yük uygulanarak bu yükteki değişim hidrolik kriko ile numune arasına yerleştirilen 1000 kN kapasiteli yük ölçer yardımıyla ölçülmüştür. U profillerden oluşan kılavuz çerçeve içinde hareket eden dikdörtgenler prizması geometrisine sahip darbe ağırlığı, 1000 kN kaldırma kapasiteli magnet yardımıyla hareketli kren kancasına bağlanarak istenilen darbe yüksekliği elde edilmiştir. Magnet kolu halat yardımıyla çekilerek krenle arasındaki bağlantı kesilerek istenilen yükseklikten darbe ağırlığının serbest düşmesiyle numune üzerinde darbe etkisi oluşturulmuştur (Şekil 3.9, 3.10).

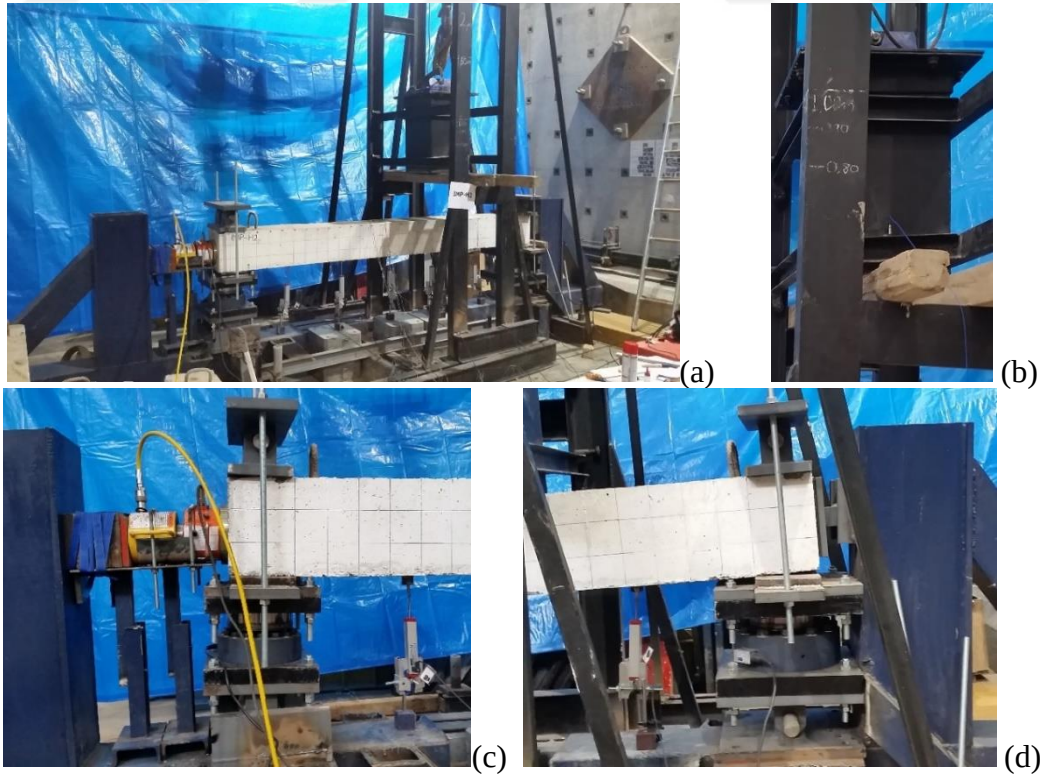


Şekil 3.9 : Darbe yükleme sisteminin şematik gösterimi.



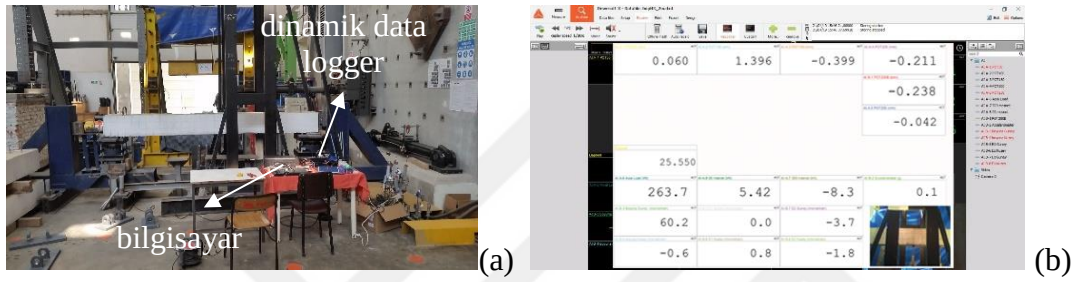
Şekil 3.10 : Darbe yükleme sisteminin üç boyutlu gösterimi.

Betonarme numunenin batı mesneti kayıcı, doğu mesneti ise sabit mesnet olarak tasarlanmıştır. Yine doğu reaksiyon duvarı ile numune arasında numunenin dönmesine imkan verecek kayıcı mesnet yerleştirilmiştir (Şekil 3.11). Numune ile mesnetlerin darbe anında farklı hareketini engellemek ve mesnetlerde oluşacak çekme kuvvetlerini ölçmek amacıyla kayıcı ve basit mesnetler numune üzerinden sabitlenmiştir (Şekil 3.11c,d). Numune ile mesnetler arasına batı mesnetinde 1000 kN, doğu mesnetinde ise 2000 kN kapasiteli yük ölçerler yerleştirilmiştir. Darbe anı ve sonrasındaki ivme değişimini ölçmek amacıyla serbest düşen darbe ağırlığı üzerine 5000 g kapasiteli ivme ölçer yerleştirilmiştir. Darbe anında numune üzerindeki yerdeğiştirmeleri ölçmek amacıyla numune altına 500 mm aralıklarla yerdeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir.



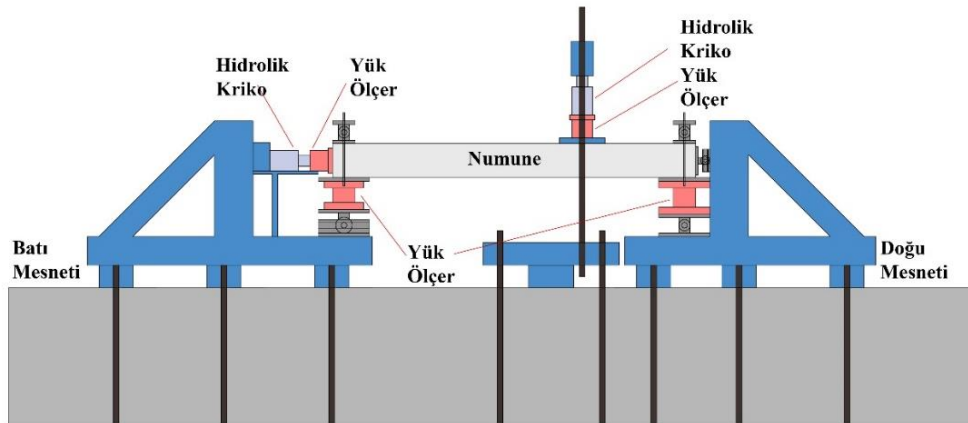
Şekil 3.11 : Yükleme sisteminin (a) genel görünümü, (b) darbe ağırlığı, (c) batı mesneti, (d) doğu mesneti.

Deney düzeneğine yerleştirilen ölçüm aletleri ve numune üretimi esnasında donatılara yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerler dinamik veri toplama sistemine (DEWE-43A, 2023) bağlanmış ve bilgisayar yardımıyla deney esnasındaki değişimler izlenerek kaydedilmiştir. Dinamik data ölçümleri 10 kHz frekansla alınmış, veri analizi ise yine aynı veri toplama sistemine ait yazılım yardımıyla (Dewesoft X3, 2023) yapılmıştır (Şekil 3.12). Deney süreci yüksek çözünürlüklü kamera yardımıyla kaydedilerek hasar oluşumunun aşamalarının incelenmesi ve olası yerdeğiştirme veri kayıplarının önüne geçilmesi sağlanmıştır. Deney sonucunda numunede oluşan çatlakların konumu, genişliği belirlenerek çizimi yapılmıştır.



Şekil 3.12 : Dinamik data toplama sistemi (a) genel görünüm, (b) data analizi.

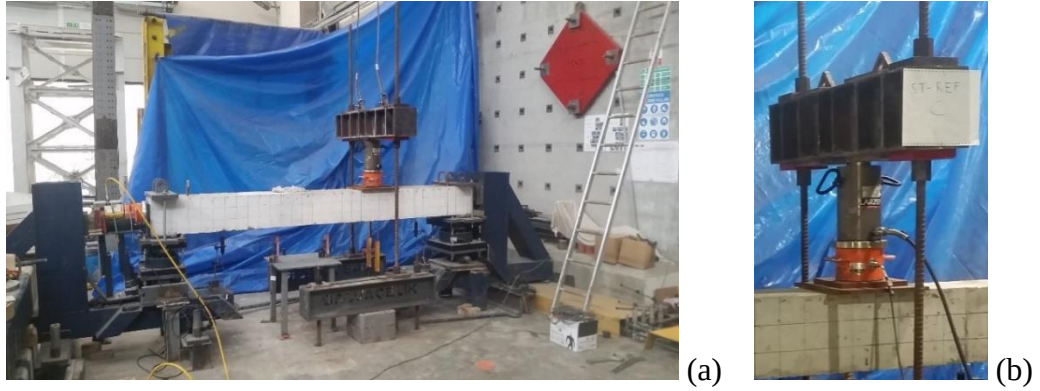
Statik yükleme sistemi darbe yükleme sisteminin yeniden düzenlemesiyle oluşturulmuştur. Doğu ve batı reaksiyon duvarları, eksenel yük sistemi, mesnet koşulları darbe yükleme sistemiyle aynı özelliklere sahiptir. Darbe yükleme sisteminde bulunan çelik kulenin kaldırılması sonrası sisteme eklenen çelik kirişler ve çekme çubukları yardımıyla oluşturulan kapalı yükleme sistemiyle, statik yükleme sistemi oluşturulmuştur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 : Statik yükleme sisteminin şematik gösterimi.

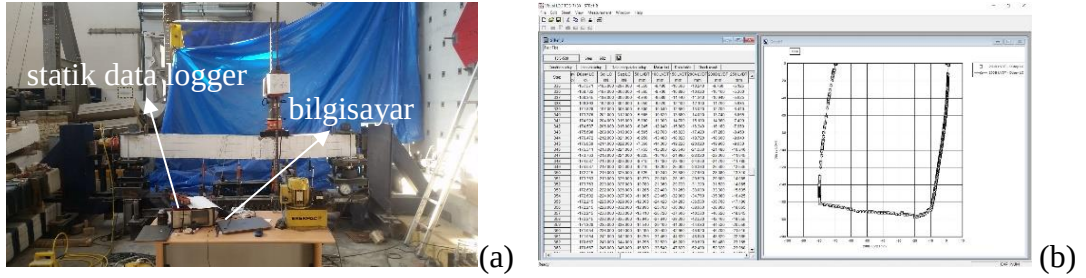
Yüksek dayanımlı çekme çubukları ile numune üzerine yerleştirilen rijit kiriş ile betonarme kolon numunesi arasına 1000 kN kapasiteli hidrolik krikolar yerleştirilmiş ve

statik yükleme bu krika yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Hidrolik krika ile betonarme kolon numunesi arasına yerleştirilen 1000 kN kapasiteli yük ölçer yardımıyla yük kontrolü sağlanmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 : Yükleme sisteminin (a) genel görünümü, (b) yükleme şekli.

Deney düzeneğine bulunan yük ölçerler, yerdeğiştirme ölçümü yapan potansiyometreler ve numune üretimi esnasında donatılara yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerler statik veri toplama sistemine (TDS-540, 2023) bağlanmış ve bilgisayar yardımıyla deney esnasındaki değişimler izlenerek kaydedilmiştir. Veri analizi ise yine aynı veri toplama sistemine ait yazılım yardımıyla (TDS-7130, 2023) yapılmıştır (Şekil 3.15). Deney sonucunda numunede oluşan çatlaklar belirlenerek çizimi yapılmıştır.



Şekil 3.15 : Statik data toplama sistemi (a) genel görünüm, (b) data analizi.

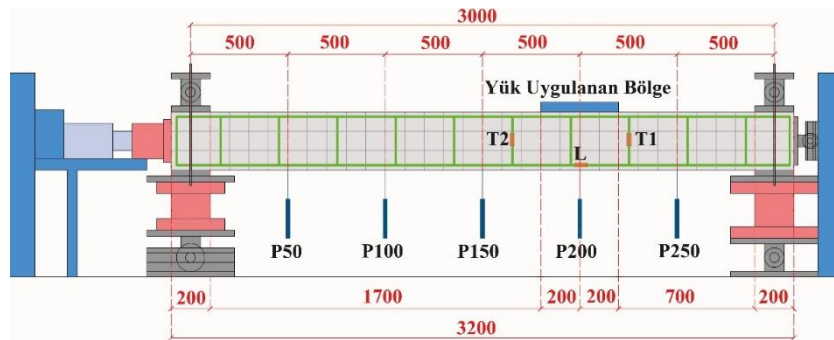


4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Giriş

Tez çalışması kapsamında betonarme kolonların darbe etkisi altındaki davranışı deneysel olarak incelenecek, statik yükleme altındaki davranışıyla kıyaslanacak ve darbe etkisine maruz kalan numunelerin artık yük taşıma kapasiteleri belirlenecektir. Bu amaçla, üretilen eşdeğer betonarme kolonlardan bir tanesi statik yüklemeye tabi tutulacaktır. Farklı darbe enerjileri altındaki davranışın belirlenmesi amacıyla, deney düzeneğine yatay olarak konumlandırılan betonarme kolonlar üzerine darbe ağırlığının 2.0, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 metre yükseklikten serbest düşürülmesiyle darbe etkisi oluşturulacaktır. Darbe etkisine maruz kalan bu kolonlardan üç tanesine (3.0, 3.5, 4.0 metre yükseklikten darbe etkisine maruz kalan numuneler), artık yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla tekrar statik yükleme yapılacaktır. Yapılan tüm bu deneyler esnasında ve sonrasında betonarme kolonun davranışını tespit etmek amacıyla, eksenel yük ölçümleri, mesnet reaksiyonu ölçümleri, yerdeğiştirme ölçümleri, donatılarda oluşan birim şekildeğiştirme ölçümleri, çatlak şekilleri ve genişlikleri gibi bir dizi ölçüm gerçekleştirilecektir.

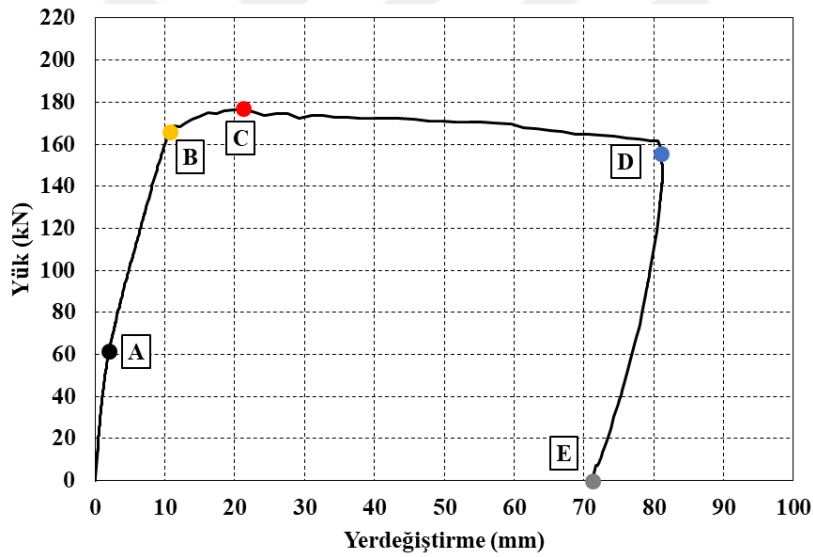
Mesnetlerin, yük uygulanan bölgenin ve ölçüm aletlerinin konumu Şekil 4.1’de verilmiştir. Toplam uzunluğu 320 cm olan kolon, mesnetler üzerine yerleştirilen 20 cm genişliğindeki çelik plaka üzerine oturmaktadır. Böylece kolon net ölçüsü 300 cm olacak şekilde deney uygulanmıştır. Kolon alt bölgesinden 50 cm ara ile yerdeğiştirme ölçümleri yapılmıştır.



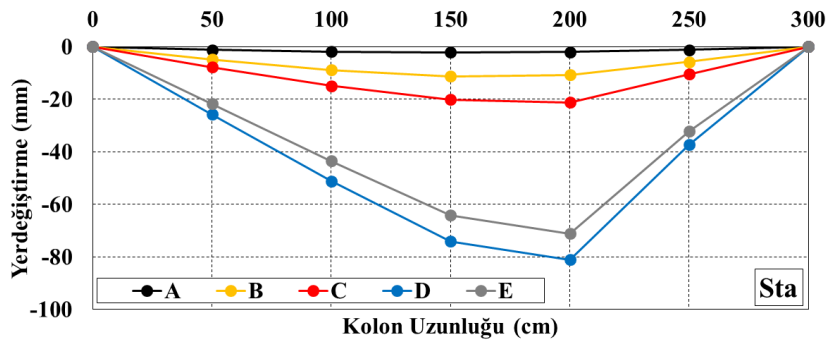
Şekil 4.1 : Ölçüm cihazlarının yerleşimi (ölçüler mm cinsinden).

4.2 Statik Deney Sonuçları

Statik deneyler darbe uygulanan bölgeye (doğu mesnetinden 1.0 m mesafede) yük uygulanmasıyla yapılmıştır. 270 kN sabit eksenel yük altındaki betonarme kolona hidrolik kriko yardımıyla yük uygulanarak üzerindeki yerdeğiştirmeler ve donatılardaki birim şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Yük değerleri ile numune altından ölçülen yerdeğiştirmelerin birleştirilmesiyle oluşturulan yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.2’de verilmiştir. Artan yükler altında ilk eğilme çatlakları 61 kN’de oluşmaya başlamıştır (A noktası). Yük 166 kN’ye ulaştığında donatılar akmaya başlamış, bu noktadan sonra çatlak genişlikleri ve yerdeğiştirmeler hızla artmıştır (B noktası). Numune 176 kN’de yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır (C noktası). Yerdeğiştirmeler 81 mm’ye ulaştığında en üst lifte betonda ezilmeler başlamıştır (D noktası). Bu noktadan sonra dayanım hızla azalarak taşıma gücüne ulaşılmıştır. Yük tamamen kaldırıldığında kalıcı yerdeğiştirme 71 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.3).

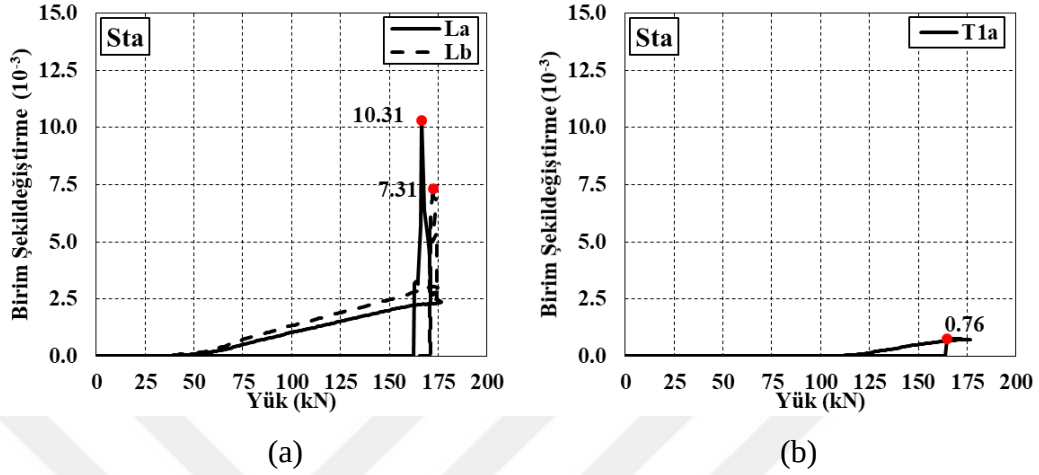


Şekil 4.2 : Yük-yerdeğiştirme ilişkisi.



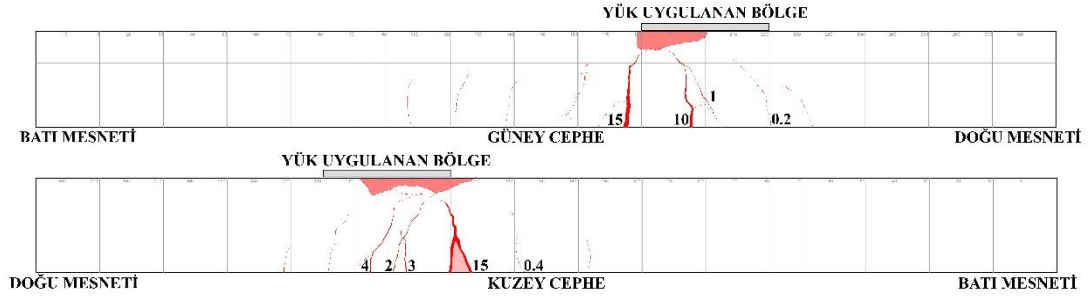
Şekil 4.3 : Yerdeğiştirmelerin hasarla değişimi.

Boyuna donatılarda ve etriyelerde ölçülen birim şekildeğişimlerin yükle değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Boyuna donatılarda akma meydana gelirken ($>2.10^{-3}$), etriyelerde akma görülmemiştir. Tasarlanan numunelerin eğilme baskın davranış gösterdiği deneysel olarak da doğrulanmıştır.

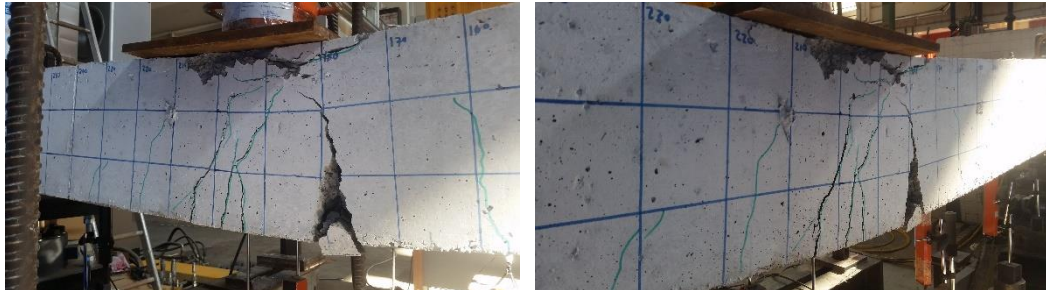


Şekil 4.4 : Statik yüklemeye ait birim şekildeğişimlerin yüklemeye değişimi (a) boyuna donatılar, (b) etriyeler.

İlk eğilme çatlağının 61 kN yük seviyesinde meydana gelmesiyle birlikte çatlak genişlikleri ve sayısı yük artışıyla birlikte artmıştır. Deney sonunda en büyük çatlak ağzı genişliği 15 mm olarak ölçülmüştür. Çatlak haritası Şekil 4.5'te ve deney sonrası numune fotoğrafları Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5 : Statik yüklemeye ait çatlak haritası.



Şekil 4.6 : Deney sonrası numunenin hasar durumu.

4.3 Darbe Deneyi Sonuçları

Kolon üzerinde darbe etkisi, darbe ağırlığının (585 kg) doğu mesnetinden 1.0 m mesafeye serbest düşürülmesi yoluyla tatbik edilmiştir. 270 kN sabit eksenel yük uygulandıktan sonra darbe ağırlığı çeşitli yüksekliklerden düşürülerek farklı enerji seviyelerinde darbe etkisi oluşturulmuştur. Darbe uygulanan betonarme kolon üzerindeki yerdeğiştirmeler, mesnet tepkileri ve donatılardaki birim şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Deney esnasında ölçüm aletlerinde oluşan hasarlar nedeniyle bazı veriler yüksek çözünürlüklü kamera yardımıyla elde edilmiştir. Ölçüm alınan noktalara ait veriler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

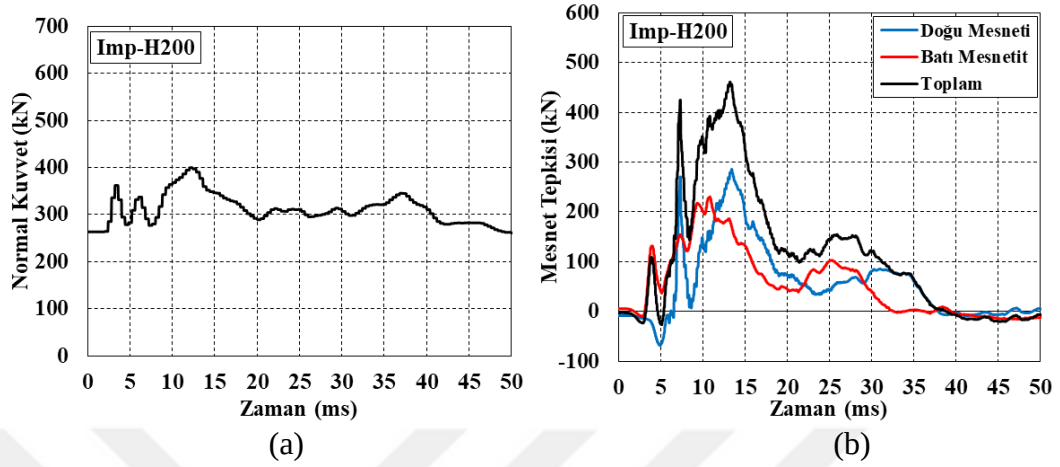
Çizelge 4.1 : Deney veri tablosu.

Numune Adı	Darbe Yüksekliği (m)	Potansiyometreler					Yükölçerler		Gerinim Ölçerler	
		P50	P100	P150	P200	P250	Batı	Doğu	Boyuna Donatı	Enine Donatı
Sta	Statik Yükleme	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Imp-H200	2.00	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Imp-H300	3.00	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Imp-H350	3.50	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Imp-H400	4.00	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Imp-H450	4.50	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Imp-H500	5.00	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Imp-H300-Res	Statik Yükleme	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Imp-H350-Res	Statik Yükleme	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Imp-H400-Res	Statik Yükleme	+	+	+	+	+	+	+	+	+

4.3.1 Imp-H200 numunesi

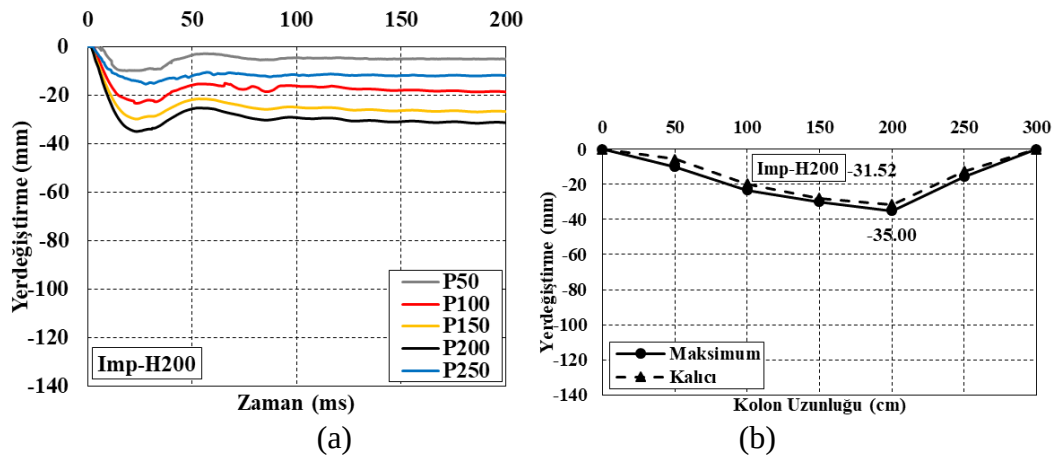
Betonarme kolon üzerinde darbe etkisi 585 kg ağırlıklı cismin numune üzerine 200 cm yükseklikten serbest düşürülmesiyle oluşturulmuştur. İlk darbe anından cismin numune üzerinden sekerek yeniden çarpması anına kadar geçen süre yaklaşık 200 ms olarak ölçülmüştür. Darbeden önce numune üzerine uygulanan sabit eksenel 270 kN yükün darbe etkisi ile birlikte yaklaşık 400 kN değerine kadar ulaştığı, yaklaşık 40 ms sonra ise tekrar 270 kN seviyesine gerilediği görülmüştür (Şekil 4.7a). Darbe etkisi ile birlikte yaklaşık 5 ms anında batı mesnetinde 130 kN basınç, doğu mesnetinde ise 70

kN çekme kuvveti ölçülmüştür. Toplam maksimum mesnet reaksiyonu yaklaşık 14 ms anında 456 kN olarak ölçülmüş, darbeden yaklaşık 40 ms sonra mesnet tepkileri darbeden önceki seviyeye gerilemiştir (Şekil 4.7b).



Şekil 4.7 : Imp-H200 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri.

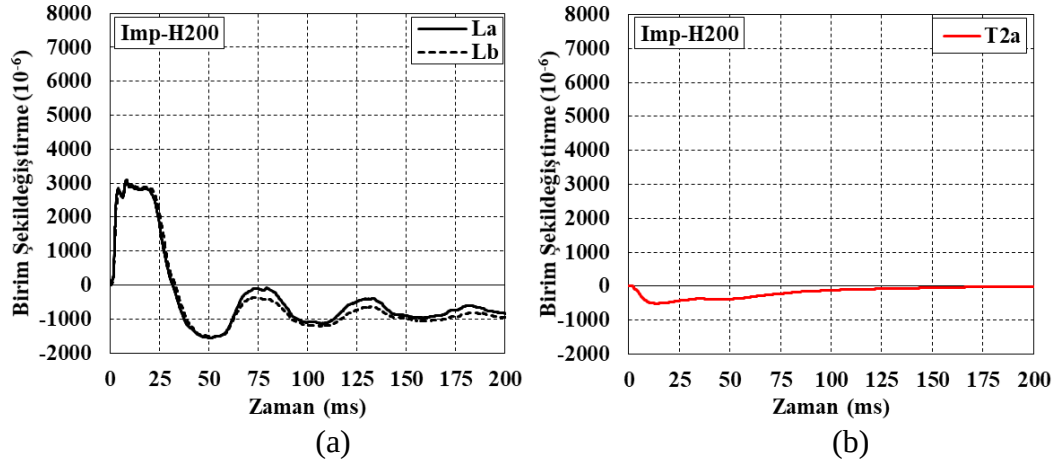
Kolon altına yerleştirilen potansiyometrelerden darbe esnasında alınan ölçümlerde darbe uygulanan bölgede (P200) yaklaşık 35 mm maksimum yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu değerdeki dalgalanma yaklaşık 200 ms sonra kalıcı yerdeğiştirme değerine ulaşmış ve 31.5 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.8a). Kolon boyunca potansiyometrelerden alınan ölçümlere ait maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler Şekil 4.8b’de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Imp-H200 kolon numunesine ait (a) yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler.

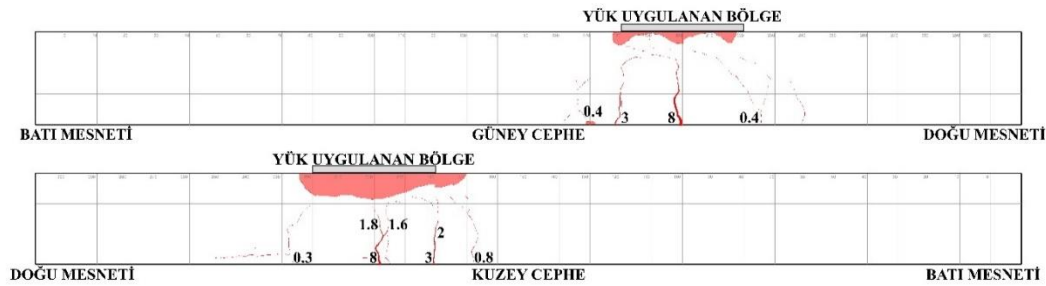
Kolon boyuna donatısı ve etriyelere yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerlerden darbe anında alınan değerlere göre, boyuna donatıların darbe anında maksimum % 0.3

uzama ile akmaya eriştiği, enine donatıların ise maksimum % 0.05 kısalma ile lineer şekildeğiştirme bölgesinde kaldığı görülmüştür (Şekil 4.9).



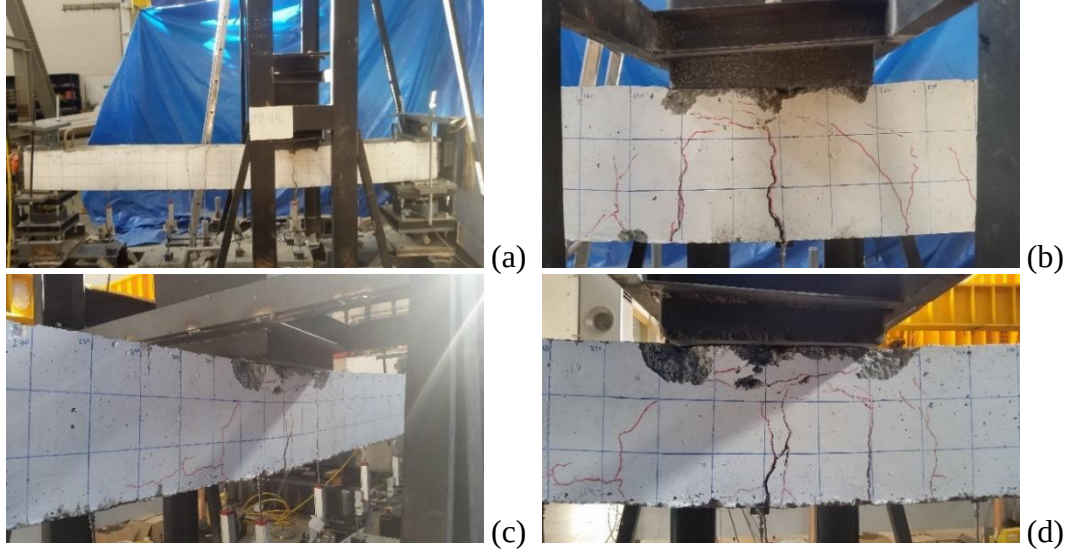
Şekil 4.9 : Imp-H200 kolon numunesine ait birim şekildeğiştirmeler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.

Darbe uygulanan kenarın karşısında bulunan kenarda, yaklaşık 80 cm genişlik boyunca en büyüğü 8 mm çatlak ağzı genişliğine sahip eğilme çatlakları oluşmuştur. Darbe uygulanan kenarda ise betonda ezilme başlangıcı görülmüş, betonda donatı seviyesine ulaşmayan dökülmeler görülmüştür. Numunenin güney ve kuzey cephelerinden yapılan çatlak çizimleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : Imp-H200 kolon numunesine ait çatlak çizimleri.

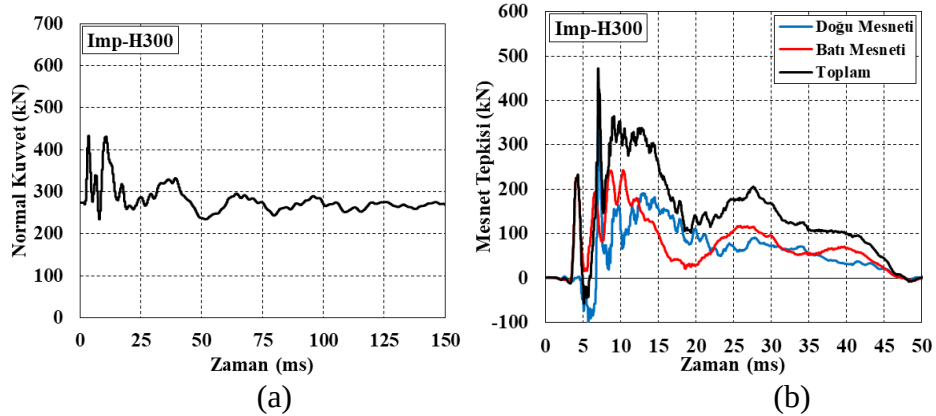
Imp-H200 numunesinde, 200 cm yükseklikten 585 kg ağırlıklı cismin serbest düşmesiyle darbe etkisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda, toplam maksimum 456 kN mesnet tepkisi ölçülmüş, darbe uygulanan noktanın karşısında 35 mm maksimum ve 31.5 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Boyuna donatılarda akma meydana gelirken etriyeler lineer elastik şekil değiştirmiştir. Numunede eğilme hasarı görülürken maksimum çatlak ağzı genişliği 8 mm olarak ölçülmüştür. Numuneye ait hasar fotoğrafları Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Imp-H200 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe genel görünümü, (d) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi.

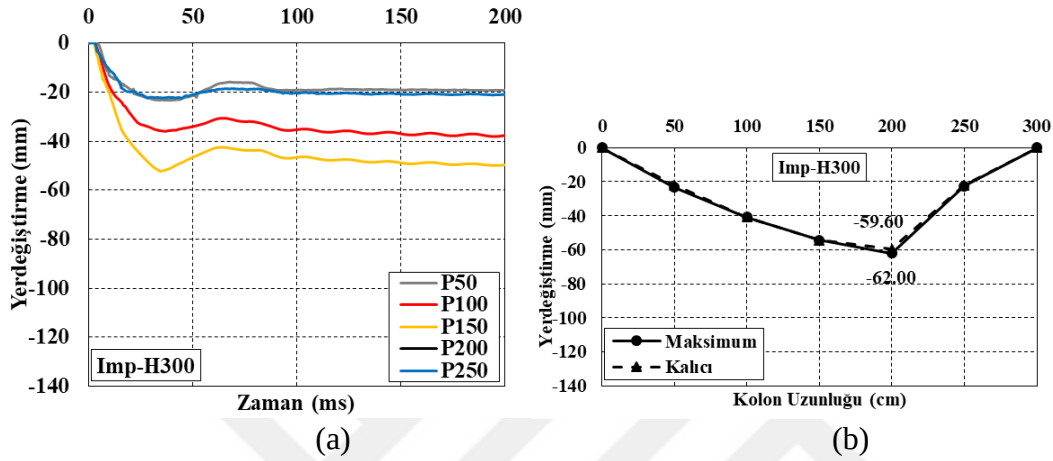
4.3.2 Imp-H300 numunesi

Betonarme kolon üzerinde darbe etkisi 585 kg ağırlıklı cismin numune üzerine 300 cm yükseklikten serbest düşürülmesiyle oluşturulmuştur. İlk darbe anından cismin numune üzerinden sekerek yeniden çarpması anına kadar geçen süre yaklaşık 240 ms olarak ölçülmüştür. Darbeden önce numune üzerine uygulanan sabit eksenel 270 kN yükün darbe etkisi ile birlikte yaklaşık 430 kN değerine kadar ulaştığı, yaklaşık 100 ms sonra ise tekrar 270 kN seviyesine gerilediği görülmüştür (Şekil 4.12a). Darbe etkisi ile birlikte yaklaşık 4 ms anında batı mesnetinde 230 kN basınç, 6 ms anında ise doğu mesnetinde ise 100 kN çekme kuvveti ölçülmüştür. Toplam maksimum mesnet reaksiyonu yaklaşık 7 ms anında 470 kN olarak ölçülmüş, darbeden yaklaşık 45 ms sonra mesnet tepkileri darbeden önceki seviyeye gerilemiştir (Şekil 4.12b).



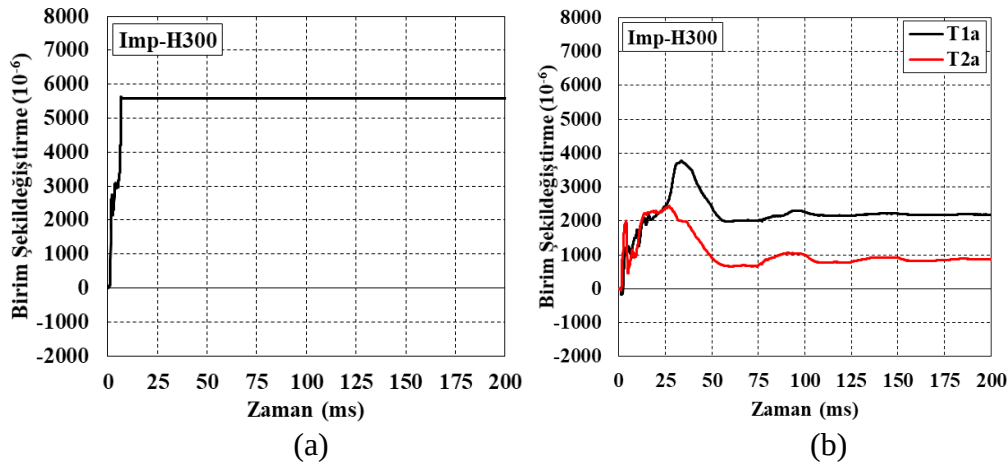
Şekil 4.12 : Imp-H300 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri.

Kolon ortasında (P150) yaklaşık 52 mm maksimum yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu değerdeki dalgalanma yaklaşık 200 ms sonra kalıcı yerdeğiştirme değerine ulaşmış ve 50 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.13a). Deney esnasında darbe uygulanan kesitten (P200) yerdeğiştirme ölçümü alınamamış, deney görsel kayıtları üzerinde yapılan çalışmalarda bu bölgedeki maksimum yerdeğiştirme 62 mm ve kalıcı yerdeğiştirme 59.6 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.13b).



Şekil 4.13 : Imp-H300 kolon numunesine ait (a) yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler.

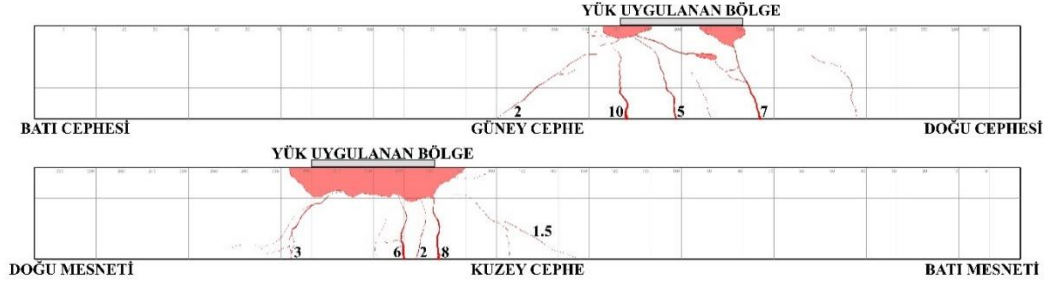
Boyuna donatıların darbe anında maksimum % 0.56 uzama ile akmaya eriştiği, enine donatıların ise maksimum % 0.37 uzama ile akmaya eriştiği görülmüştür (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 : Imp-H300 kolon numunesine ait birim şekildeğiştirmeler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.

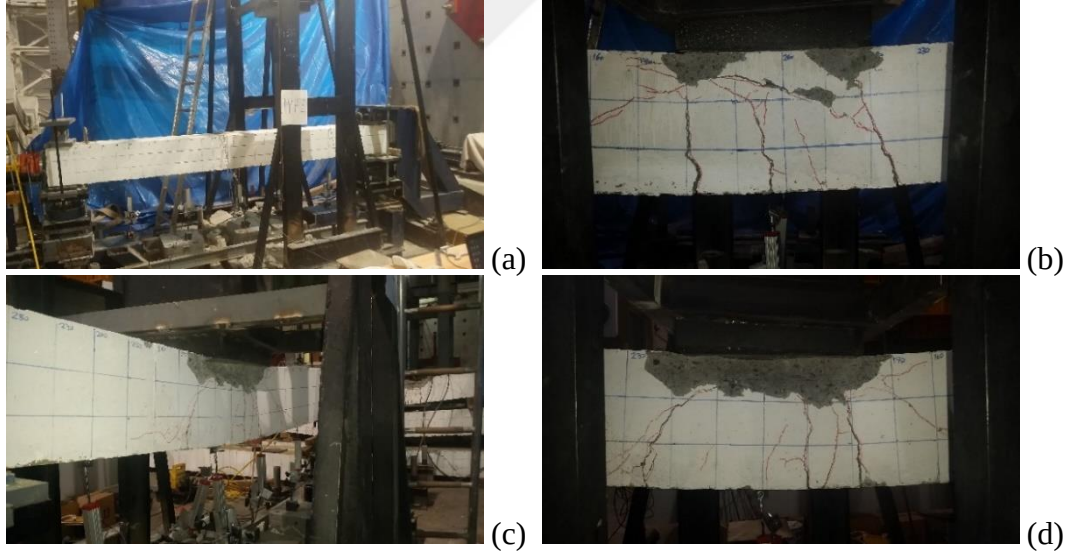
Darbe uygulanan kenarın karşısında bulunan kenarda, yaklaşık 100 cm genişlik boyunca en büyüğü 10 mm çatlak ağzı genişliğine sahip eğilme çatlakları oluşmuştur. Darbe uygulanan kenardan başlayıp karşı kenara diyagonal olarak uzanan 2 mm genişlikli kesme çatlağı olduğu görülmüştür. Darbe bölgesinde beton ezilmeye

başlamış ve kabuk betonda donatı seviyesine kadar dökülmeler görülmüştür (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Imp-H300 kolon numunesine ait çatlak çizimleri.

Imp-H300 numunesinde, 300 cm yükseklikten 585 kg ağırlıklı cismin serbest düşmesiyle darbe etkisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda, toplam maksimum 470 kN mesnet tepkisi ölçülmüş, darbe uygulanan noktanın karşısında 62 mm maksimum ve 59.6 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Boyuna ve enine donatılarda akma meydana gelmiştir. Numunede eğilme hasarı görülürken, kesme çatlaklarının da oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Eğilmede maksimum çatlak ağzı genişliği 8 mm, maksimum kesme çatlağı genişliği ise 2 mm olarak ölçülmüştür. Numuneye ait hasar fotoğrafları Şekil 4.16’da verilmiştir.

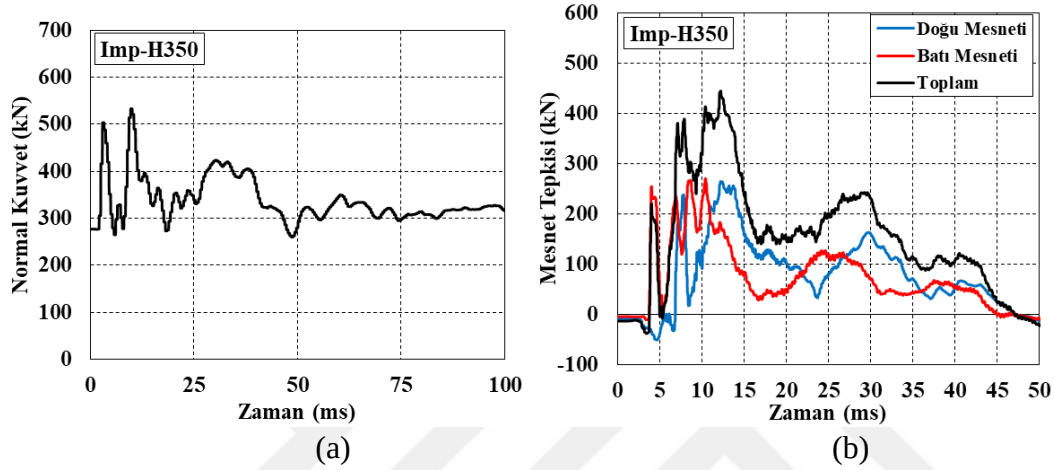


Şekil 4.16 : Imp-H300 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe genel görünümü, (d) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi.

4.3.3 Imp-H350 numunesi

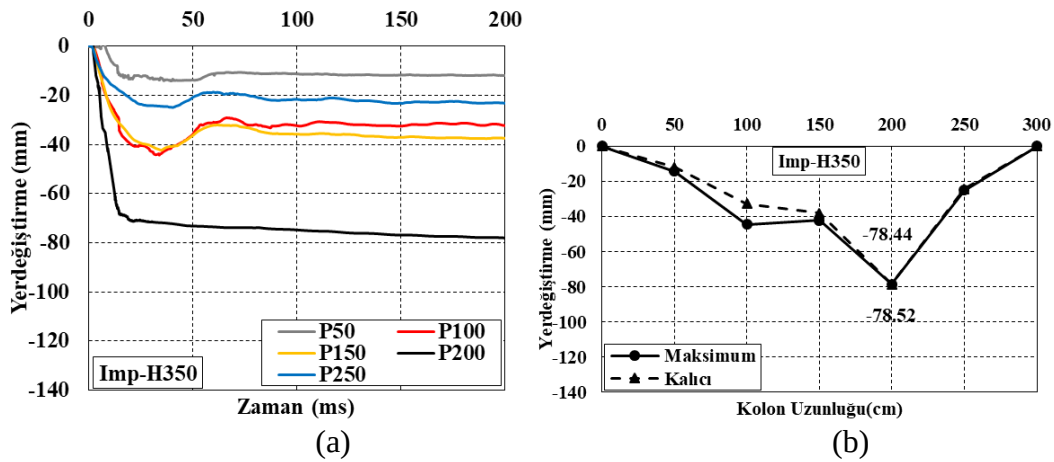
Betonarme kolon üzerinde darbe etkisi 585 kg ağırlıklı cismin numune üzerine 350 cm yükseklikten serbest düşürülmesiyle oluşturulmuştur. İlk darbe anından cismin numune üzerinden sekerek yeniden çarpması anına kadar geçen süre 270 ms olarak

ölçülmüştür. Darbeden önce numune üzerine uygulanan sabit eksenel 270 kN yükün darbe etkisi ile birlikte yaklaşık 520 kN değerine kadar ulaştığı, yaklaşık 75 ms sonra ise 300 kN seviyesine gerilediği görülmüştür (Şekil 4.17a). Darbe etkisi ile birlikte yaklaşık 4 ms anında batı mesnetinde 250 kN basınç, doğu mesnetinde ise 50 kN çekme kuvveti ölçülmüştür. Toplam maksimum mesnet reaksiyonu yaklaşık 12 ms anında 440 kN olarak ölçülmüş, darbeden yaklaşık 50 ms sonra mesnet tepkileri darbeden önceki seviyeye gerilemiştir (Şekil 4.17b).



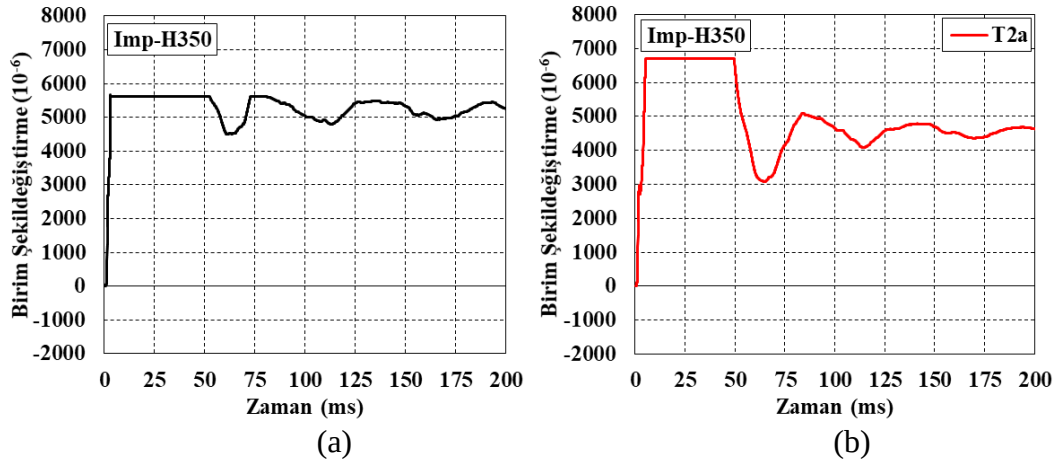
Şekil 4.17 : Imp-H350 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri.

Kolon ortasında (P150) yaklaşık 42 mm maksimum yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu değerdeki dalgalanma yaklaşık 100 ms sonra kalıcı yerdeğiştirme değerine ulaşmış ve 38 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.18a). Darbe uygulanan kesitten (P200) darbe anında yaklaşık 70 mm olarak ölçülen yerdeğiştirme 200 ms sonunda 78 mm değerine ulaşmıştır. Darbe anındaki maksimum yerdeğiştirmeler ile deney sonundaki kalıcı yerdeğiştirmeler Şekil 4.18b’de verilmiştir.



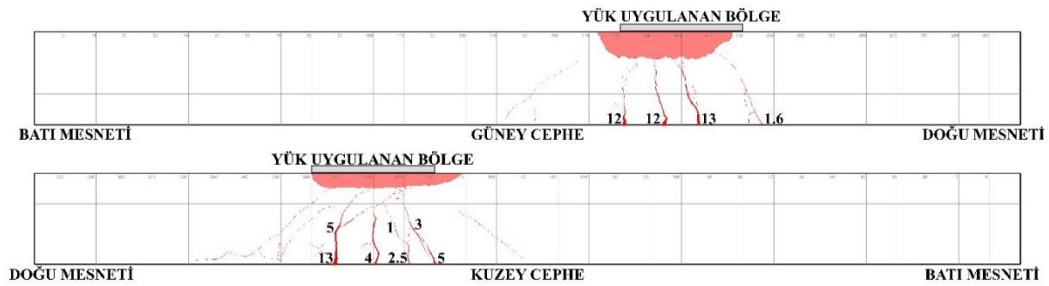
Şekil 4.18 : Imp-H350 kolon numunesine ait (a) yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler.

Boyuna donatıların darbe anında maksimum % 0.56 uzama ile akmaya eriştiği, enine donatıların ise maksimum % 0.67 uzama ile akmaya eriştiği görülmüştür (Şekil 4.19).



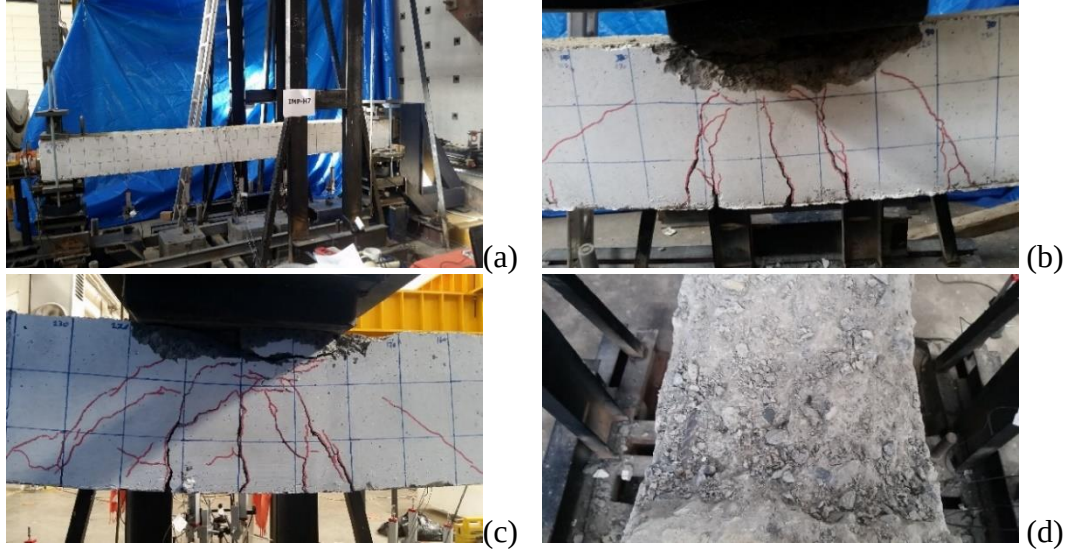
Şekil 4.19 : Imp-H350 kolon numunesine ait birim şekildeğiştirmeler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.

Darbe uygulanan kenarın karşısında bulunan kenarda, yaklaşık 100 cm genişlik boyunca en büyüğü 13 mm çatlak ağzı genişliğine sahip eğilme çatlakları oluşmuştur. Darbe uygulanan kenardan başlayıp karşı kenara diyagonal olarak uzanan 3 mm genişlikli kesme çatlağı olduğu görülmüştür. Darbe bölgesinde beton ezilmiş ve darbenin uygulandığı bölgede kabuk beton tamamen ayrılmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 : Imp-H350 kolon numunesine ait çatlak çizimleri.

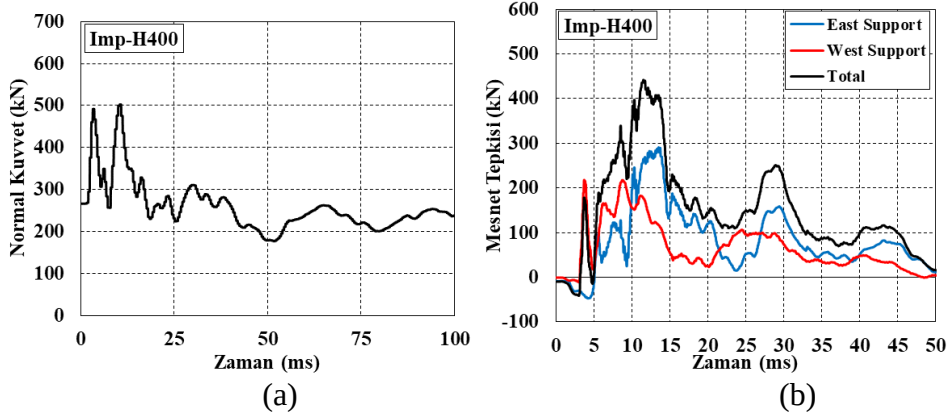
Imp-H350 numunesinde, 350 cm yükseklikten 585 kg ağırlıklı cismin serbest düşmesiyle darbe etkisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda, toplam maksimum 520 kN mesnet tepkisi ölçülmüş, darbe uygulanan noktanın karşısında 78.5 mm maksimum ve 78.4 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Boyuna ve enine donatılarda akma meydana gelmiştir. Numunede eğilme hasarı ile birlikte önemli miktarda kesme çatlakları gözlenmiştir. Eğilmede maksimum çatlak ağzı genişliği 13 mm, maksimum kesme çatlağı genişliği ise 3 mm olarak ölçülmüştür. Darbe uygulanan bölgede kabuk beton tamamen ayrılırken donatıda herhangi bir burkulma gözlenmemiştir. Numuneye ait hasar fotoğrafları Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 : Imp-H350 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi, (d) darbe uygulanan kenar görünümü.

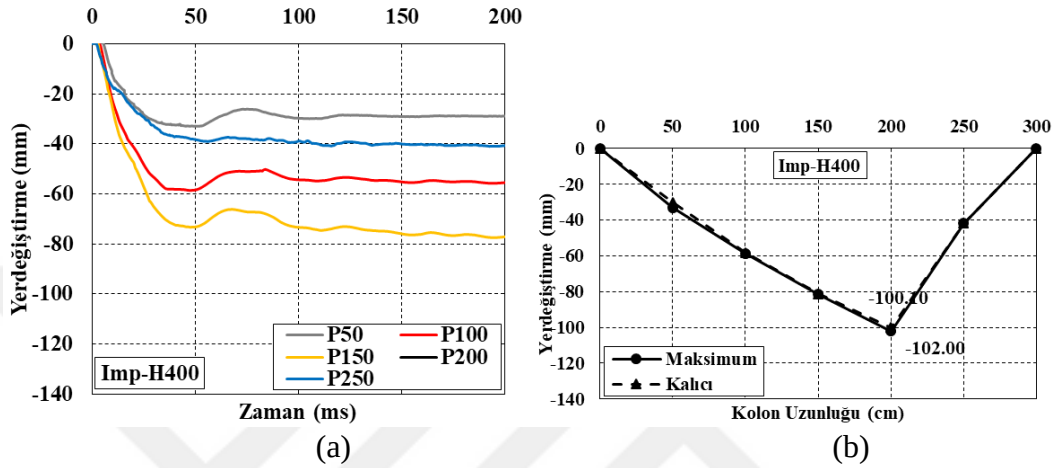
4.3.4 Imp-H400 numunesi

Betonarme kolon üzerinde darbe etkisi 585 kg ağırlıklı cismin numune üzerine 400 cm yükseklikten serbest düşürülmesiyle oluşturulmuştur. İlk darbe anından cismin numune üzerinden sekerek yeniden çarpması anına kadar geçen süre 250 ms olarak ölçülmüştür. Darbeden önce numune üzerine uygulanan sabit eksenel 270 kN yükün darbe etkisi ile birlikte yaklaşık 503 kN değerine kadar ulaştığı, yaklaşık 100 ms sonra ise 150 kN seviyesine gerilediği görülmüştür (Şekil 4.22a). Darbe etkisi ile birlikte yaklaşık 3 ms anında batı mesnetinde 210 kN basınç, 4 ms anında doğu mesnetinde ise 50 kN çekme kuvveti ölçülmüştür. Toplam maksimum mesnet reaksiyonu yaklaşık 12 ms anında 440 kN olarak ölçülmüş, darbeden yaklaşık 50 ms sonra mesnet tepkileri darbeden önceki seviyeye gerilemiştir (Şekil 4.22b).



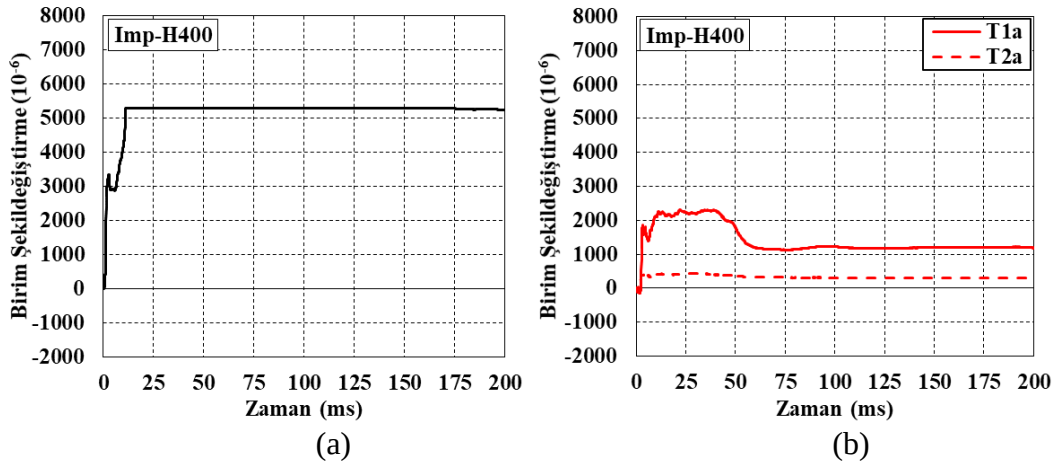
Şekil 4.22 : Imp-H400 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri.

Kolon ortasında (P150) yaklaşık 82 mm maksimum yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu değerdeki dalgalanma yaklaşık 200 ms sonra kalıcı yerdeğiştirme değerine ulaşmış ve 80 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.23a). Deney esnasında darbe uygulanan kesitten (P200) yerdeğiştirme ölçümü alınamamış, deney görsel kayıtları üzerinde yapılan çalışmalarda bu bölgedeki maksimum yerdeğiştirme 102 mm ve kalıcı yerdeğiştirme 100.1 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.23b).



Şekil 4.23 : Imp-H400 kolon numunesine ait (a) yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler.

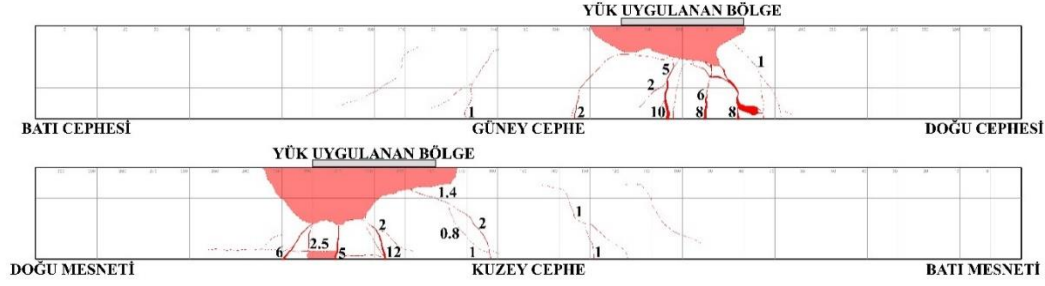
Boyuna donatıların darbe anında maksimum % 0.53 uzama ile akmaya eriştiği, enine donatıların ise maksimum % 0.22 uzamaya eriştiği görülmüştür (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 : Imp-H400 kolon numunesine ait birim şekildeğiştirmeler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.

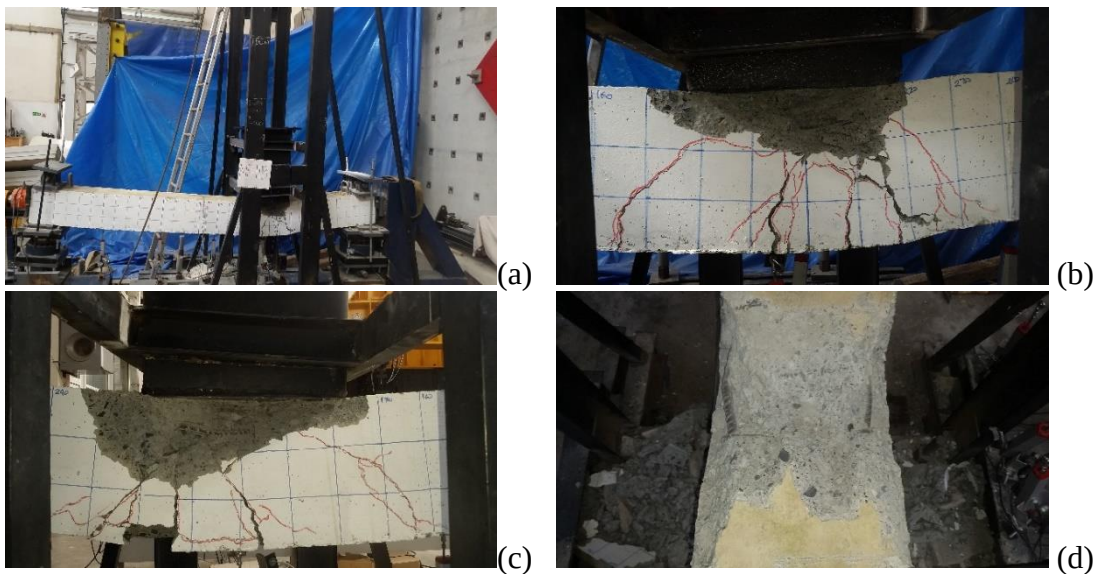
Darbe uygulanan kenarın karşısında bulunan kenarda, yaklaşık 160 cm genişlik boyunca en büyüğü 12 mm çatlak ağzı genişliğine sahip eğilme çatlakları oluşmuştur. Darbe uygulanan kenardan başlayıp karşı kenara diyagonal olarak uzanan 5 mm genişlikli kesme çatlakları oluştuğu görülmüştür. Darbe bölgesinde beton ezilmiş ve

darbenin uygulandığı bölgede tamamen, kolon yan yüzlerinde ise genişliğin yaklaşık yarısına kadar bölgede kabuk betonun ayrıldığı görülmüştür (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 : Imp-H400 kolon numunesine ait çatlak çizimleri.

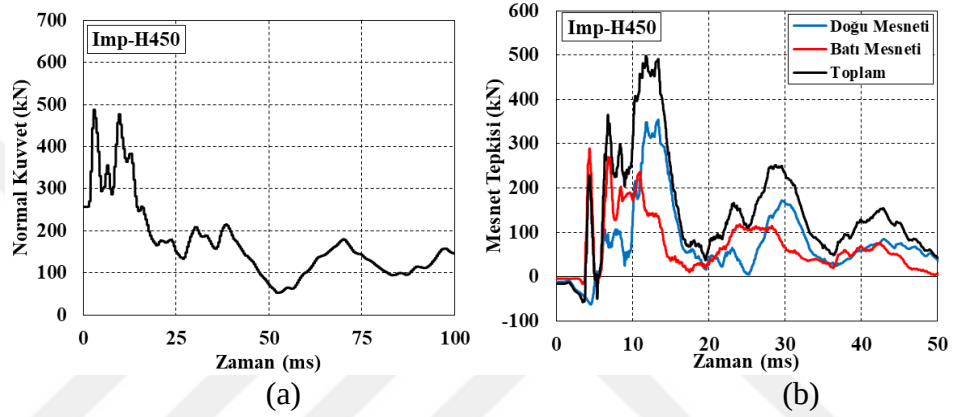
Imp-H400 numunesinde, 400 cm yükseklikten 585 kg ağırlıklı cismin serbest düşmesiyle darbe etkisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda, toplam maksimum 440 kN mesnet tepkisi ölçülmüş, darbe uygulanan noktanın karşısında 102 mm maksimum ve 100 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Boyuna ve enine donatılarda akma meydana gelmiştir. Numunede eğilme hasarı ile birlikte önemli miktarda kesme çatlakları gözlenmiş ve bu çatlaklar yaklaşık olarak kolon ortasına kadar devam etmiştir. Eğilmede maksimum çatlak ağzı genişliği 12 mm, maksimum kesme çatlağı genişliği ise 5 mm olarak ölçülmüştür. Darbe uygulanan bölgede kabuk beton tamamen ayrılırken, kolon yan yüzlerinde kolon genişliğinin yarısına kadar olan bölgede aynı durum gözlenmiştir. Alt kenarda ise lokal olarak kabuk betonda ayrılmalar görülmüştür. Darbe uygulanan bölgede boyuna donatılarda burkulma gözlenmiştir. Numuneye ait hasar fotoğrafları Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26 : Imp-H400 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi, (d) darbe uygulanan kenar görünümü.

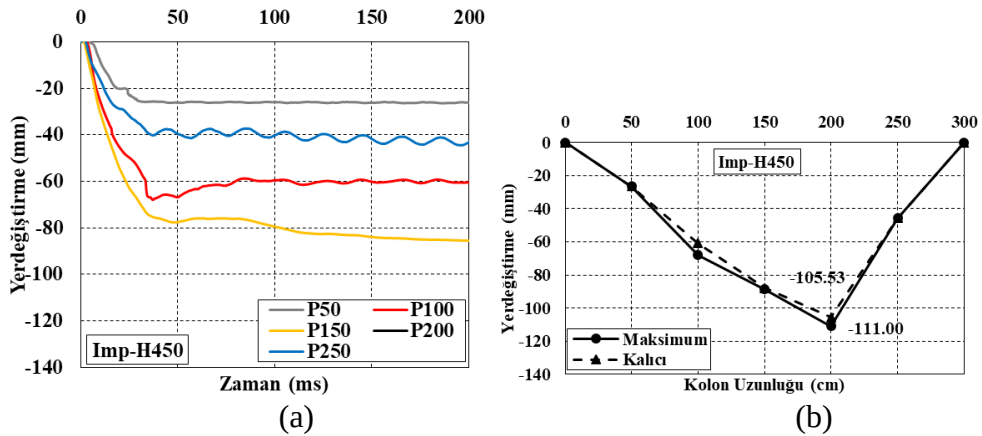
4.3.5 Imp-H450 numunesi

Darbe etkisi 585 kg ağırlıklı cismin numune üzerine 450 cm yükseklikten düşürülmesiyle oluşturulmuştur. İlk darbe anından cismin numune üzerinden sekerek yeniden çarpması anına kadar geçen süre 270 ms olarak ölçülmüştür. Eksenel yükün (270 kN) darbe etkisi ile yaklaşık 490 kN değerine kadar ulaştığı, 50 ms sonra ise 150 kN seviyesine gerilediği görülmüştür (Şekil 4.27a). Yaklaşık 5 ms anında batı mesnetinde 230 kN basınç, doğu mesnetinde ise 60 kN çekme kuvveti ölçülmüştür. Toplam maksimum mesnet reaksiyonu 12 ms anında 500 kN olarak ölçülmüş, 60 ms sonra mesnet tepkileri darbe öncesi seviyeye gerilemiştir (Şekil 4.27b).



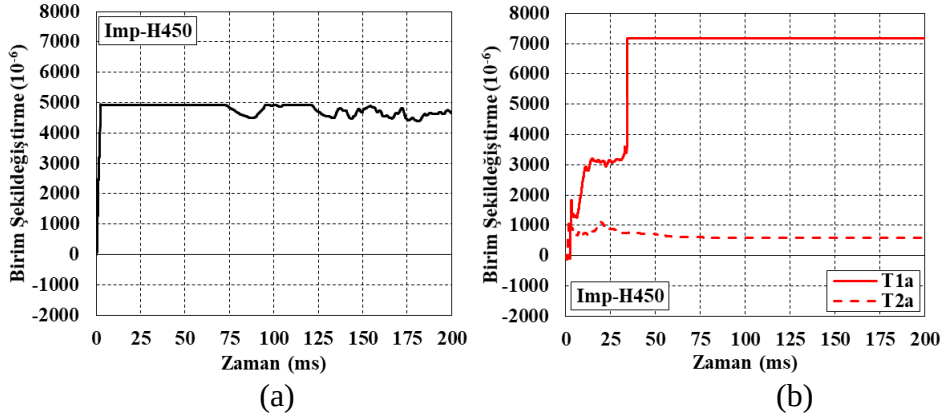
Şekil 4.27 : Imp-H450 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri.

Kolon ortasında (P150) yaklaşık 85 mm maksimum yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu değerdeki dalgalanma 200 ms sonra kalıcı yerdeğiştirme değerine ulaşmış ve 85 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.28a). P200 potansiyometresinden yerdeğiştirme ölçümü alınamamış, deney görsel kayıtlarından bu bölgedeki maksimum yerdeğiştirme 111 mm ve kalıcı yerdeğiştirme 105.5 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.28b).



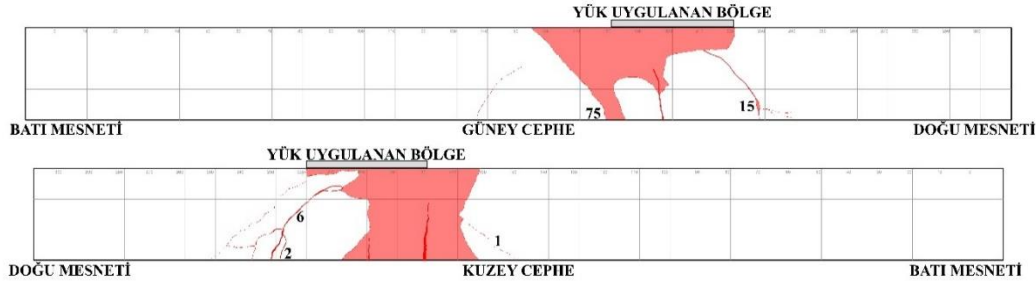
Şekil 4.28 : Imp-H450 kolon numunesine ait (a) yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler.

Boyuna donatıların darbe anında maksimum % 0.50 uzama ile akmaya eriştiği, enine donatıların ise maksimum % 0.71 uzama ile akmaya eriştiği görülmüştür (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 : Imp-H450 kolon numunesine ait birim şekildeğiştirmeler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.

Darbe uygulanan kenarın karşısında bulunan kenarda, yaklaşık 120 cm genişlik boyunca en büyüğü 15 mm çatlak ağzı genişliğine sahip eğilme çatlakları ve diyagonal olarak uzanan 15 mm genişlikli kesme çatlağı olduğu görülmüştür. Darbe bölgesinde beton ezilmiş, darbenin uygulandığı bölge ve kolon yan yüzlerinde ise kabuk betonun tamamen ayrıldığı görülmüştür (Şekil 4.30).



Şekil 4.30 : Imp-H450 kolon numunesine ait çatlak çizimleri.

Imp-H450 numunesinde, 450 cm yükseklikten 585 kg ağırlıklı cismin serbest düşmesiyle darbe etkisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda, toplam maksimum 500 kN mesnet tepkisi ölçülmüş, darbe uygulanan noktanın karşısında 111 mm maksimum ve 105.5 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Boyuna ve enine donatılarda akma meydana gelmiştir. Numunede eğilme hasarı ile birlikte önemli miktarda kesme çatlakları gözlenmiştir. Eğilmede maksimum çatlak ağzı genişliği 15 mm, maksimum kesme çatlağı genişliği ise 15 mm olarak ölçülmüştür. Darbe uygulanan bölgede ve kolon yan yüzlerinde kabuk beton tamamen ayrılmıştır. Alt kenarda ise lokal olarak kabuk betonda ayrılmalar görülmüştür. Darbe uygulanan kenara yakın donatılarda

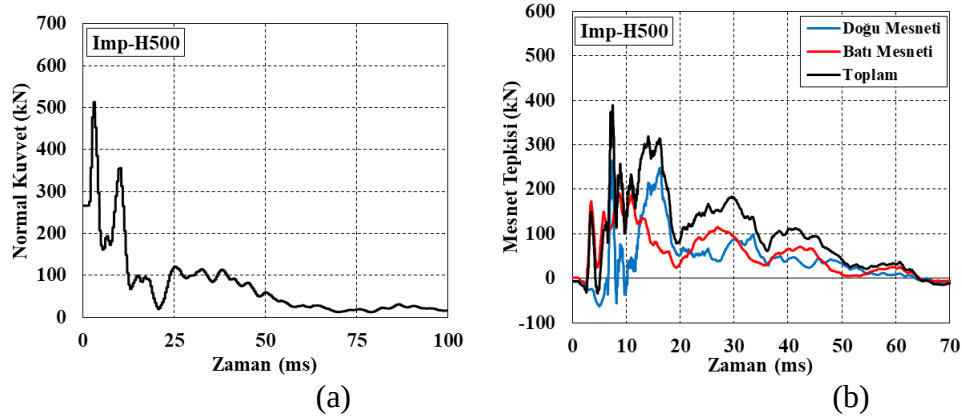
daha büyük boyutta olmak üzere tüm boyuna donatılarda burkulma gözlenmiştir. Numuneye ait hasar fotoğrafları Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31 : Imp-H450 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü, (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi, (d) darbe uygulanan kenar görünümü.

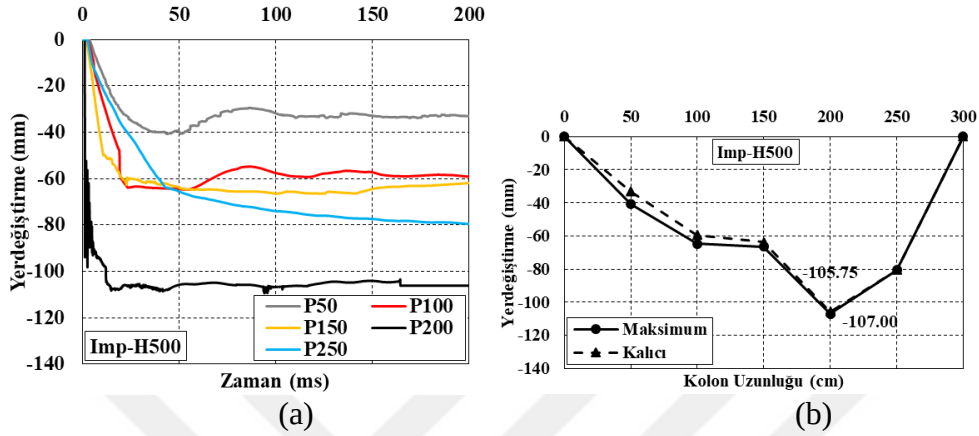
4.3.6 Imp-H500 numunesi

Darbe etkisi 585 kg ağırlıklı cismin numune üzerine 500 cm yükseklikten serbest düşürülmesiyle oluşturulmuştur. İlk darbe anından cismin numune üzerinden sekerek tekrar çarpmasına kadar geçen süre 270 ms olarak ölçülmüştür. Eksenel yükün (270 kN) yaklaşık 510 kN değerine kadar ulaştığı, 100 ms sonra ise tamamen ortadan kalktığı görülmüştür (Şekil 4.32a). Yaklaşık 4 ms anında batı mesnetinde 170 kN basınç, 5 ms anında ise doğu mesnetinde ise 60 kN çekme kuvveti ölçülmüştür. Toplam maksimum mesnet reaksiyonu 7.5 ms anında 390 kN olarak ölçülmüş, 50 ms sonra mesnet tepkileri darbeden önceki seviyeye gerilemiştir (Şekil 4.32b).



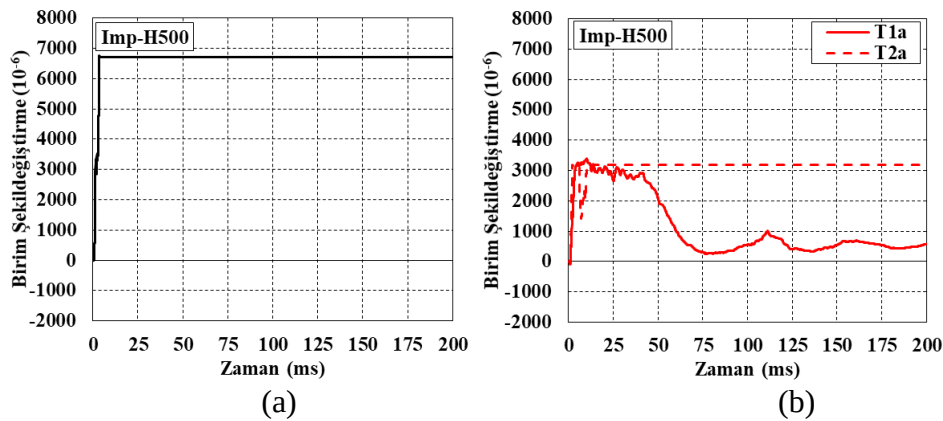
Şekil 4.32 : Imp-H500 numunesine ait (a) normal kuvvet-zaman, (b) mesnet tepkisi-zaman grafikleri.

Kolon altına yerleştirilen potansiyometrelerden darbe esnasında alınan ölçümlerde kolon ortasında (P200) yaklaşık 107 mm maksimum yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu değerdeki dalgalanma yaklaşık 200 ms sonra kalıcı yerdeğiştirme değerine ulaşmış ve 106 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.33a). Deney sonucunda maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmelerin kolon boyunca değişimi Şekil 4.33b’de verilmiştir.



Şekil 4.33 : Imp-H500 kolon numunesine ait (a) yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi, (b) maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler.

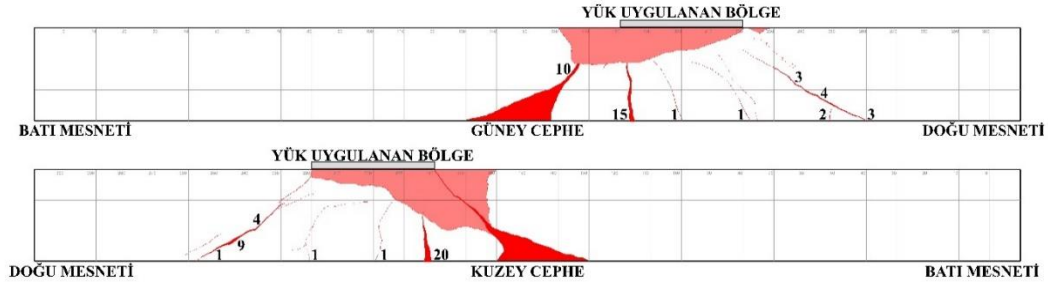
Kolon boyuna donatısı ve etriyelere yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerlerden darbe anında alınan değerlere göre, boyuna donatıların darbe anında maksimum % 0.67 uzama ile akmaya eriştiği, enine donatıların ise maksimum % 0.32 uzama ile akmaya eriştiği görülmüştür (Şekil 4.34).



Şekil 4.34 : Imp-H500 kolon numunesine ait birim şekildeğiştirmeler (a) boyuna donatılar, (b) enine donatılar.

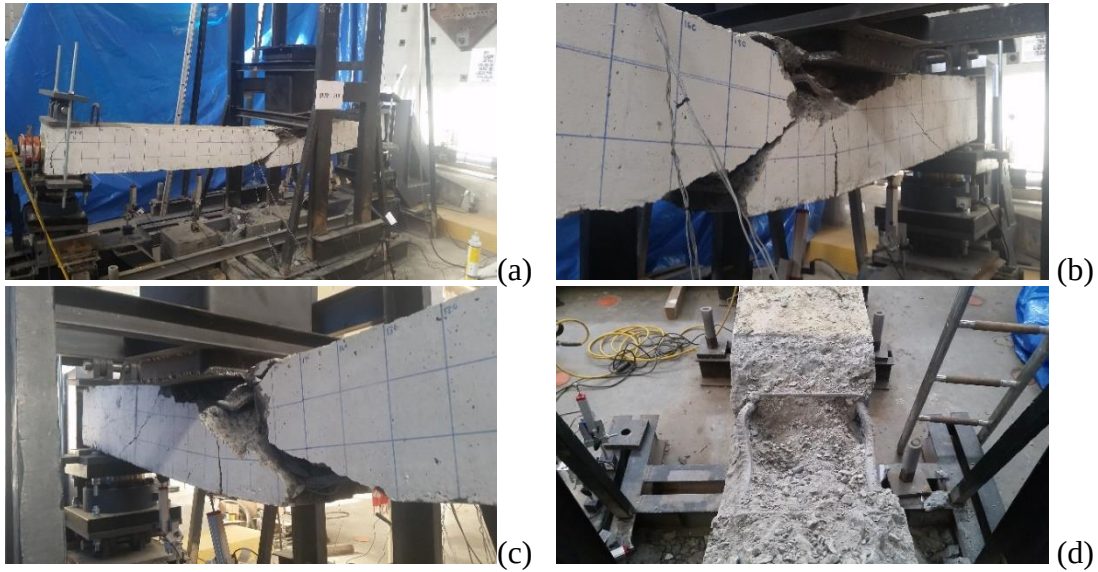
Darbe uygulanan kenarın karşısında bulunan kenarda, yaklaşık 160 cm genişlik boyunca en büyüğü 20 mm çatlak ağzı genişliğine sahip eğilme çatlakları oluşmuştur. Darbe uygulanan kenardan başlayıp karşı kenara diyagonal olarak uzanan numunenin tamamen kesme göçmesiyle hasar almasını sağlayan kesme çatlakları oluştuğu

görülmüştür. Darbe bölgesinde beton ezilmiş, darbenin uygulandığı bölge ve kolon yan yüzlerinde ise kabuk betonun tamamen ayrıldığı görülmüştür. Numunenin güney ve kuzey cephelerinden yapılan çatlak çizimleri Şekil 4.35'te gösterilmiştir.



Şekil 4.35 : Imp-H500 kolon numunesine ait çatlak çizimleri.

Imp-H500 numunesinde, 500 cm yükseklikten 585 kg ağırlıklı cismin serbest düşmesiyle darbe etkisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda, toplam maksimum 390 kN mesnet tepkisi ölçülmüş, darbe uygulanan noktanın karşısında 107 mm maksimum ve 106 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Kesme göçmesinin meydana geldiği bölge, yerdeğiştirme ölçümü alınan noktalar arasında kaldığından, kolon üzerinden alınan yerdeğiştirme ölçümlerinin tutarlı olmadığı görülmüştür. Boyuna ve enine donatılarda akma meydana gelmiştir. Numunede kesme göçmesi ile birlikte önemli miktarda eğilme çatlakları gözlenmiştir. Darbe uygulanan bölgede ve kolon yan yüzlerinde kabuk beton tamamen ayrılmıştır. Boyuna donatıların tamamında burkulma gözlenmiştir. Numuneye ait hasar fotoğrafları Şekil 4.36'da verilmiştir.

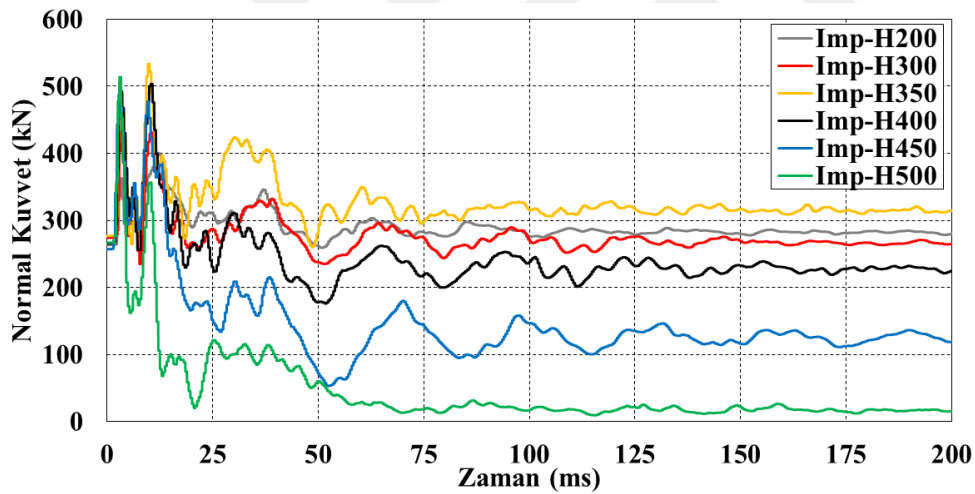


Şekil 4.36 : Imp-H500 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) güney cephe genel görünümü , (b) güney cephe darbe bölgesi çevresi, (c) kuzey cephe darbe bölgesi çevresi, (d) darbe uygulanan kenarın görünümü.

4.4 Darbe Deneyi Sonuçlarının Karşılaştırılması

4.4.1 Eksenel yükün karşılaştırılması

Darbe öncesi sabit olarak uygulanan 270 kN eksenel yük düzeyi darbe esnasında, ilk 100 ms zaman zarfında değişiklik göstermiş bundan sonra küçük dalgalanmalarla birlikte 200 ms anında nihai durumuna ulaşmıştır (Şekil 4.37). Darbe anında eksenel yük Imp-H200 numunesinde 362 kN, Imp-H300 numunesinde 433 kN ve Imp-H350 numunesinde 504 kN değerlerine kadar yükselmiştir. Bu numunelerde eksenel yük düzeyi darbeden sonra yaklaşık olarak başlangıç değerine ulaşırken, Imp-H400 numunesinde 220 kN, Imp-H450 numunesinde 110 kN ve Imp-H500 numunesinde 20 kN değerine kadar düşmüştür. Eksenel yük seviyesindeki bu düşüşün sebebi boyuna donatı burkulmaları ile birlikte numunelerde büyük oranda yerdeğiştirmelerin gözlenmesi ve boy değişimi ile birlikte sabit olarak uygulanan eksenel yük düzeyinin korunamamasıdır. Ancak darbenin başlangıç aşamasında görülen ani yükseliş ve düşüşler daha önceki çalışmalarda da gösterilmiştir.

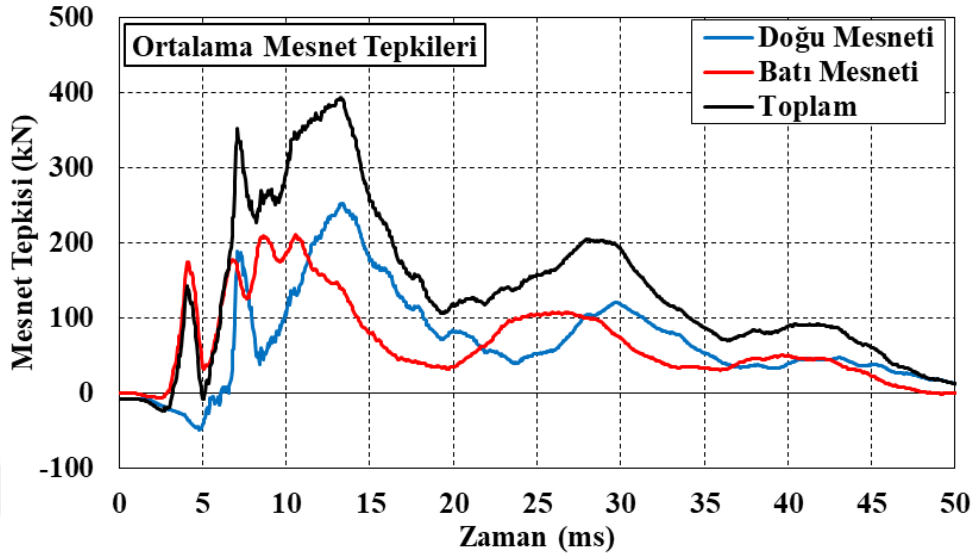


Şekil 4.37 : Normal kuvvet-zaman grafiği.

4.4.2 Mesnet tepkilerinin karşılaştırılması

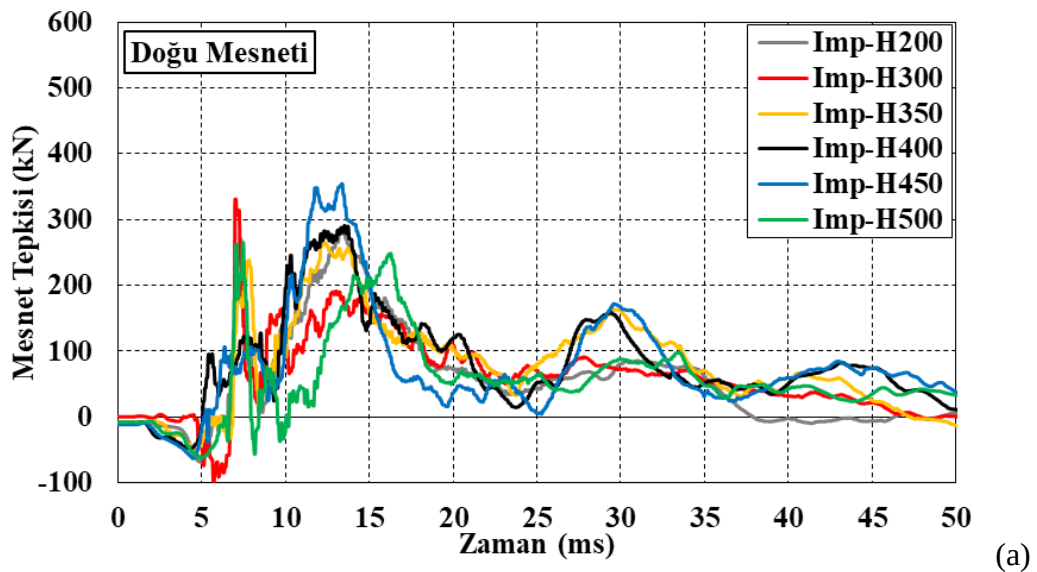
Deneyisel çalışma ile yapılan farklı enerji seviyeli darbe etkileri karşılaştırılarak ortalama mesnet tepkisi zaman grafikleri çıkarılmıştır (Şekil 4.38). Buna göre darbe uygulandıktan 4 ms sonra batı mesnetinde ortalama 170 kN basınç, doğu mesnetinde ise 5 ms sonra ortalama 50 kN çekme kuvveti elde edilmiştir. 11 ms anında batı mesnetinde maksimum yaklaşık 210 kN kuvvet değeri elde edildikten sonra sönümlenerek genliği giderek azalmış ve yaklaşık 50 ms anında hareket sona ermiştir. Benzer şekilde 13 ms anında doğu mesnetinde 250 kN kuvvet değeri elde edildikten

sonra hareket sönümlenerek 50 ms anında sona ermiştir. Mesnet tepkilerinin pik noktaları incelendiğinde, doğu ile batı mesnet tepkilerinin maksimum noktaları arasında 4 ms zaman farkının olduğu görülmüştür.

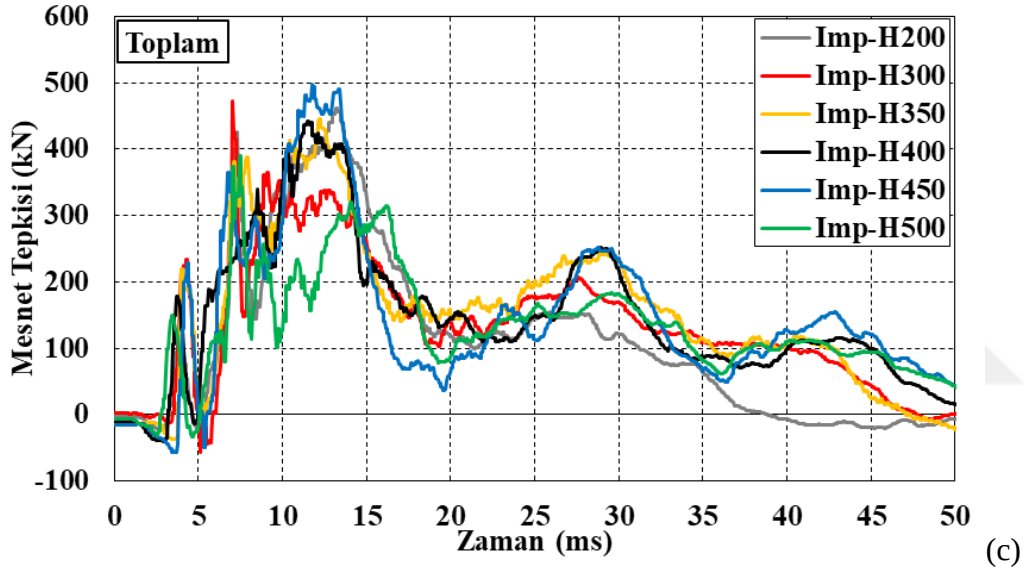
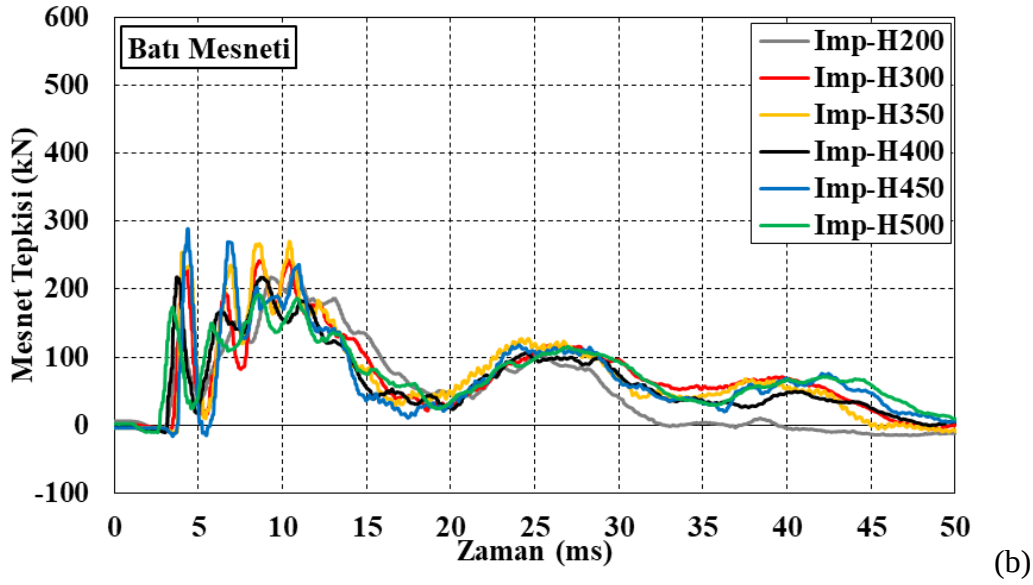


Şekil 4.38 : Ortalama mesnet tepkisi-zaman grafiği.

Doğu mesnetinde maksimum mesnet reaksiyonlarının 7-14 ms, batı mesnetinde 3-11 ms, toplamda ise 7-14 ms aralığında olduğu görülmüştür (Şekil 4.39). Maksimum noktalar arasında ölçülen ortalama dalga boyu yaklaşık 15 ms olarak saptanmıştır. Doğu ile batı mesnetlerinde bu genlik ortalama 7 ms ötelenerek gerçekleşmiştir. Başka bir ifadeyle, doğu mesnetinde tepe noktasına ulaşan mesnet tepkisi aynı anda batı mesnetinde yaklaşık olarak çukur noktasında bulunmaktadır.

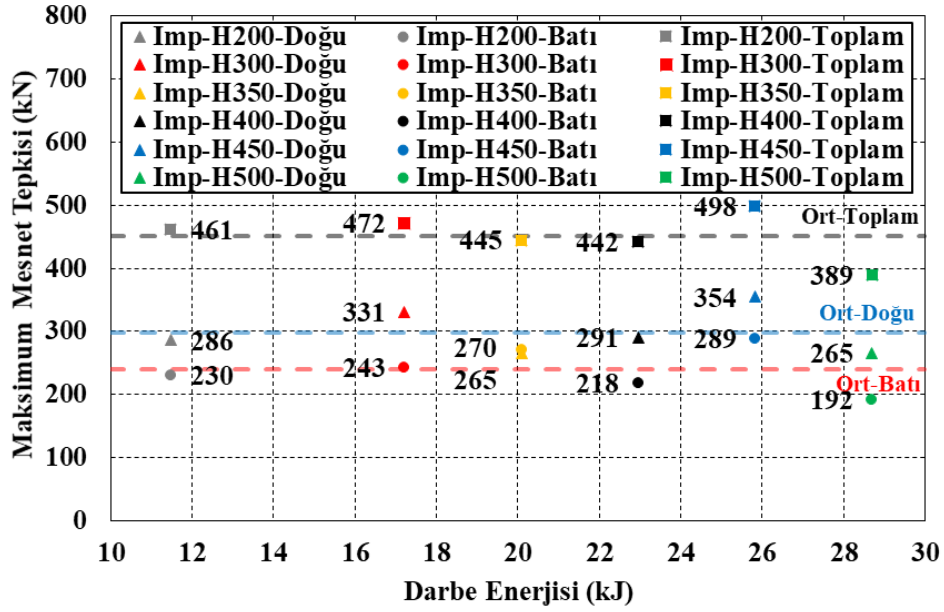


Şekil 4.39 : Mesnet tepkisi-zaman grafikleri, (a) doğu mesneti, (b) batı mesneti, (c) toplam.



Şekil 4.39 (devamı) : Mesnet tepkisi-zaman grafikleri, (a) doğu mesneti, (b) batı mesneti, (c) toplam.

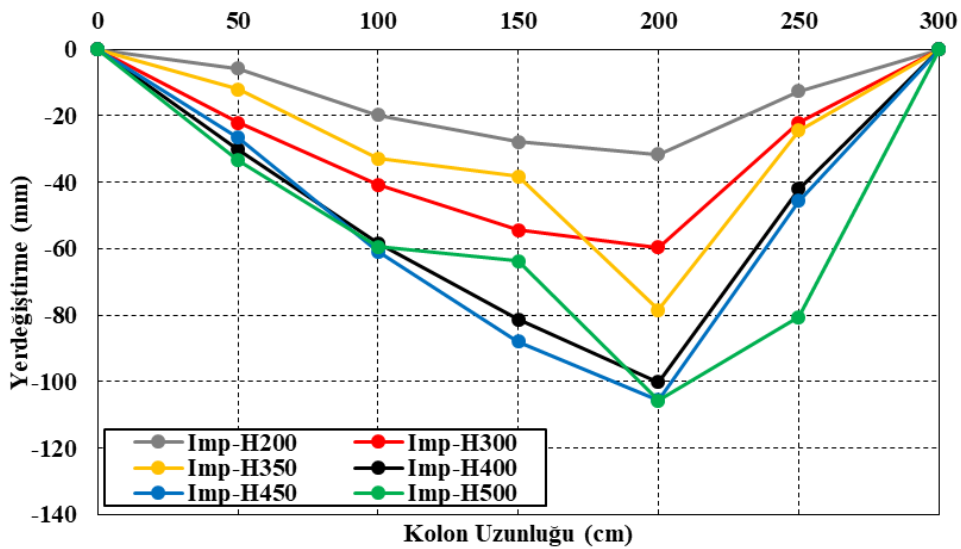
Darbe enerjisi ile maksimum mesnet tepkileri arasındaki ilişki çıkarıldığında, toplam maksimum mesnet tepkisinin Imp-H450 numunesinde (498 kN) gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4.40). Tüm darbe enerji seviyeleri için darbe uygulanan bölgeye yakın mesnet olan doğu mesnetindeki tepki batı mesnet tepkisinin üzerinde gerçekleşmiştir. En düşük maksimum mesnet tepkileri Imp-H500 numunesinde (389 kN) gerçekleşmiştir. Imp-H500 numunesi dışında tüm numunelerde mesnet tepkilerinin yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.40 : Maksimum mesnet tepkisi-darbe enerjisi ilişkisi.

4.4.3 Yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması

Deneysel çalışma ile yapılan farklı enerji seviyeli darbe etkileri karşılaştırılarak kalıcı yerdeğiştirmeler çıkarılmıştır (Şekil 4.41). Darbe uygulanan bölgenin altında ölçülen en küçük yerdeğiştirme Imp-H200 numunesinde 31.5 mm olarak elde edilmiştir. Imp-H300 ve Imp-H350 numunelerinde bu değer sırasıyla 59.6 mm ve 78.4 mm'dir. En büyük yerdeğiştirme ise Imp-H500 numunesinde 105.8 mm olarak ölçülmüştür. Imp-H450 ve Imp-H400 numunesinde maksimum yerdeğiştirmeye oldukça yakın değerler (sırasıyla 100.1 ve 105.5 mm) elde edilmiştir.



Şekil 4.41 : Kalıcı yerdeğiştirmeler.

4.4.4 Hasar şekillerinin karşılaştırılması

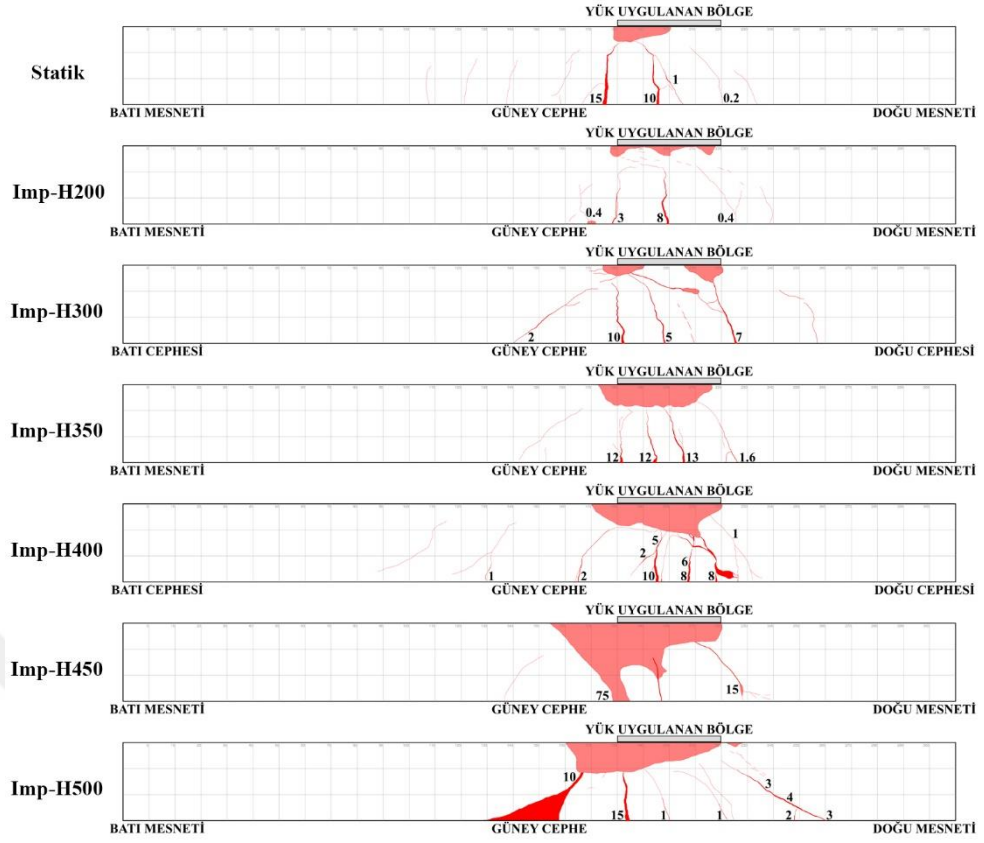
Deneyisel çalışma ile farklı enerji seviyeleri altında darbeye maruz bırakılan betonarme kolon numunelerinin deneyisel çalışma sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Uygulanan darbe enerjisi (darbe yüksekliği) arttıkça kesme çatlak sayısı ve çatlak genişliğinin arttığı görülmüştür. Imp-H200 numunesinde kesme çatlak genişliği 1 mm’den daha küçükken Imp-H500 numunesinde kesme çatlak genişliği 15 mm değerine ulaşmıştır. Eğilme çatlaklarında ise Imp-H200 numunesinde 8 mm çatlak genişliği ölçülmüşken, Imp-H500 numunesinde bu değer 20 mm’ye kadar yükselmiştir (Şekil 4.42). Darbe enerjisi arttıkça numunelerde hasara neden olan hakim davranışın eğilmeden kesmeye doğru dönüştüğü görülmüştür.

Darbe uygulanan bölgede yüksek çözünürlüklü kamera ile alınan görüntüler üzerinde meydana gelen şekil değiştirmeler Şekil 4.43’te numunelerin deney sonrası durumları ile birlikte verilmiştir. Darbe öncesi başlangıç eksenleri mavi çizgi ile darbe sonrası şekil değiştirmiş eksenler kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça darbe uygulanan bölge civarında önemli ölçüde geometri değişimlerinin meydana geldiği görülmüştür. Bunun neticesinde kabuk betonda dökülmeler meydana gelmiştir.

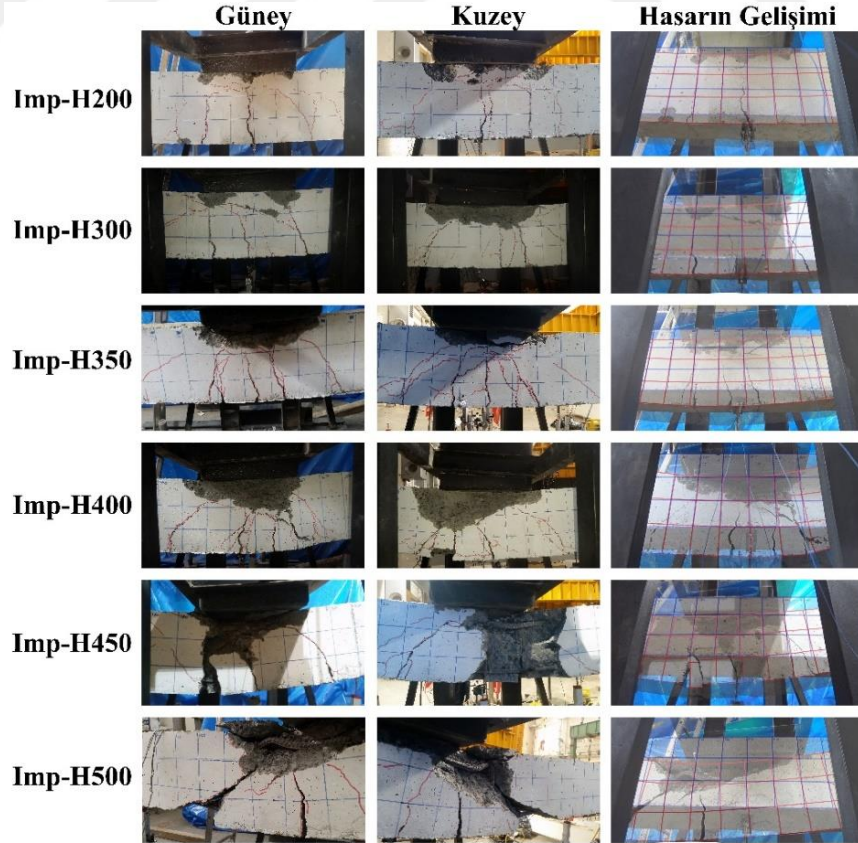
Artan yer değiştirmelerle birlikte, boyuna donatıların tüm numunelerde, etriyelerde ise Imp-H200 numunesi dışında tüm numunelerde akma bölgesine eriştiği görülmüştür. (Şekil 4.9, 4.14, 4.24, 4.29, 4.34). Boyuna donatılarda Imp-H400, Imp-H450 ve Imp-H500 numunelerinde burkulmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.26, 4.32, 4.36).

Çizelge 4.2 : Deney sonuçları.

Numune	Darbe yüksekliği	Hakim davranış	Maks. toplam mesnet tepkisi (kN)	P200’de okunan yer değiştirme (mm)		Betonda maks. çatlak genişliği (mm)		Donatılarda maks. birim şekil değiştirme (%)		Boyuna donatıda burkulma durumu
				Maks.	Kalıcı	Kesme	Eğilme	Boyuna donatı	Enine donatı	
Sta	Statik	Eğilme	-	-	-	-	-	-	-	-
Imp-H200	2.0	Eğilme	461	35	31.5	<1	8	0.30	-0.05	-
Imp-H300	3.0	Eğilme	472	61	59.6	2	10	0.56	0.37	-
Imp-H350	3.5	Kesme / Eğilme	444	78.5	78.4	3	13	0.56	0.67	-
Imp-H400	4.0	Kesme / Eğilme	442	102	100.1	5	12	0.53	0.22	+
Imp-H450	4.5	Kesme / Eğilme	498	111	105.5	15	15	0.50	0.71	+
Imp-H500	5.0	Kesme	389	107	105.7	15	20	0.67	0.32	+



Şekil 4.42 : Numunelerin çatlak şekilleri (güney cepheden yapılan çizim).



Şekil 4.43 : Numunelerde hasarın gelişimi.



5. ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

5.1 Giriş

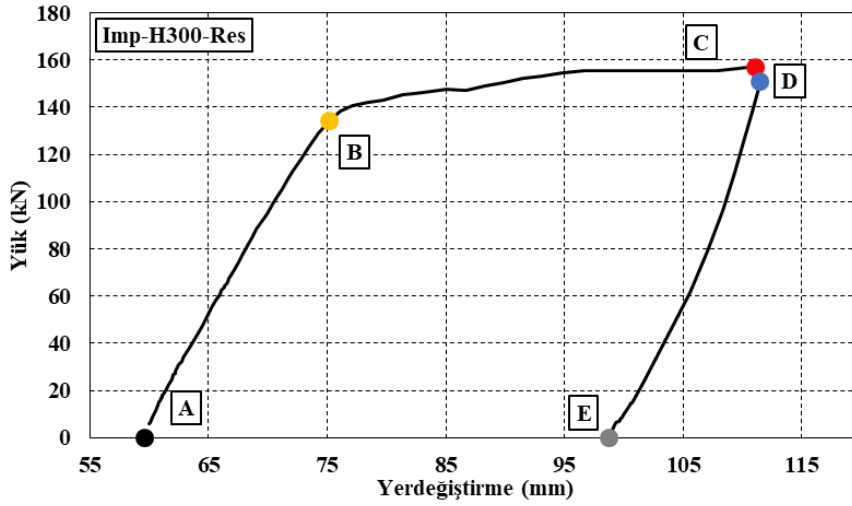
Deneyssel çalışma kapsamında üretilen, Imp-H300, Imp-H350 ve Imp-H400 numuneleri üzerinde, darbe etkisi sonrası artık yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla statik yükleme deneyi yapılmıştır. Imp-450 ve Imp-H500 numunelerinde, hasar kaynaklı büyük geometri değişimlerinden dolayı eksenel yük uygulandığında hasarın giderek artması nedeniyle, statik yüklemeler yapılamamıştır. Başka bir deyişle bu numunelerde darbe etkisiyle numune yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır.

Tıpkı darbe deneylerinde olduğu gibi sabit 270 kN eksenel yük altındaki Imp-H300, Imp-H350 ve Imp-H400 numuneleri, darbe uygulanan bölgeden statik yüklemeye tabi tutulmuştur. Bu yükleme altında, betonarme kolonun davranışını tespit etmek amacıyla, yük ölçümleri, yerdeğiştirme ölçümleri, birim şekildeğiştirme ölçümleri ve çatlak genişlikleri gibi bir dizi ölçüm gerçekleştirilmiştir.

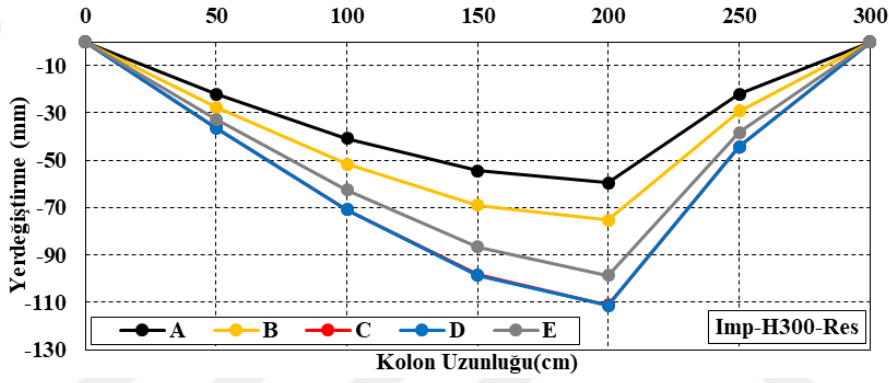
5.2 Artık Kapasite Deney Sonuçları

5.2.1 Imp-H300-Res numunesi

Imp-H300 numunesi darbe etkisi sonrası statik yüklemeye tabi tutulduğunda, yaklaşık 15.6 mm yerdeğiştirme (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 75.2 mm) ve 134.3 kN yük seviyesine ulaşıldıktan sonra kesitin rijitliği önemli ölçüde azalmaya başlamıştır. Maksimum 157.1 kN yük kapasitesine 51.5 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 111.1 mm) yerdeğiştirme seviyesinde ulaşıldıktan sonra yerdeğiştirmelerin hızla artması sonucu 150.9 kN yük seviyesinde ve 51.9 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 111.5 mm) yerdeğiştirme seviyesinde yük boşaltılmış ve 39.1 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 98.7 mm) kalıcı yerdeğiştirme ile deney sonlandırılmıştır (Şekil 5.1, Şekil 5.2).

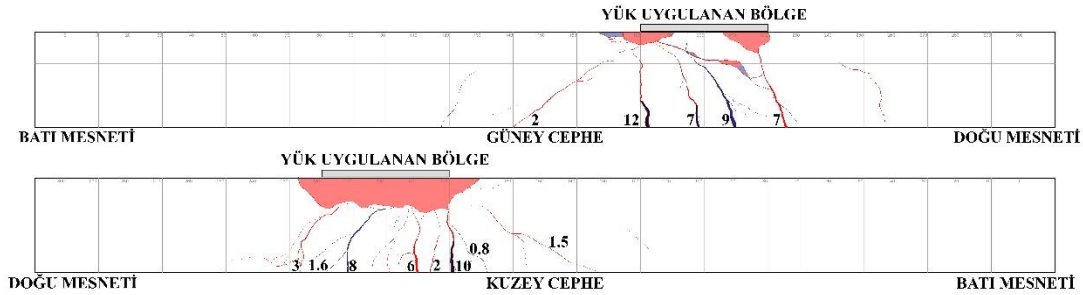


Şekil 5.1 : Imp-H300-Res numunesinde statik yükleme deneyi.

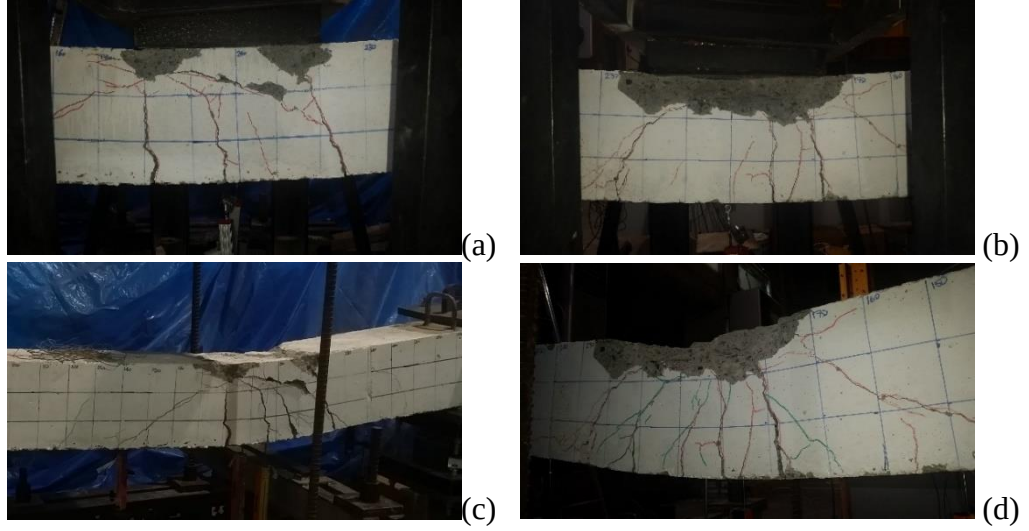


Şekil 5.2 : Imp-H300-Res numunesinde yerdeğiştirmeler.

Statik yükleme deneyi esnasında yapılan incelemelerde numune üzerinde bulunan eğilme çatlaklarının genişlediği ve sayıca arttığı gözlenmiştir. Darbe etkisi sonrası maksimum 10 mm olarak ölçülen çatlak ağzı genişliği, statik yükleme sonrası 12 mm olarak ölçülmüştür. Statik yükleme sonrasında çizilen çatlak haritası Şekil 5.3'te, numuneye ait fotoğraflar ise Şekil 5.4'te verilmiştir.



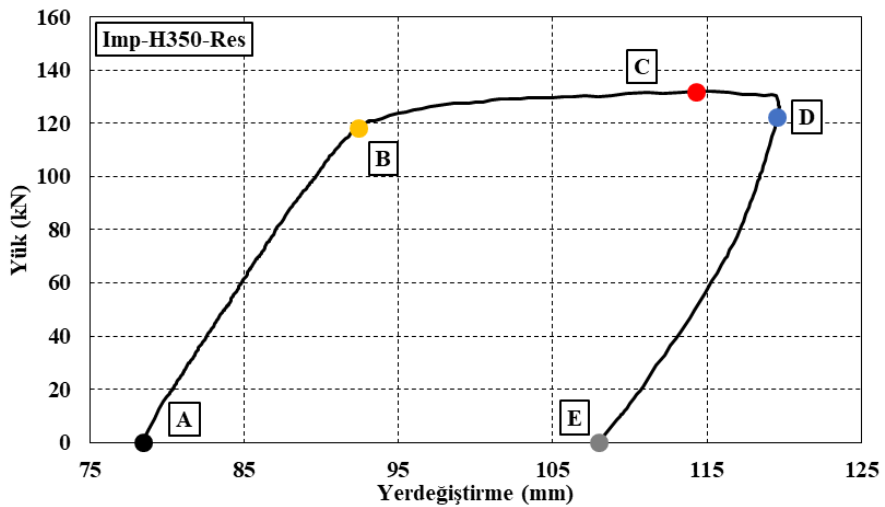
Şekil 5.3 : Imp-H300-Res numunesine ait çatlak haritası (mor işaretli bölgeler statik yükleme anında oluşan hasarları göstermektedir).



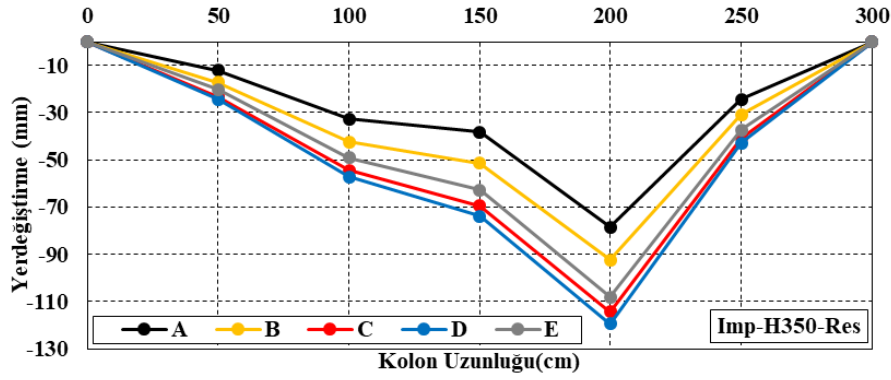
Şekil 5.4 : Imp-H300 numunesine ait statik yükleme sonrası hasar fotoğrafları, (a) darbe sonrası güney cephe görünümü, (b) darbe sonrası kuzey cephe görünümü, (c) statik yükleme sonrası güney cephe görünümü, (d) statik yükleme sonrası kuzey cephe görünümü.

5.2.2 Imp-H350-Res numunesi

Imp-H350 numunesi darbe etkisi sonrası statik yüklemeye tabi tutulduğunda, yaklaşık 14 mm yerdeğiştirme (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 78.4 mm) ve 118.4 kN yük seviyesine ulaşıldıktan sonra kesitin rijitliği önemli ölçüde azalmaya başlamıştır. Maksimum 132 kN yük kapasitesine 35.8 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 114.3 mm) yerdeğiştirme seviyesinde ulaşıldıktan sonra yerdeğiştirmelerin hızla artması sonucu 122.3 kN yük seviyesinde ve 41.1 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 119.6 mm) yerdeğiştirme seviyesinde yük boşaltılmış ve 29.6 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 108 mm) kalıcı yerdeğiştirme ile deney sonlandırılmıştır (Şekil 5.5, Şekil 5.6).

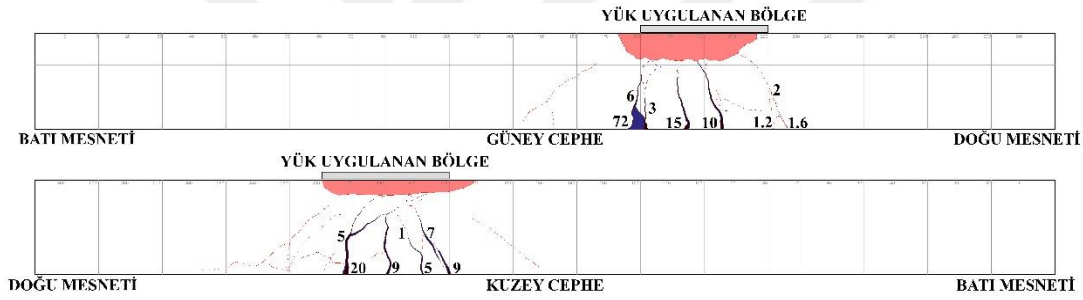


Şekil 5.5 : Imp-H350-Res numunesinde statik yükleme deneyi.

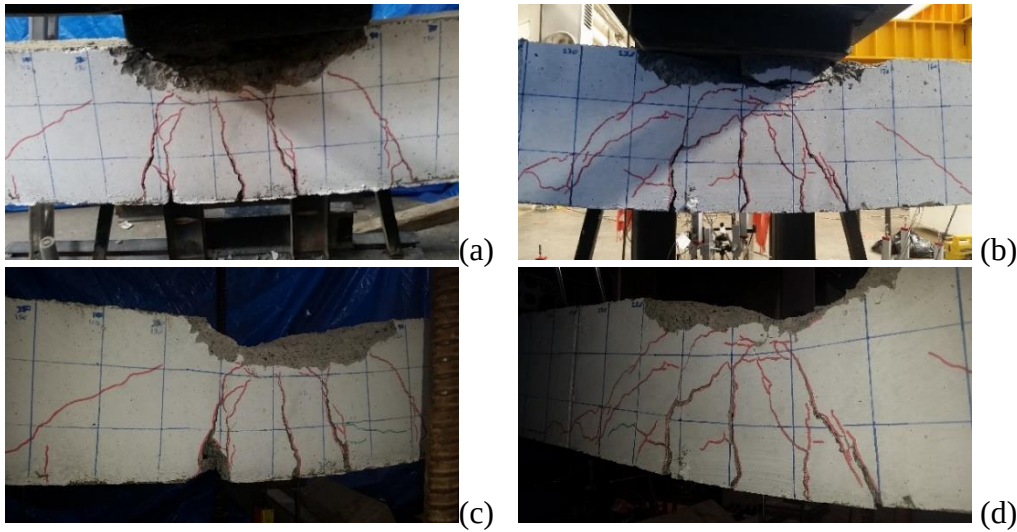


Şekil 5.6 : Imp-H350-Res numunesinde yerdeğiştirmeler.

Statik yükleme deneyi esnasında yapılan incelemelerde numune üzerinde bulunan eğilme çatlaklarının genişlediği ve sayıca arttığı gözlenmiştir. Darbe etkisi sonrası maksimum 13 mm olarak ölçülen çatlak ağzı genişliği, statik yükleme sonrası 72 mm olarak ölçülmüştür. Statik yükleme sonrasında çizilen çatlak haritası Şekil 5.7’de, numuneye ait fotoğraflar ise Şekil 5.8’de verilmiştir.



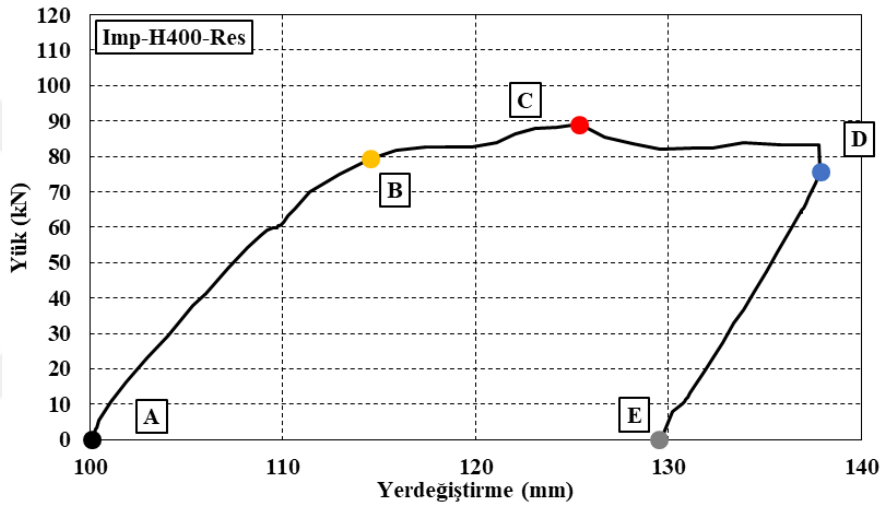
Şekil 5.7 : Imp-H350-Res numunesine ait çatlak haritası (mor işaretli bölgeler statik yükleme anında oluşan hasarları göstermektedir).



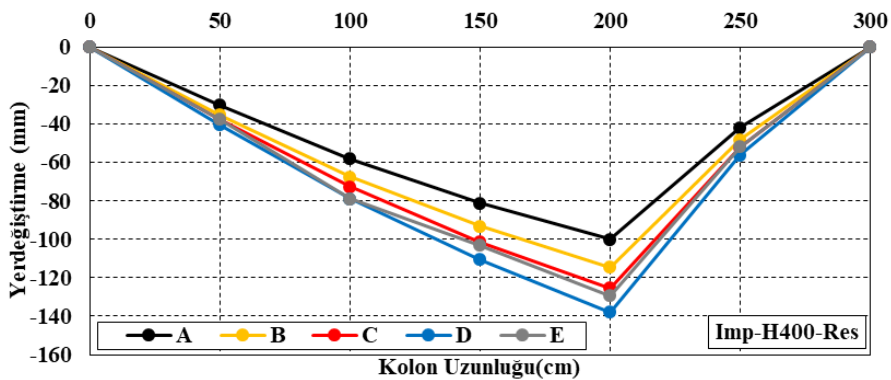
Şekil 5.8 : Imp-H350 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) darbe sonrası güney cephe görünümü, (b) darbe sonrası kuzey cephe görünümü, (c) statik yükleme sonrası güney cephe görünümü, (d) statik yükleme sonrası kuzey cephe görünümü.

5.2.3 Imp-H400-Res numunesi

Imp-H400 numunesi darbe etkisi sonrası statik yüklemeye tabi tutulduğunda, yaklaşık 14.4 mm yerdeğiştirme (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 114.5 mm) ve 79.3 kN yük seviyesine ulaşıldıktan sonra kesitin rijitliği önemli ölçüde azalmaya başlamıştır. Maksimum 89 kN yük kapasitesine 25.3 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 125.4 mm) yerdeğiştirme seviyesinde ulaşıldıktan sonra yerdeğiştirmelerin hızla artması sonucu 75.9 kN yük seviyesinde ve 37.8 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 137.9 mm) yerdeğiştirme seviyesinde yük boşaltılmış ve 29.4 mm (darbe etkisi sonrası kalıcı yerdeğiştirme ile birlikte 129.5 mm) kalıcı yerdeğiştirme ile deney sonlandırılmıştır (Şekil 5.9, Şekil 5.10).



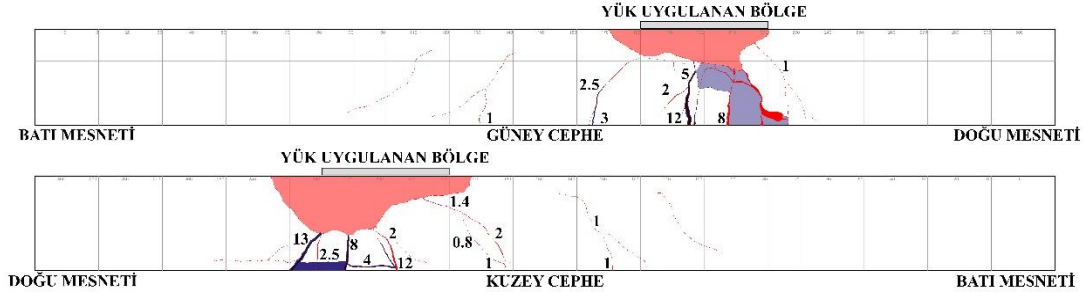
Şekil 5.9 : Imp-H400-Res numunesinde statik yüklemeye deneyi.



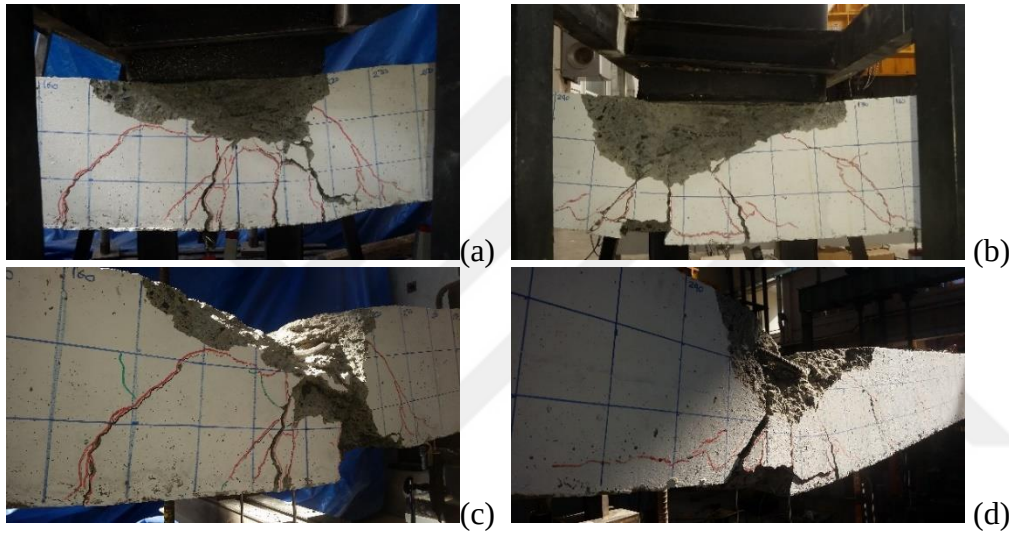
Şekil 5.10 : Imp-H400-Res numunesinde yerdeğiştirmeler.

Statik yüklemeye deneyi esnasında yapılan incelemelerde numune üzerinde bulunan eğilme çatlaklarının genişlediği ve sayıca arttığı gözlenmiştir. Darbe etkisi sonrası maksimum 12 mm olarak ölçülen çatlak ağzı genişliği, statik yüklemeye sonrası 200 mm

olarak ölçülmüştür. Statik yükleme sonrasında çizilen çatlak haritası Şekil 5.11’de, numuneye ait fotoğraflar ise Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.11 : Imp-H400-Res numunesine ait çatlak haritası (Mor işaretli bölgeler statik yükleme anında oluşan hasarları göstermektedir).



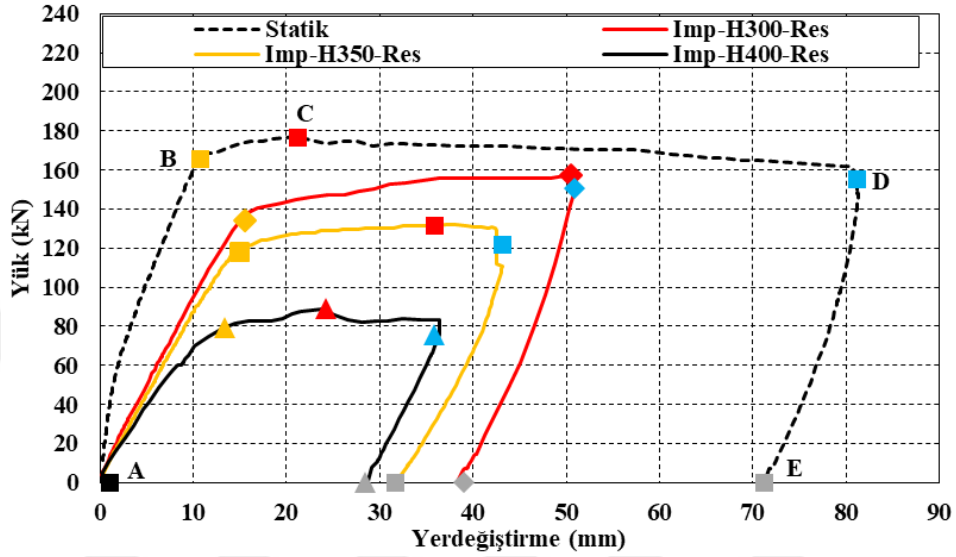
Şekil 5.12 : Imp-H400 kolon numunesine ait deney sonrası hasar fotoğrafları, (a) darbe sonrası güney cephe görünümü, (b) darbe sonrası kuzey cephe görünümü, (c) statik yükleme sonrası güney cephe görünümü, (d) statik yükleme sonrası kuzey cephe görünümü.

5.3 Artık Yük Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Darbe etkisi sonrası yapılan statik yükleme deneyinde meydana gelen maksimum yerdeğiştirmeler ile deney sonrası ölçülen kalıcı yerdeğiştirmeler ve statik yük taşıma kapasiteleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça statik yükleme sonucu maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmelerin de arttığı görülmüştür. Bununla birlikte hasarsız numunede (Statik) 176.9 kN olan yük taşıma kapasitesi, Imp-H300-Res numunesinde 157.1 kN, Imp-H350-Res numunesinde 132.0 kN ve Imp-H400-Res numunesinde 89.0 kN değerine kadar azalmıştır. Başka bir ifadeyle Imp-H400-Res numunesinde artık yük taşıma kapasitesi, hasarsız numunenin yaklaşık olarak yarısı seviyesindedir (Şekil 5.13).

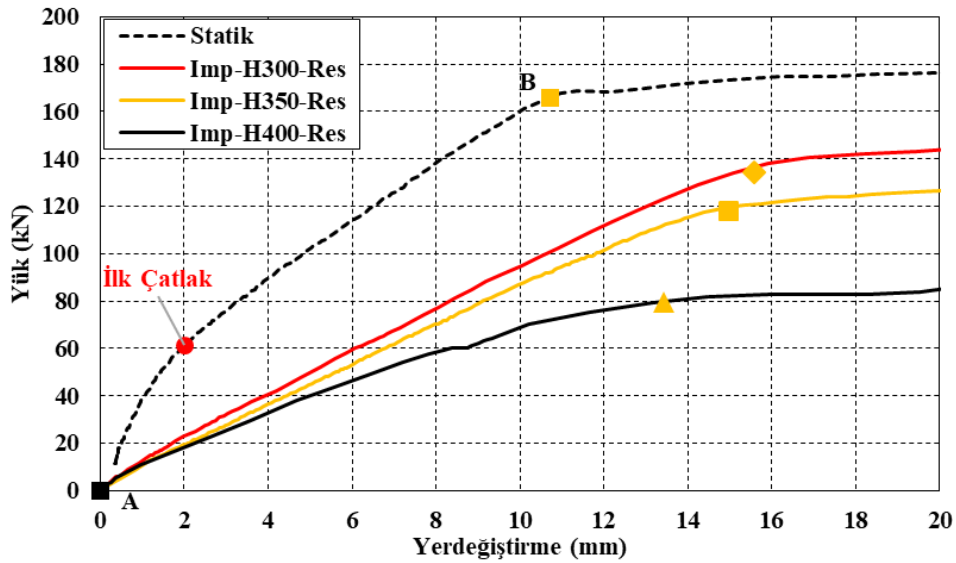
Çizelge 5.1 : Yük taşıma kapasiteleri ve yerdeğiştirmeler.

Numune	P200 Yerdeğiştirme (mm)				Statik Yük
	Darbe Etkisi		Statik Yükleme		Taşıma
	Maksimum	Kalıcı	Maksimum	Kalıcı	Kapasitesi (kN)
Statik	0.0	0.0	81.1	71.2	176.9
Imp-H300-Res	62.0	59.6	111.5	98.7	157.1
Imp-H350-Res	78.5	78.4	119.6	108.0	132.0
Imp-H400-Res	102.0	100.1	137.9	129.5	89.0



Şekil 5.13 : Yük-yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

Yük-yerdeğiştirme eğrilerinin lineer olarak değiştiği bölge Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Statik numune üzerinde ilk çatlak oluşumu 61.5 kN yük düzeyinde ve yerdeğiştirmenin 2.0 mm olduğu anda gerçekteşmiş olup brüt kesit rijitliği 30.767 MPa olarak hesaplanmıştır.



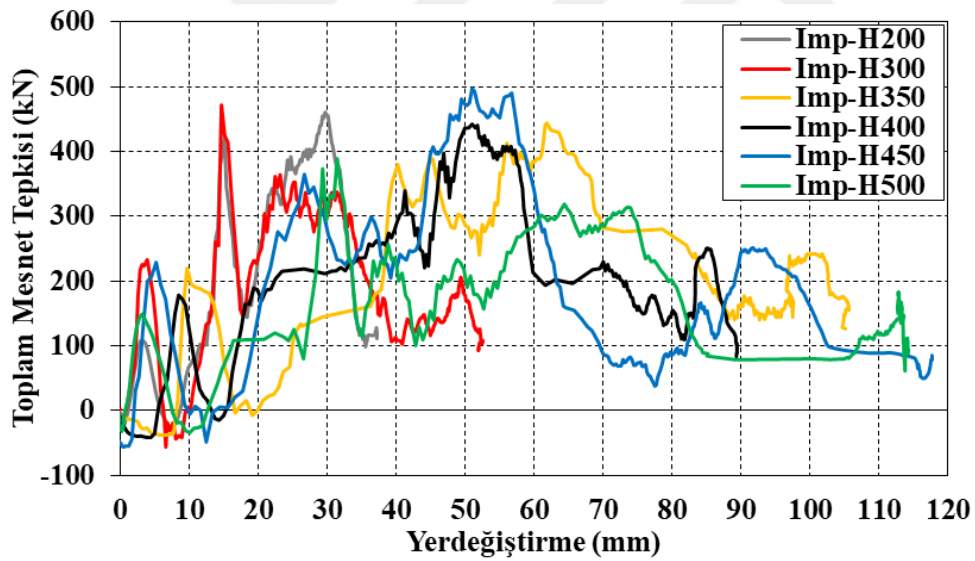
Şekil 5.14 : Rijitlik değişimi.

Numunelerde plastik şekildeğıştirmelerin başladığı nokta ile bu noktaya karşı gelen yerdeğıştirme oranlanarak sekant rijitlikleri elde edilmiştir. Çizelge 5.2’de özetlenen sonuçlara göre darbe yüksekliği arttıkça sekant rijitliği önemli ölçüde azalmıştır.

Çizelge 5.2 : Sekant rijitlik değeri.

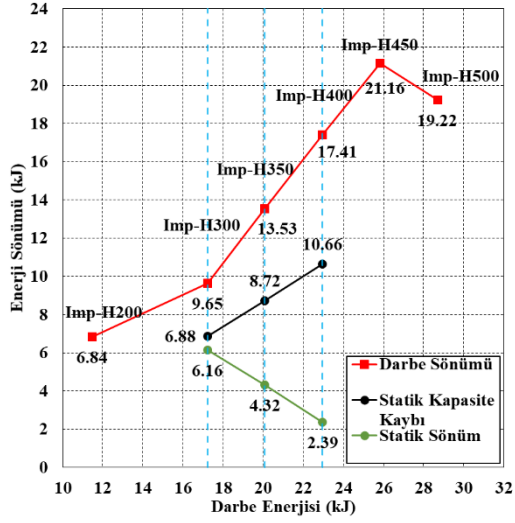
Numune	EI_{sta} veya EI_{res} (MPa)	EI_{res}/EI_{sta}
Statik	15.516	-
Imp-H300-Res	8.619	55.55%
Imp-H350-Res	7.916	51.02%
Imp-H400-Res	5.912	38.10%

Darbe etkisi altındaki numunelerde enerji sönümünün karşılaştırılması amacıyla toplam mesnet tepkisi, yerdeğıştirme ilişkisi Şekil 5.15’te verilmiştir. Grafiklerin altında kalan alanların hesaplanmasıyla darbe durumunda sönümlenen enerji hesaplanmaktadır. Benzer şekilde Şekil 5.13 altında kalan alanların hesaplanmasıyla statik yükleme altında sönümlenen enerji bulunabilir.

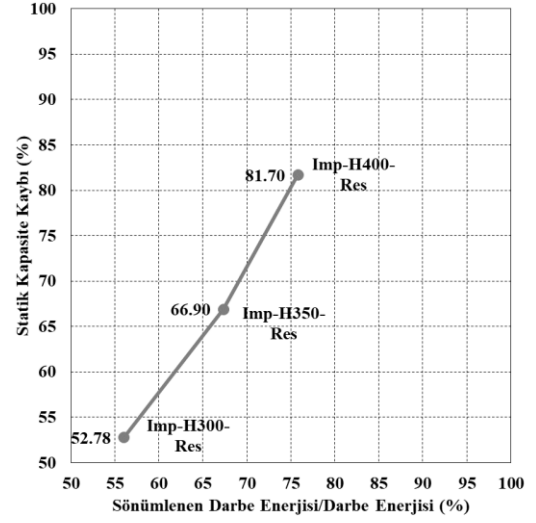


Şekil 5.15 : Darbe etkisi altındaki numunelere ait toplam mesnet tepkisi-yerdeğıştirme ilişkisi.

Darbe etkisi altında Imp-H300, Imp-H350 ve Imp-H400 numunelerinde sırasıyla 9.65, 13.53 ve 17.41 kJ enerjinin absorbe edildiği hesaplanmıştır. Artık kapasite deneylerinde ise bu değeri sırasıyla 6.16, 4.32 ve 2.39 kJ olarak bulunmuştur (Şekil 5.16a). Darbe sonrası Imp-H400-Res numunesi, statik numuneye kıyasla enerji sönüm kapasitesinin %81.70’ini kaybederken, Imp-H350-Res ve Imp-H300-Res numunelerinde bu değeri sırasıyla %66.90 ve %52.78 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 5.16b).



(a)



(b)

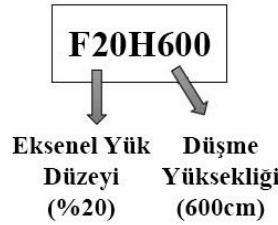
Şekil 5.16 : (a) Enerji sönümünün karşılaştırılması, (b) statik kapasite kaybı.



6. EKSENEL YÜK DÜZEYİNİN DARBE DAVRANIŞINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

6.1 Giriş

Tez çalışması kapsamında betonarme kolonlara uygulanan eksenel yük oranının darbe davranışına etkisinin araştırılması amacıyla sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu sonlu eleman modellerinin dinamik analizleri yapılarak darbe etkisine maruz kolonlardaki eksenel yük oranının hasar modları, yerdeğiştirmeler, mesnet tepkileri ve donatı birim şekildeğiştirmeleri üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında eksenel yüksüz, %10, %20, %30, %40 ve %50 eksenel yük oranına sahip kolonların darbe etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Deneysel olarak davranışı incelenen betonarme kolonlarla aynı boyuta ve malzeme özelliklerine sahip modellere ait adlandırma Şekil 6.1’de, sayısal çalışmaya ait test matrisi ise Çizelge 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1 : Sonlu eleman modellerinin isimlendirilmesi.

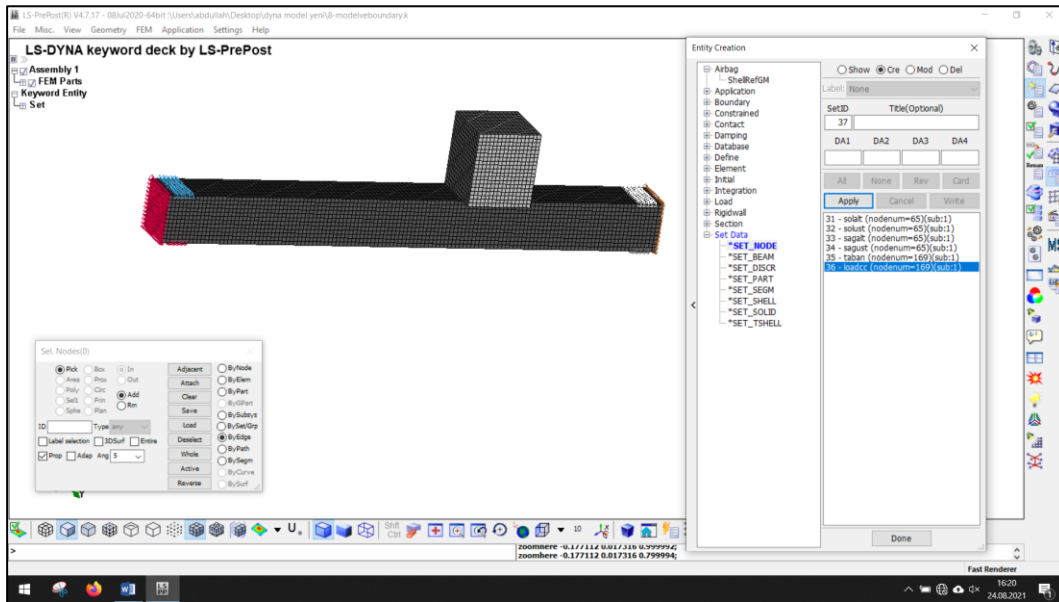
Çizelge 6.1 : Sayısal çalışmaya ait deney matrisi.

Darbe Yüksekliği (cm)	Eksenel Yük Oranı					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
200	F0H200	F10H200	F20H200	F30H200	F40H200	F50H200
250	F0H250	F10H250	F20H250	F30H250	F40H250	F50H250
300	F0H300	F10H300	F20H300	F30H300	-	-
350	F0H350	F10H350	F20H350	F30H350	-	-
400	F0H400	F10H400	F20H400	F30H400	-	-
450	F0H450	F10H450	F20H450	-	-	-
500	F0H500	F10H500	-	-	-	-
550	F0H550	F10H550	-	-	-	-
600	F0H600	F10H600	-	-	-	-

6.2 Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar modeli Ansys LS-DYNA (2019, 2021) yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. LS-DYNA yazılımının seçiminde içeriğinde yükleme hızını göz önünde bulunduran malzeme modellerinin bulunması, malzemelerin birbiriyle temas yüzeylerinin tanımlanabilmesi ve seçili bölgelerden eş zamanlı olarak yük, yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme gibi verilerin alınabilmesi önemli rol oynamıştır.

Kolonun geometrik modeli oluşturulurken beton malzeme ve darbe ağırlığı Solid elemanlar olarak 25x25x25 mm ağlara bölünmüş, donatılar ise Kiriş elemanlar olarak modellenip 25 mm uzunluğunda ağlara bölünmüştür. Mesnetlerin modellenmesi, eksenel yükün uygulanması ve malzeme modellerinin seçiminde yazılımın hesaplama zamanı göz önünde bulundurularak bazı basitleştirmeler yapılmıştır. Sınır koşulları, mesnet bölgelerinde tanımlanan düğüm noktaları aracılığıyla oluşturulmuştur. Sabit eksenel yük doğu mesnet dölgesinde yük olarak tanımlanmıştır. Donatılar plastisite ve yükleme hızı göz önünde bulundurularak programda tanımlı Mat-003-Plastic_Kinematic, darbe ağırlığı Mat-020-Rigid beton ise yükleme hızı göz önüne alınarak Mat-159-Cscm_Concrete ile, beton ile donatı arasındaki temas arayüzü Constrained-Lagrange_in_Solid ile tanımlanmıştır. Darbe ağırlığı ile betonarme kolon arasındaki temas yüzeyi ise Automatic-Surface_to_Surface ile tanımlanmıştır (Şekil 6.2).

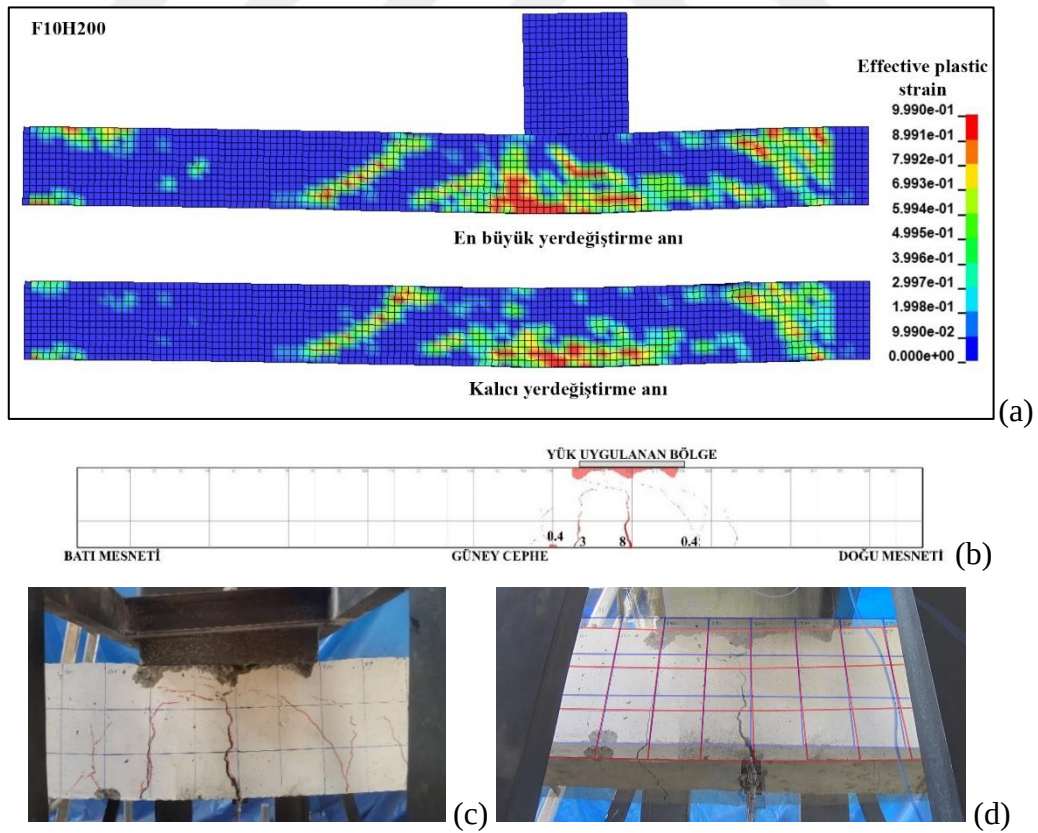


Şekil 6.2 : Sonlu eleman modelinin kurulumu.

6.3 Kurulan Sonlu Eleman Modelinin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

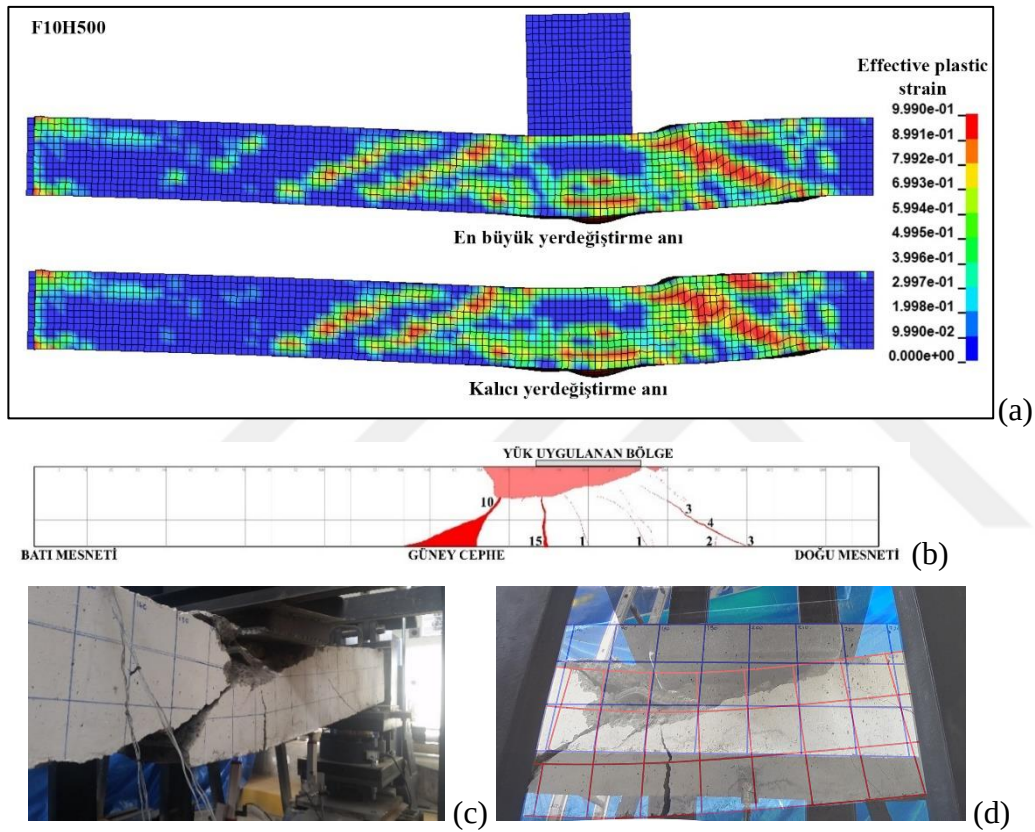
Kurulan sonlu eleman modelinin test edilmesi amacıyla deneysel çalışma sonuçları sayısal sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmada hasar şekilleri, donatılardaki birim şekildegıştirme durumları, yerdegıştirmeler ve mesnet reaksiyonları göz önüne alınmıştır. Bu alt bölümde Imp-H200 ve Imp-H500 numunelerine ait sonuçlarla ilgili detaylı kıyaslamalar yapılmıştır. Tüm numunelere ait kıyaslamalar ve hata oranları bölüm sonunda verilmiştir.

F10H200 sayısal modeli ve Imp-H200 deney numunesi deneysel sonuçlarına ait, sonlu eleman analizi sonucunda ortaya çıkan gerilme durumları, deney sonucu çatlak çizimleri, kalıcı hasarlar ve hasar gelişimi Şekil 6.3'te verilmiştir. Sonlu eleman analizi sonucunda darbe uygulanan bölgenin altında ve darbe ağırlığı temas yüzeyinde oluşan gerilmelerle (Şekil 6.3a), çatlak oluşumlarının (Şekil 6.3b,c,d) oldukça benzer olduğu görülmüştür. Sonlu eleman modelinde en büyük yerdegıştirme anında görülen kesme gerilmelerinin kalıcı yerdegıştirme anında azaldığı görülmektedir. Imp-H200 numunesinde 1 mm'den büyük kesme çatlacağına rastlanmamıştır.



Şekil 6.3 : (a) F10H200 numunesine ait gerilme durumları, (b) Imp-H200 numunesine ait çatlak çizimleri, (c) Imp-H200 numunesine ait kalıcı hasar durumu, (d) Imp-H200 numunesine ait hasar gelişimi.

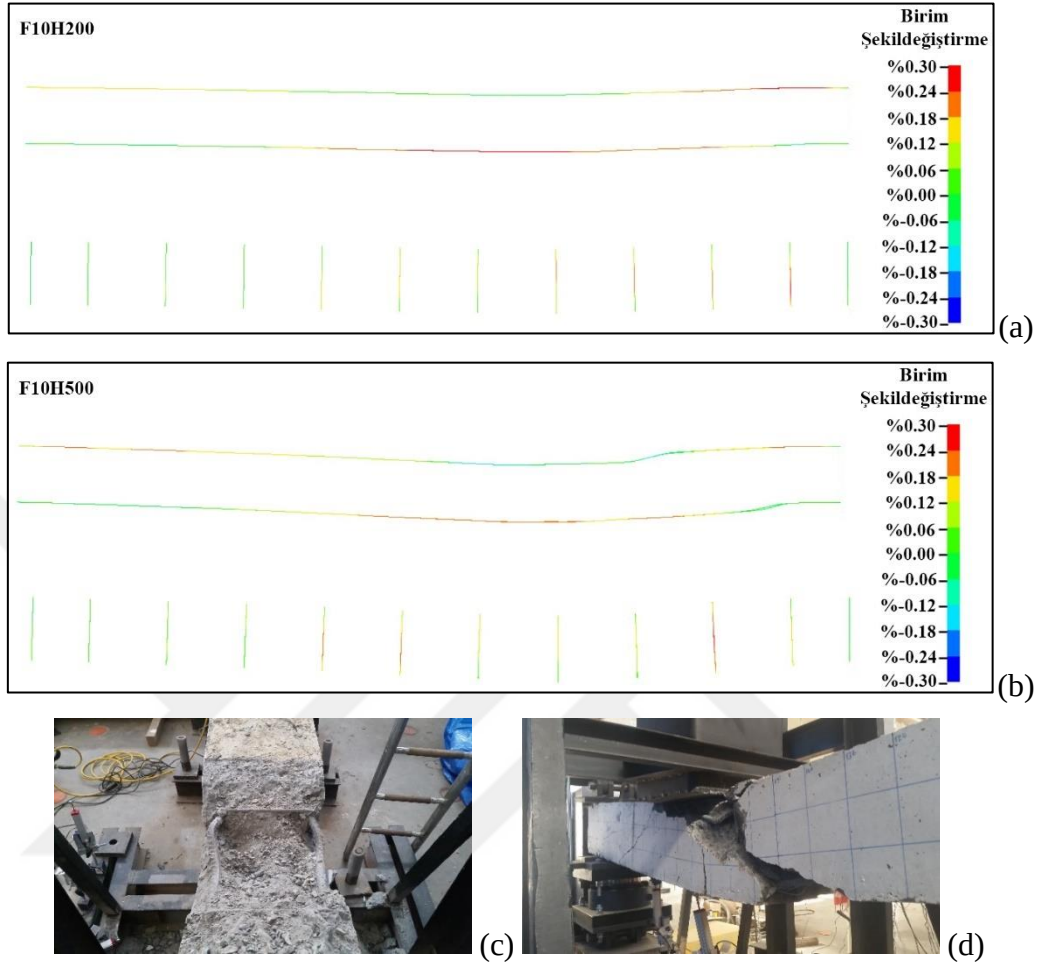
F10H500 sonlu eleman modelinde darbe yüzeyinin her iki kenarından başlayarak numune altına doğru 45 derece uzanan büyük gerilmeler elde edilmiştir. Analiz sonucu numunede en büyük hasar mesnete yakın kenarda kesme davranışı şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 6.4a). Deneysel çalışmada, Imp-H500 numunesinde, sayısal analizde görülen gerilmelere benzer kesme çatlaklarının oluştuğu (Şekil 6.4b, c, d), ancak göçmenin diğer mesnet tarafında kesme göçmesi şeklinde gerçekleştiği saptanmıştır. Hem F10H200 hem de F10H500 sayısal modelinde deneysel çalışma ile bulunan hasar şekillerine benzer gerilme dağılımlarının elde edildiği görülmüştür.



Şekil 6.4 : (a) F10H500 numunesine ait gerilme durumları, (b) Imp-H500 numunesine ait çatlak çizimleri, (c) Imp-H500 numunesine ait kalıcı hasar durumu, (d) Imp-H500 numunesine ait hasar gelişimi.

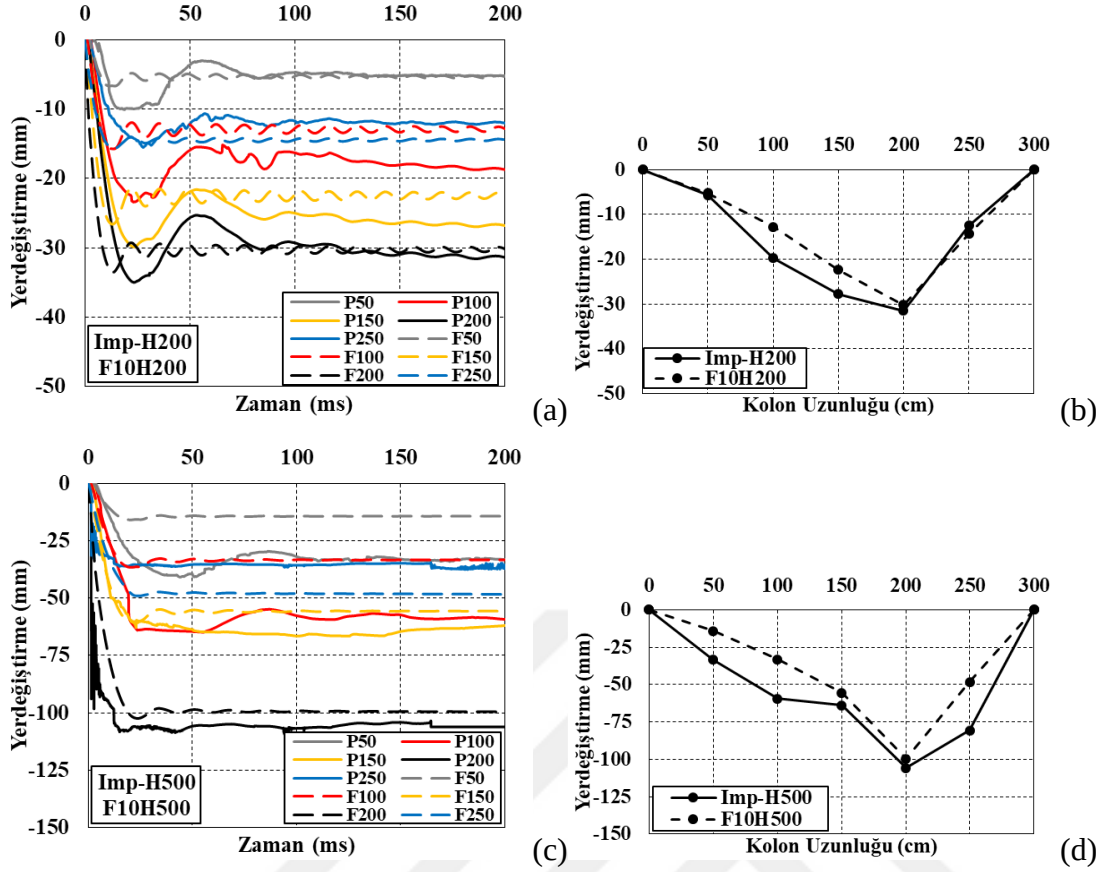
F10H200 ve F10H500 modellerinde en büyük yerdeğiştirme anında donatılarda oluşan birim şekildeğiştirmeler incelendiğinde deneysel sonuçlara benzer şekilde darbe uygulanan bölge altında kalan donatılarda akma gözlenmiş, F10H500 numunesinde etriyelerde büyük birim şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 4.9, 4.34, 6.4). Imp-H500 numunesine benzer şekilde F10H500 sayısal modelinde de darbe uygulanan bölgeye yakın bölgede boyuna donatılarda burkulma görülmüştür (Şekil 6.5b, c, d).

F10H200 ve F10H500 sayısal modellerindeki donatı birim şekildeğiştirme sonuçları ile deneysel sonuçların birbirine oldukça benzer olduğu görülmüştür.



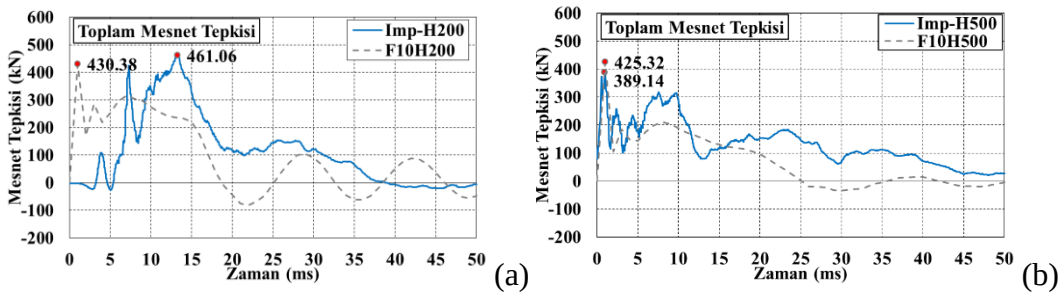
Şekil 6.5 : (a) F10H200 numunesine ait donatı gerilme durumları, (b) F10H500 numunesine ait donatı gerilme durumları, (c)-(d) Imp-H500 numunesine ait boyuna donatı burkulmaları.

Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi incelendiğinde, darbe uygulanan bölge altında yer alan potansiyometrelerde (P200) Imp-H200 numunesinde maksimum 35.0 mm ve deney sonunda ise 31.5 mm yerdeğiştirme ölçümü yapılmıştır. Sonlu eleman analizinde ise F10H200 sayısal modelinde bu değerler sırasıyla 33.5 mm ve 30.2 mm olarak ölçülmüştür. Ölçüm alınan diğer potansiyometrelerde de benzer yakınlıkta değerler elde edilmiştir (Şekil 6.6 a, b). Imp-H500 numunesinde ise P200 potansiyometresinde maksimum 107.0 mm ve deney sonunda 105.7 mm yerdeğiştirme ölçümü yapılmıştır. Bu değerler F10H500 sayısal modelinde sırasıyla 102.4 mm ve 99.7 mm olarak ölçülmüştür. Ölçüm alınan diğer noktalarda da benzer yakınlıkta değerler elde edilmiştir. (Şekil 6.6 c, d).



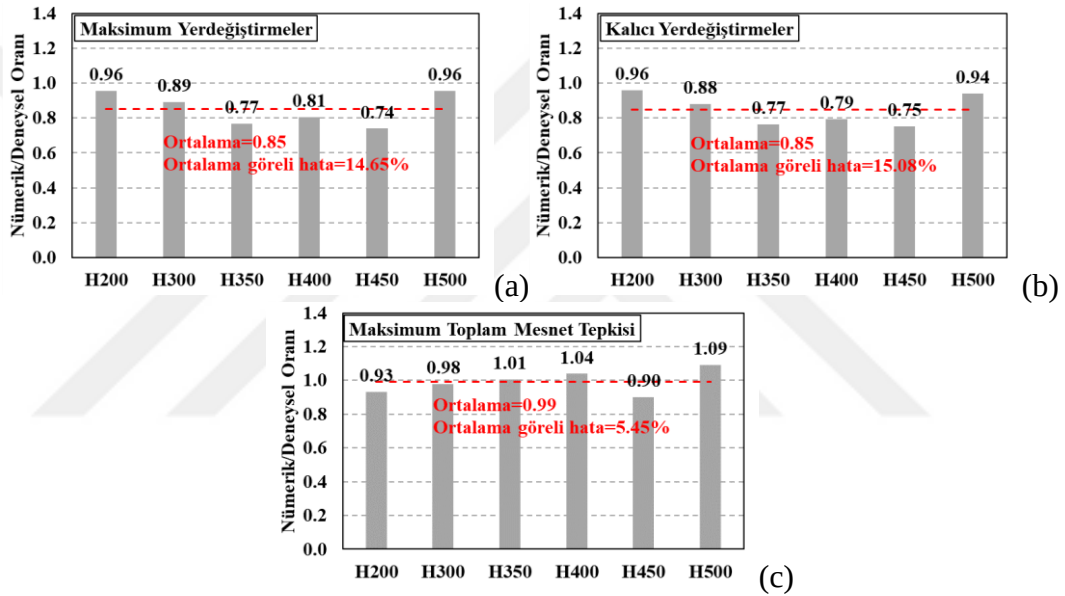
Şekil 6.6 : H200 numunesine ait (a) yerdeğiştirme zaman grafiği, (b) kolon boyunca kalıcı yerdeğiştirmeler, H500 numunesine ait (c) yerdeğiştirme zaman grafiği, (d) kolon boyunca kalıcı yerdeğiştirmeler.

Toplam mesnet tepkilerinin zamanla değişimi incelendiğinde, Imp-H200 numunesinde yaklaşık 14 ms anında 461 kN bulunan maksimum toplam mesnet tepkisi, F10H200 sayısal modeline ait analizde 2 ms anında 430 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 6.7a). Yine Imp-H500 numunesinde 2 ms anında 389 kN bulunan bu değer F10H500 numunesinde 425 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 6.7b). Deneysel çalışma ile sayısal sonuçlar kıyaslandığında, maksimum toplam mesnet reaksiyonlarının kabul edilebilir ölçüde birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 6.7 : Toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi (a) H200 numunesi, (b) H500 numunesi.

Sonlu eleman modellerinde elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin deneysel sonuçlarla ortalama %85 oranında uyuştuğu, aynı oranın kalıcı yerdeğiştirmelerde de elde edildiği saptanmıştır. Maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmeler için sonlu eleman modellerinde elde edilen sonuçların ortalama görelı hata oranı yaklaşık olarak %15 bulunmuştur. Maksimum toplam mesnet reaksiyonlarının deneysel sonuçlarla ortalama %99 oranında benzeştiği, mesnet reaksiyonları için sonlu eleman modelleri sonuçlarındaki ortalama görelı hata oranının yaklaşık olarak %5 civarında olduğu hesaplanmıştır (şekil 6.8). Deneysel sonuçlar ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında, donatılarda meydana gelen akma ve burkulma durumları neredeyse birbiriyle tamamen uyumludur (Çizelge 6.2).



şekil 6.8 : Deneysel ve sayısal çalışmaya ait ortalama değler ve ortalama görelı hata oranları (a) maksimum yerdeğiştirmeler, (b) kalıcı yerdeğiştirmeler, (c) maksimum toplam mesnet tepkileri.

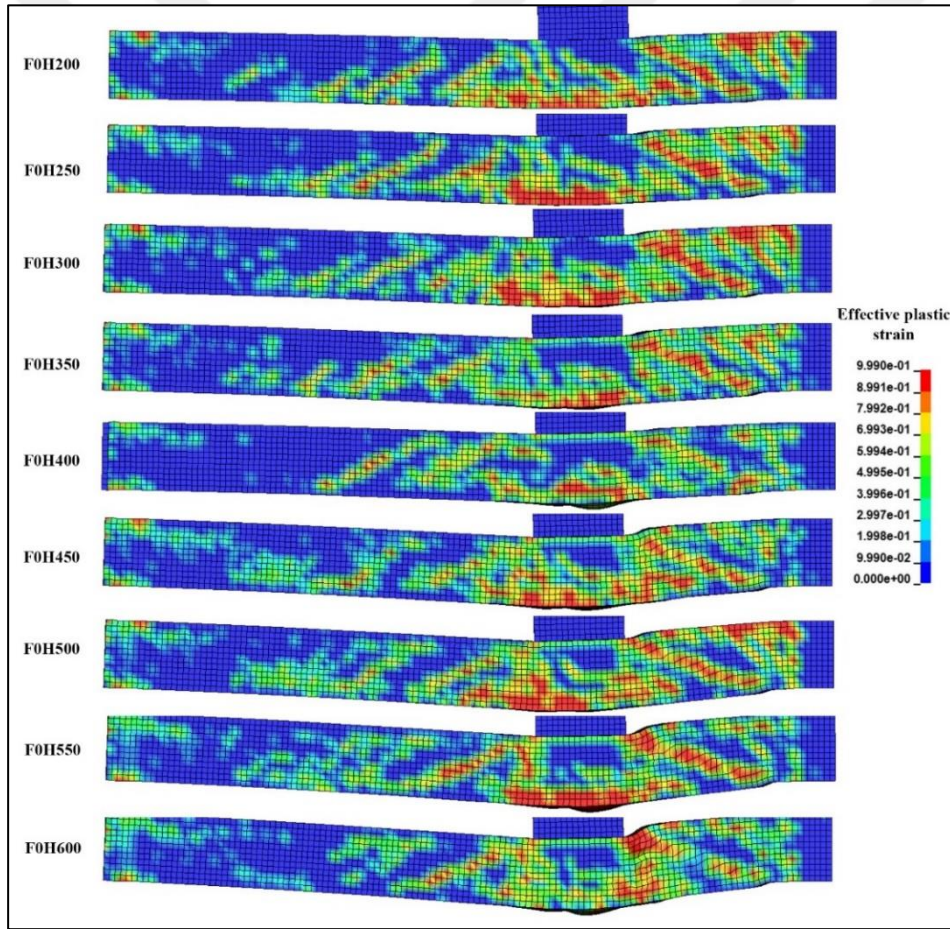
Çizelge 6.2 : Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune	Maks. Toplam Mesnet Tepkisi (kN)	Maks. Yerdeğiştirme (mm)	Kalıcı Yerdeğiştirme (mm)	Boyuna Donatı		Enine Donatı
				Akma	Burkulma	
Imp-H200	461	35.0	31.5	+	-	-
F10H200	430	33.5	30.2	+	-	+
Imp-H300	472	61.0	59.6	+	-	+
F10H300	461	54.5	52.5	+	-	+
Imp-H350	444	78.5	78.4	+	-	+
F10H350	447	60.3	60.0	+	+	+
Imp-H400	442	102.0	100.1	+	+	+
F10H400	459	82.2	79.5	+	+	+
Imp-H450	498	111.0	105.5	+	+	+
F10H450	449	82.1	79.5	+	+	+
Imp-H500	389	107.0	105.7	+	+	+
F10H500	425	102.4	99.6	+	+	+

6.4 Eksenel Yük Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

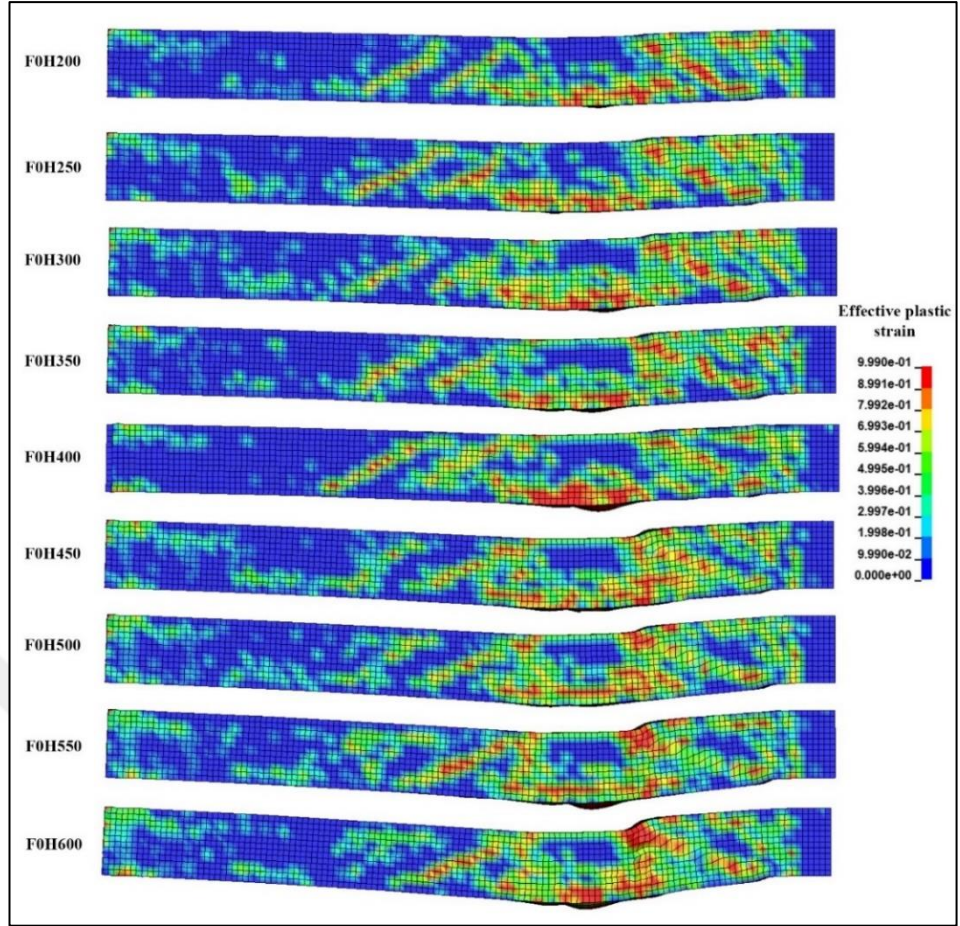
6.4.1 Eksenel yükün bulunmadığı (%0) duruma ait sonlu eleman analizleri

Eksenel yükün bulunmadığı betonarme kolonlar üzerinde, farklı yüksekliklerden darbe ağırlığının düşürülmesiyle meydana gelen hasar şekilleri araştırılmıştır. 200 cm ila 600 cm yükseklikten (50 cm yükseklik artımıyla) darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Şekil 6.9 incelendiğinde, maksimum yerdeğiştirme anında tüm yükseklikler için kesme ve eğilme çatlaklarının oluştuğu, F0H450 numunesinden başlayarak yükseklik artışıyla birlikte kesitte burkulma meydana geldiği gözlenmiştir.



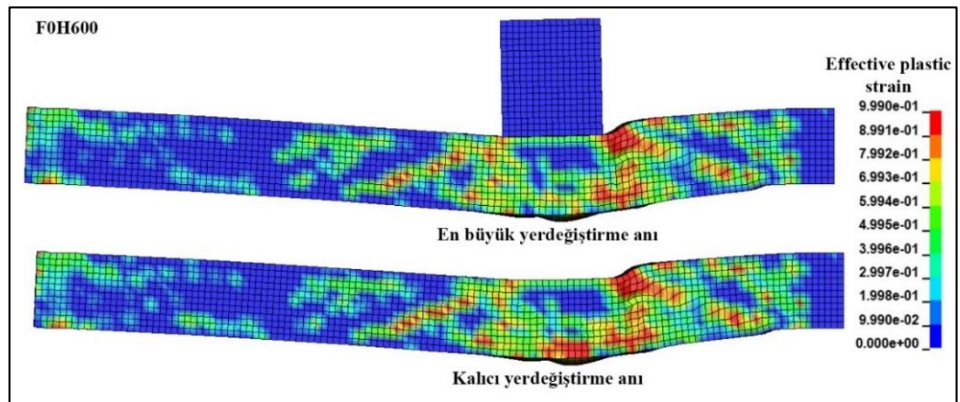
Şekil 6.9 : F0 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları.

Kalıcı yerdeğiştirme durumunu gösteren Şekil 6.10 incelendiğinde, F0H200'den başlayarak F0H400 numunesine kadar eğilme çatlaklarının arttığı, F0H450 numunesinden başlayarak yükseklik artışıyla birlikte kesitte burkulmayla birlikte kesme davranışının doğu mesnetine doğru arttığı görülmüştür.



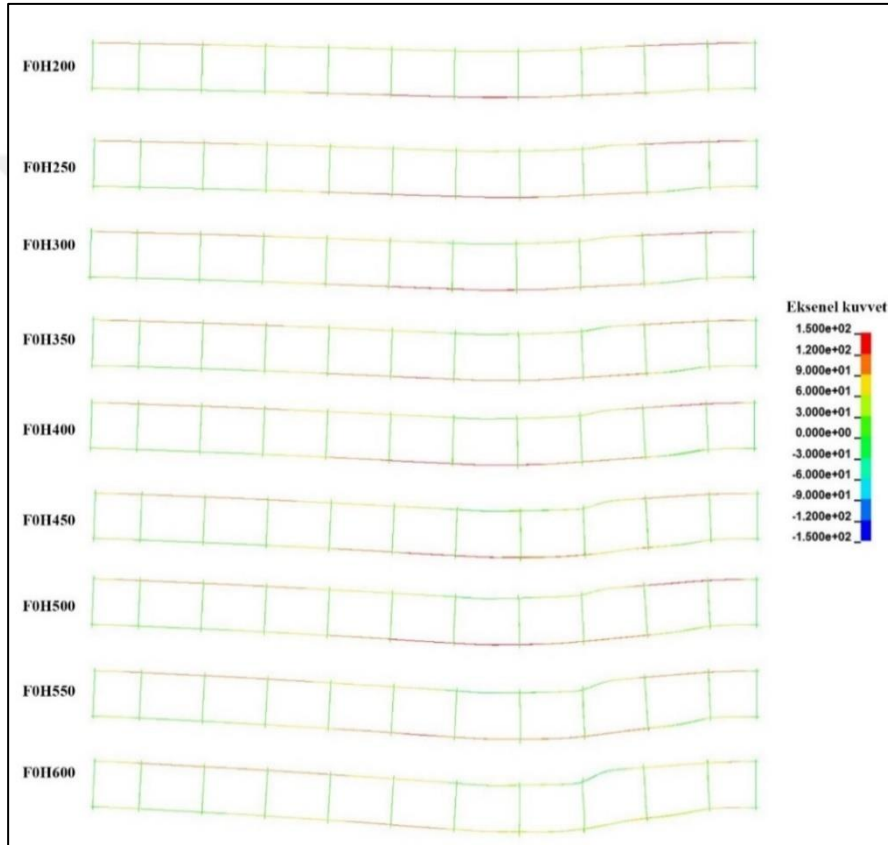
Şekil 6.10 : F0 serisine ait kalıcı yerdeğiştirme anında gerilme durumları.

600 cm yükseklikten darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Darbe ağırlığının her iki kenarından başlayarak mesnetlere doğru uzanan kesme hasarları gözlenmiştir. F0H600 numunesi darbe yükü altında göçme durumuna ulaşmıştır.

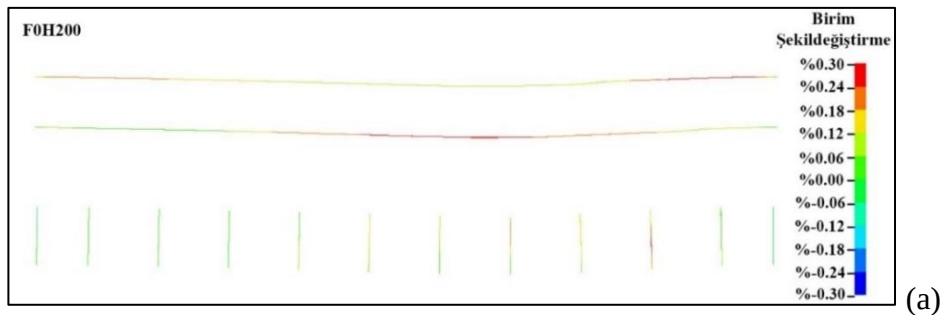


Şekil 6.11 : F0H600 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki ve T=200 ms anındaki gerilme durumları.

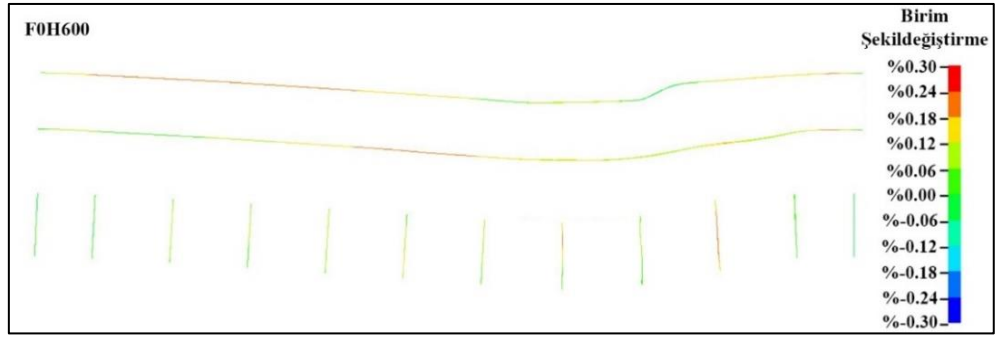
Maksimum yerdeğiştirme anında donatılarda oluşan iç kuvvetler şekil 6.12’de verilmiştir. F0H200 numunesinde alt donatılarda akma meydana gelirken, üşt donatıların mesnete yakın kısımlarında akma oluşmuştur. Yine darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerden birinde akma meydana gelmiştir (şekil 6.13a). Göçme durumunu temsil eden F0H600 numunesinde alt ve üşt donatılarda akma meydana gelirken, doğu mesnetine yakın konumda bulunan üşt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana geldiği görölmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (şekil 6.13b).



şekil 6.12 : F0 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki donatılarda oluşan iç kuvvetler.



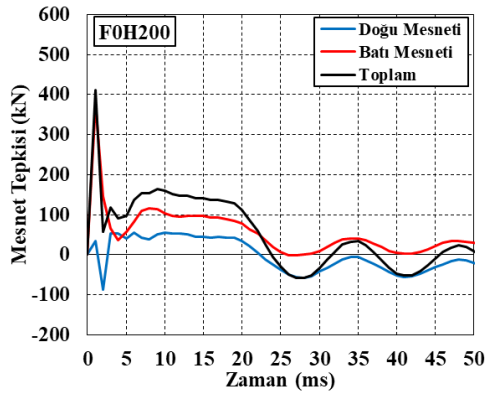
şekil 6.13 : (a) F0H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler, (b) F0H600 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.



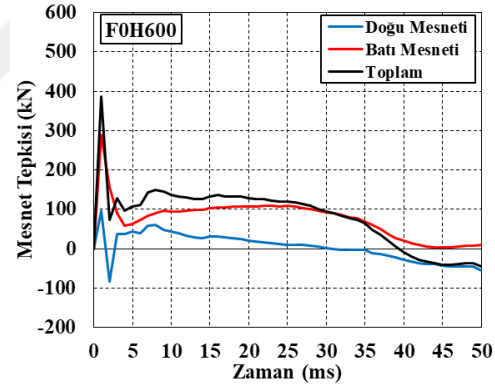
(b)

Şekil 6.13 (devamı) : (a) F0H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler, (b) F0H600 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.

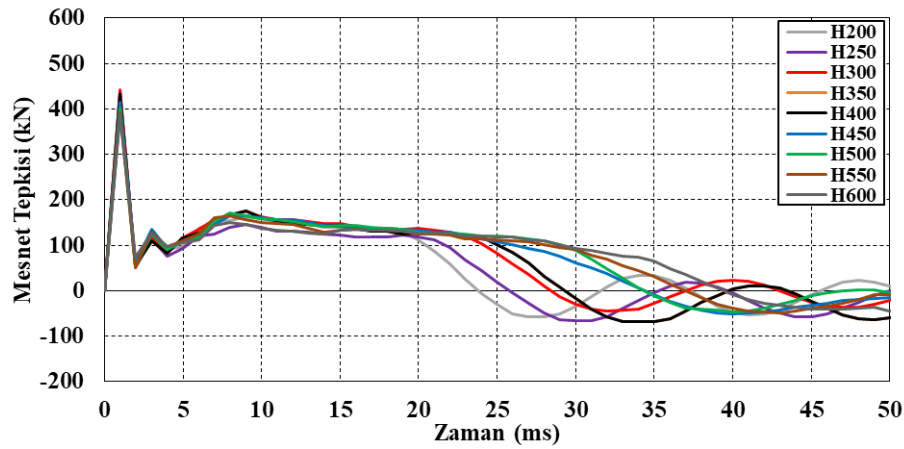
Mesnet tepkilerinin zamanla değişimi Şekil 6.14'te gösterilmiştir. Yükseklik artışıyla birlikte batı mesnetinde maksimum mesnet tepkisi artarken, doğu mesnetinde azalmıştır. Toplam maksimum mesnet tepkisi en yüksek değere F0H300 (442.0 kN) numunesinde ulaşırken, F0H600 numunesinde en düşük değer elde edilmiştir (386.3 kN).



(a)



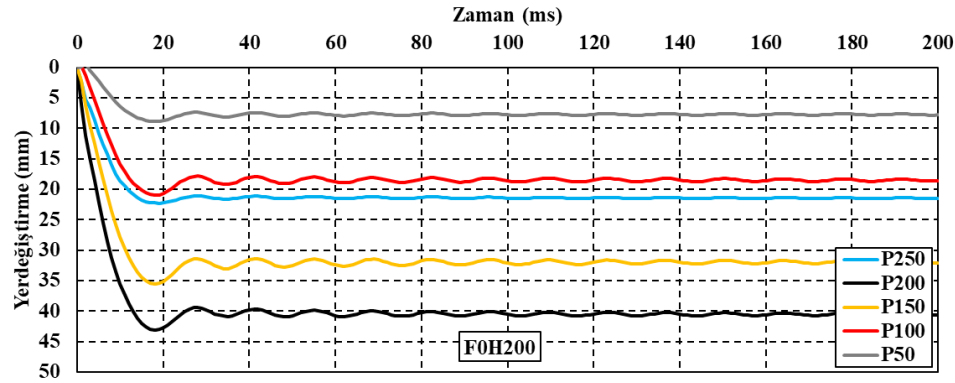
(b)



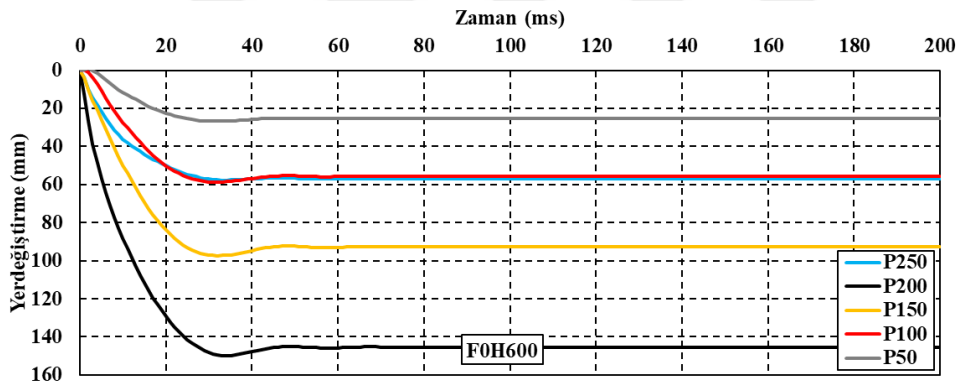
(c)

Şekil 6.14 : Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F0H200 numunesi, (b) F0H600 numunesi, (c) F0 serisi karşılaştırması.

Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi şekil 6.15'te gösterilmiştir. Darbe sonrası F0H200 numunesinde darbe uygulanan bölge altında maksimum 43 mm yerdeğiştirme meydana gelirken, F0H600 numunesinde ise maksimum 150 mm yerdeğiştirme meydana gelmiştir. En büyük kalıcı yerdeğiştirme yine darbe uygulanan bölge altında meydana gelmiştir. F0H600 numunesinde 145 mm, F0H200 numunesinde ise 41 mm kalıcı yerdeğiştirme llmüştir (şekil 6.16).

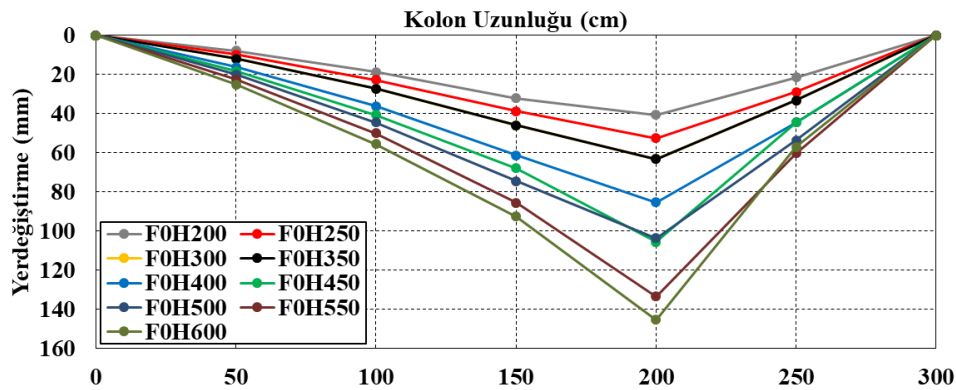


(a)



(b)

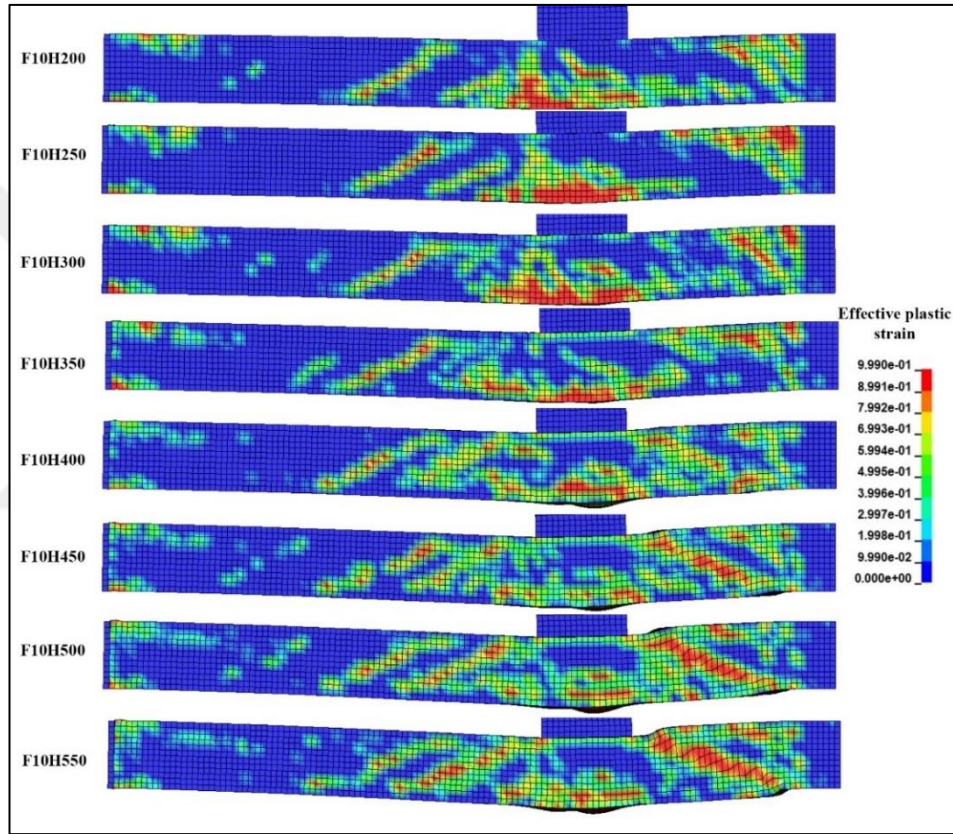
şekil 6.15 : Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F0H200 numunesi, (b) F0H600 numunesi.



şekil 6.16 : F0 serisine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.

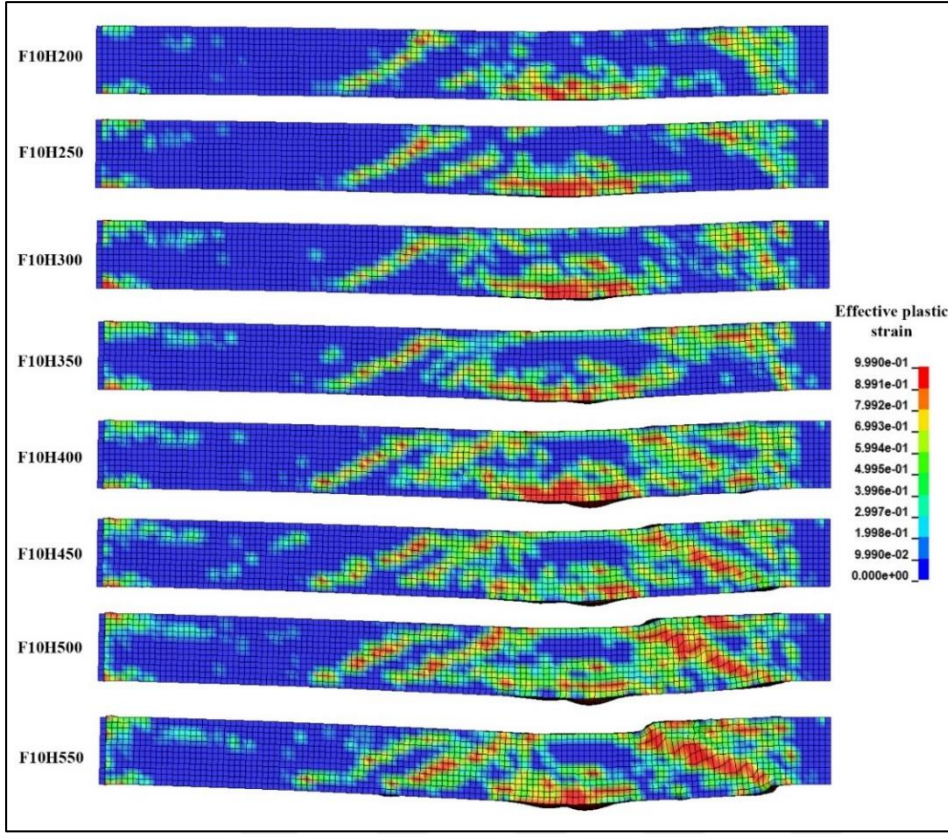
6.4.2 Eksenel yükün %10 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri

Eksenel yükün %10 düzeyinde olduğu (270 kN) betonarme kolonların 200 cm ila 600 cm yükseklikten (50 cm yükseklik artımıyla) darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de gösterilmiştir. Şekil 6.17 incelendiğinde, maksimum yerdeğiştirme anında tüm yükseklikler için kesme ve eğilme çatlaklarının oluştuğu, F10H450 numunesinden başlayarak yükseklik artışıyla birlikte kesitte burkulma meydana geldiği gözlenmiştir.



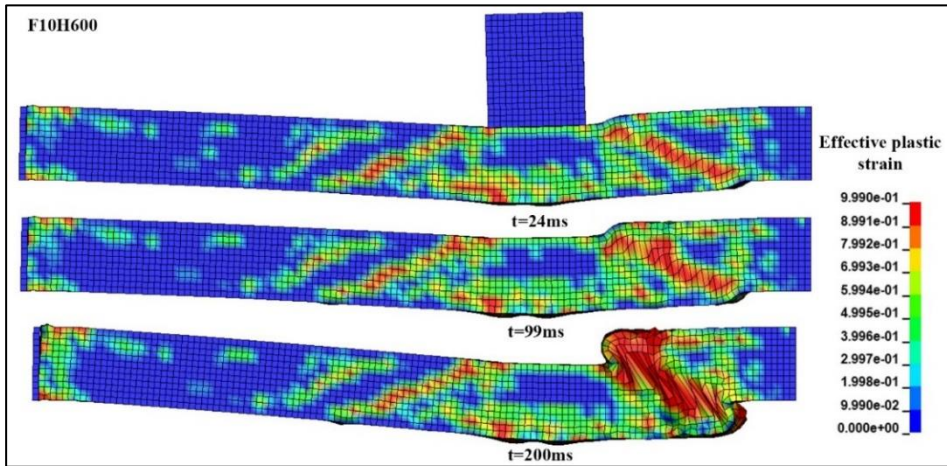
Şekil 6.17 : F10 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları.

Kalıcı yerdeğiştirme durumunu gösteren Şekil 6.18 incelendiğinde, F10H200’den başlayarak F10H400 numunesine kadar eğilme çatlaklarının arttığı, F10H450 numunesinden başlayarak yükseklik artışıyla birlikte kesitte burkulmayla birlikte kesme davranışının doğu mesnetine doğru arttığı görülmüştür.



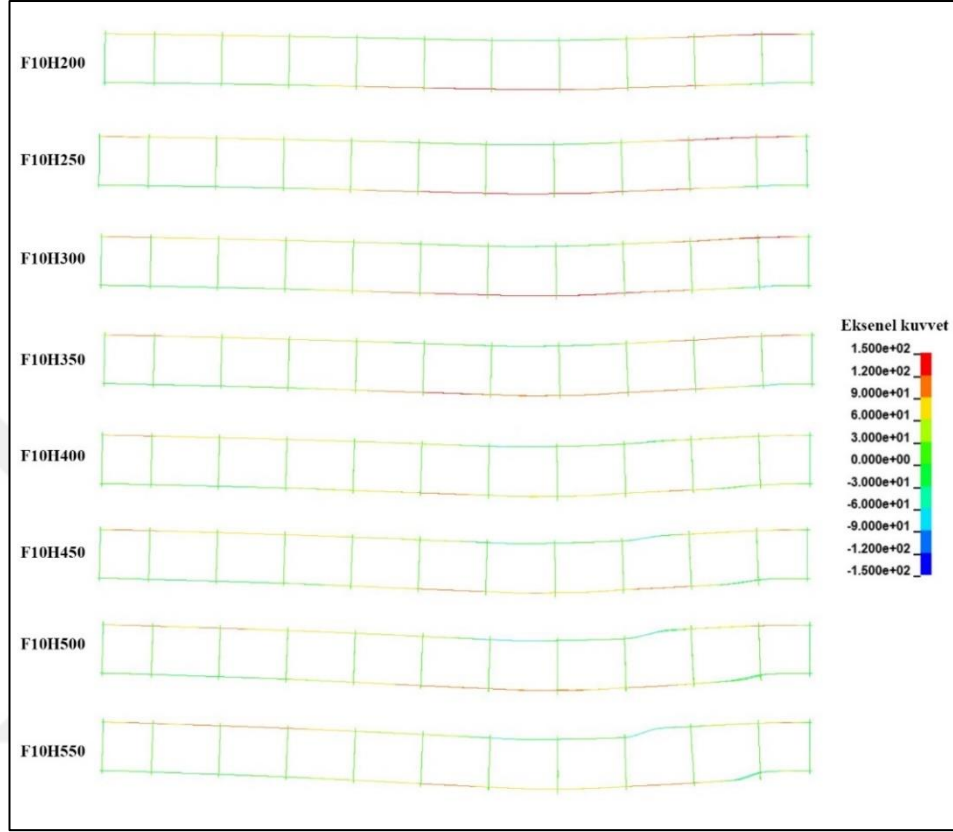
Şekil 6.18 : F10 serisine ait kalıcı yerdeğiştirme anında gerilme durumları.

600 cm yükseklikten darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.19’da gösterilmiştir. Darbe ağırlığının her iki kenarından başlayarak mesnetlere doğru uzanan kesme hasarları gözlenmiştir. F10H600 numunesi darbe yükü altında göçme durumuna ulaşmıştır.

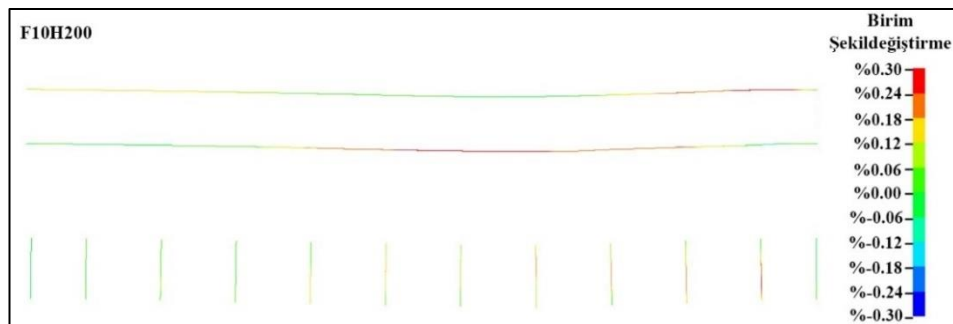


Şekil 6.19 : F10H600 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki ve T=200 ms anındaki gerilme durumları.

Maksimum yerdeğiştirme anında donatılarda oluşan iç kuvvetler şekil 6.20’de verilmiştir. F10H200 numunesinde alt donatılarda akma meydana gelirken, üşt donatıların mesnete yakın kısımlarında akma oluşmuştur. Yine darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (şekil 6.21).



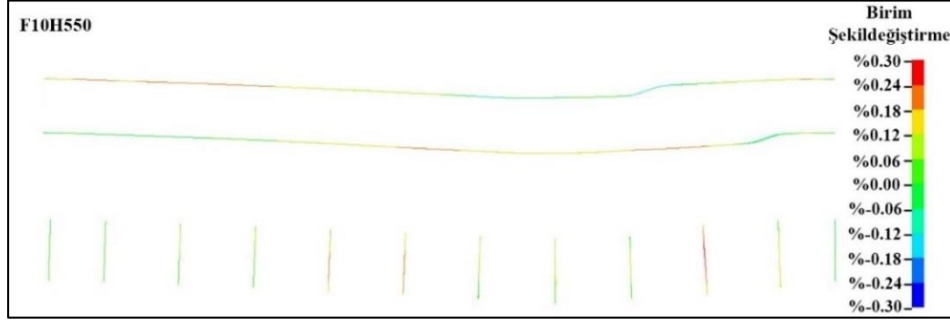
şekil 6.20 : F10 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki donatılarda oluşan iç kuvvetler.



şekil 6.21 : F10H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.

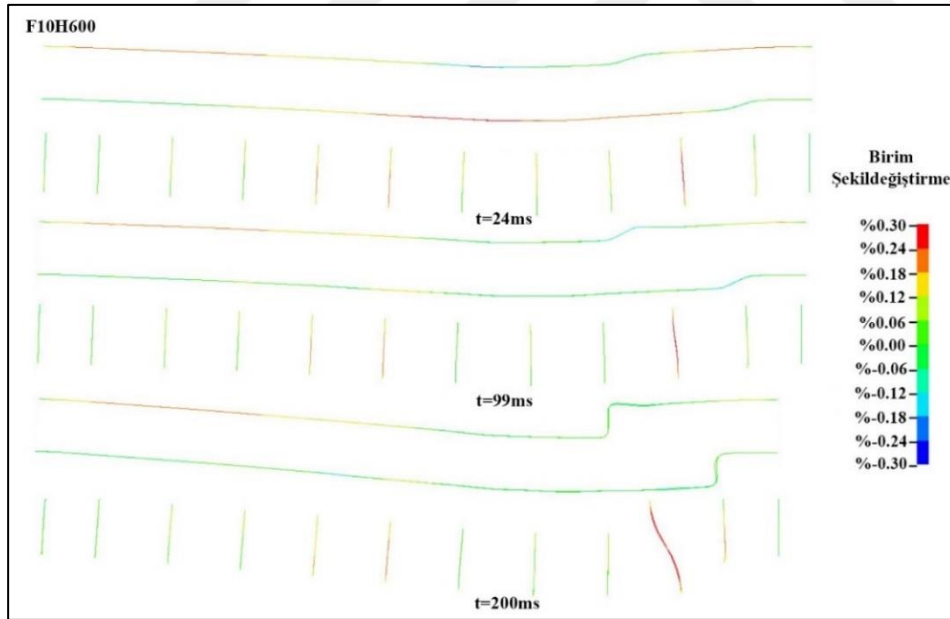
Göçme öncesi durum olan F10H550 numunesinde alt ve üşt donatılarda akma meydana gelirken, darbe ağırlığının doğu mesnetine yakın kenarına yakın üşt ve alt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana

geldiği görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.22).



Şekil 6.22: F10H550 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.

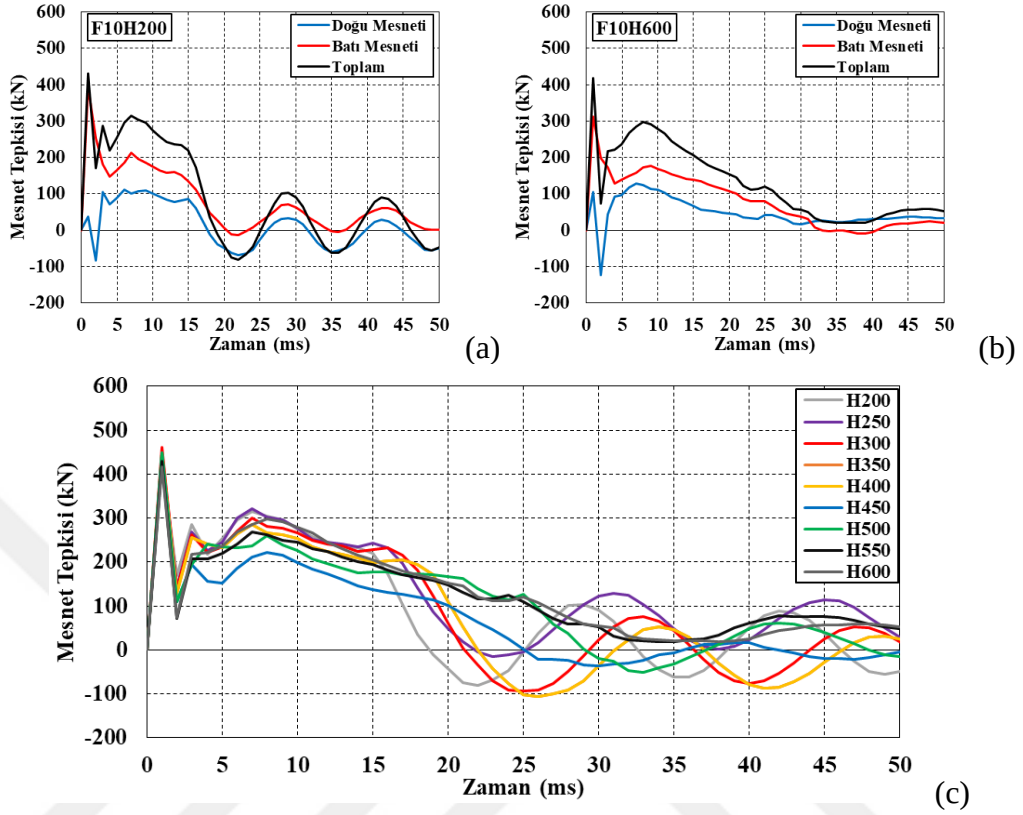
Göçme durumunu temsil eden F10H600 numunesinde alt ve üst donatılarda akma meydana gelirken, darbe ağırlığının doğu mesnetine yakın kenarına yakın üst ve alt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana geldiği görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.23).



Şekil 6.23 : F10H600 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.

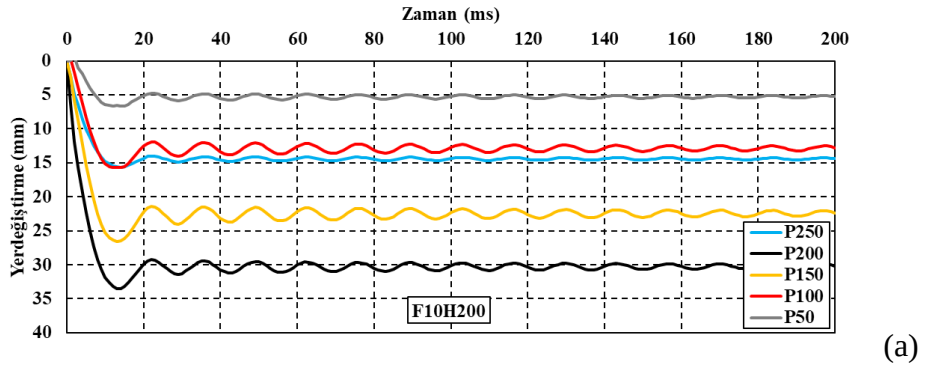
Mesnet tepkilerinin zamanla değişimi Şekil 6.24'te gösterilmiştir. Yükseklik artışıyla birlikte batı mesnetinde maksimum mesnet tepkisi artarken, doğu mesnetinde azalmıştır. Toplam maksimum mesnet tepkisi en yüksek değerine F10H300 (460.8

kN) numunesinde ulaşırken, F10H600 numunesinde en düşük değer elde edilmiştir (417.5 kN).

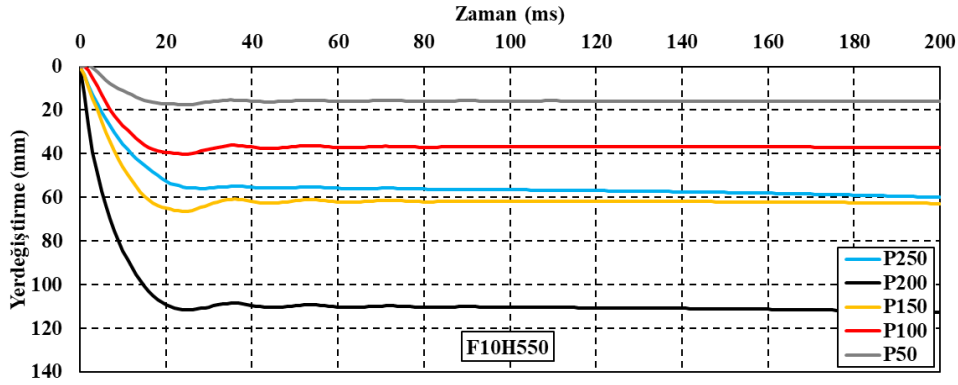


Şekil 6.24 : Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F10H200 numunesi, (b) F10H600 numunesi, (c) F10 serisi karşılaştırması.

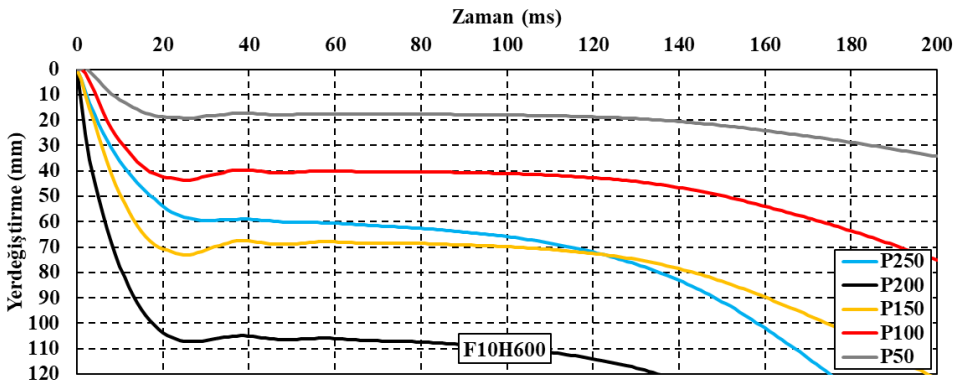
Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.25'te gösterilmiştir. Darbe sonrası F10H200 numunesinde darbe uygulanan bölge altında maksimum 34 mm yerdeğiştirme meydana gelirken, F10H550 numunesinde ise maksimum 113 mm yerdeğiştirme meydana gelmiştir. En büyük kalıcı yerdeğiştirme yine darbe uygulanan bölge altında meydana gelmiştir. F10H550 numunesinde 113 mm, F10H200 numunesinde ise 30 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür (Şekil 6.26).



Şekil 6.25 : Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F10H200 numunesi, (b) F10H550 numunesi, (c) F10H600 numunesi.

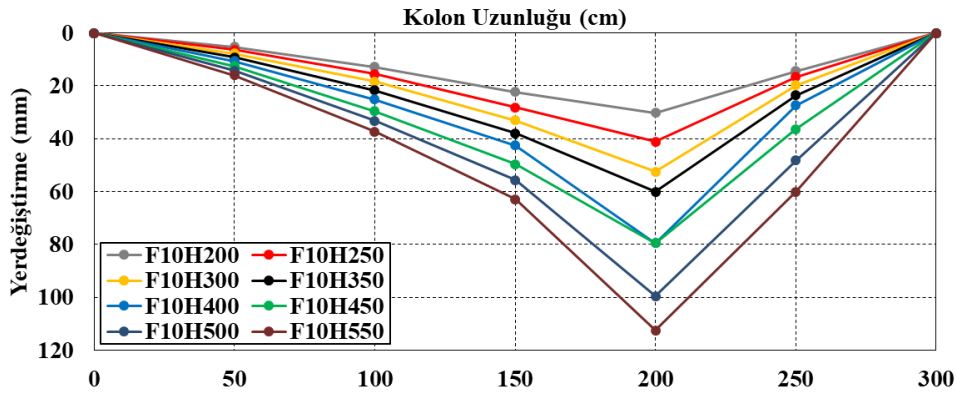


(b)



(c)

Şekil 6.25 (devamı) : Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F10H200 numunesi, (b) F10H550 numunesi, (c) F10H600 numunesi.

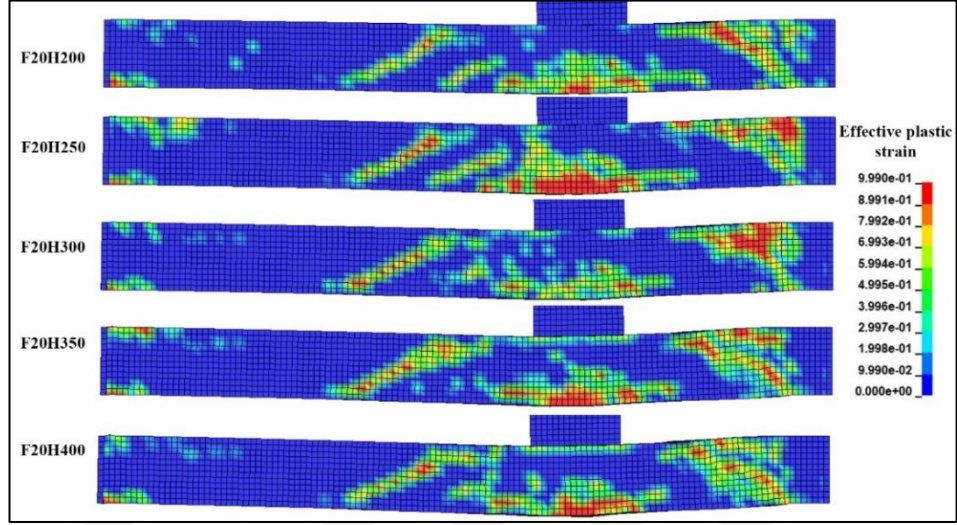


Şekil 6.26 : F10 serisine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.

6.4.3 Eksenel yükün %20 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri

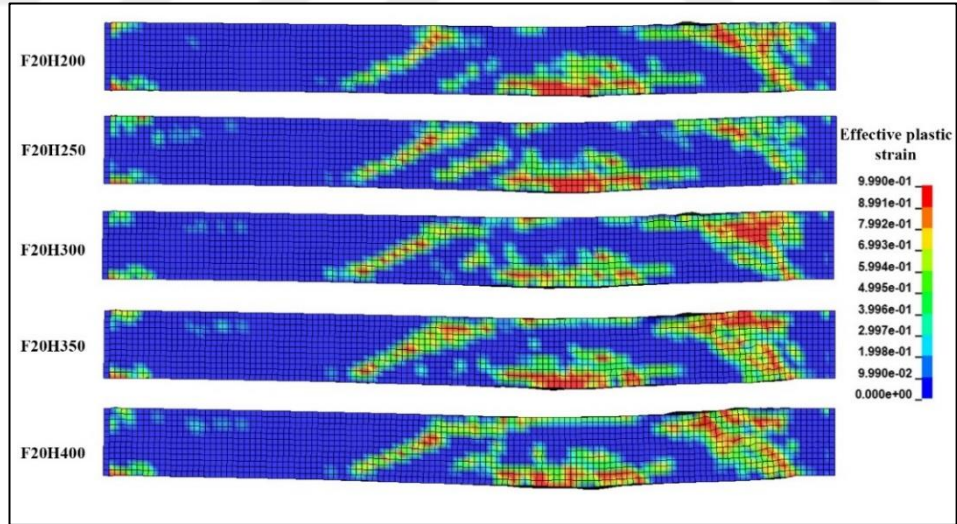
Eksenel yükün %20 düzeyinde olduğu (540 kN) betonarme kolonların 200 cm ila 450 cm yükseklikten (50 cm yükseklik artımıyla) darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de gösterilmiştir. Şekil 6.27 incelendiğinde, maksimum yerdeğiştirme anında tüm yükseklikler için kesme ve eğilme çatlaklarının oluştuğu,

F20H350 numunesinden başlayarak yükseklik artışıyla birlikte kesitte burkulma meydana geldiği gözlenmiştir.



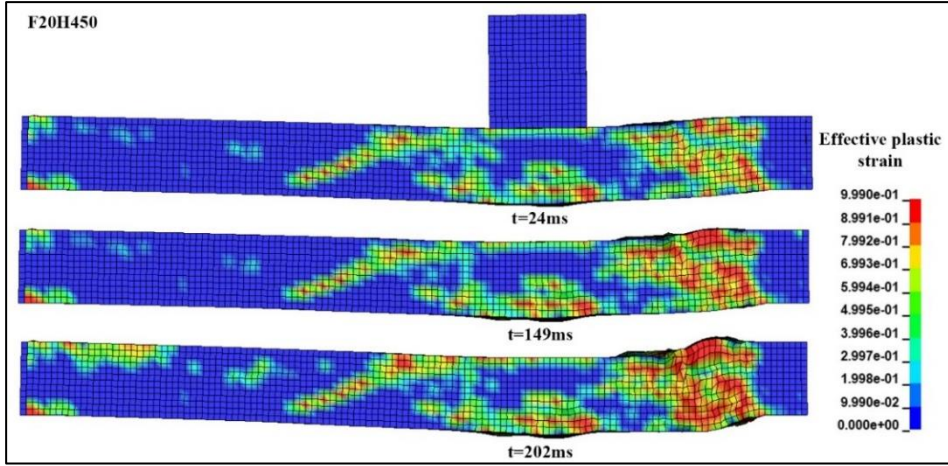
Şekil 6.27 : F20 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları.

Kalıcı yerdeğiştirme durumunu gösteren Şekil 6.28 incelendiğinde, F20H200'den başlayarak F20H300 numunesine kadar eğilme çatlaklarının arttığı, F20H350 numunesinden başlayarak yükseklik artışıyla birlikte kesitte burkulmayla birlikte kesme davranışının doğru mesnetine doğru arttığı görülmüştür.



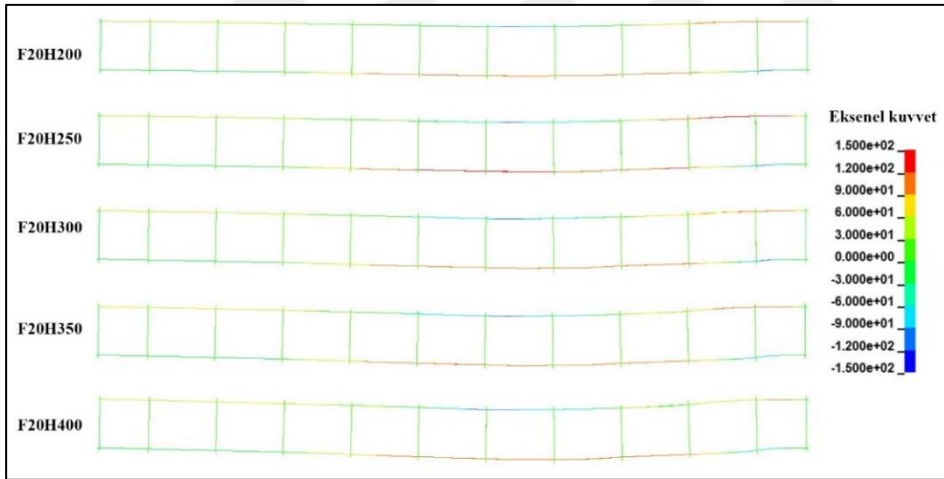
Şekil 6.28 : F20 serisine ait kalıcı yerdeğiştirme anında gerilme durumları.

450 cm yükseklikten darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.29'da gösterilmiştir. Darbe ağırlığının her iki kenarından başlayarak mesnetlere doğru uzanan kesme hasarları gözlenmiştir. F20H450 numunesi darbe yükü altında göçme durumuna ulaşmıştır.

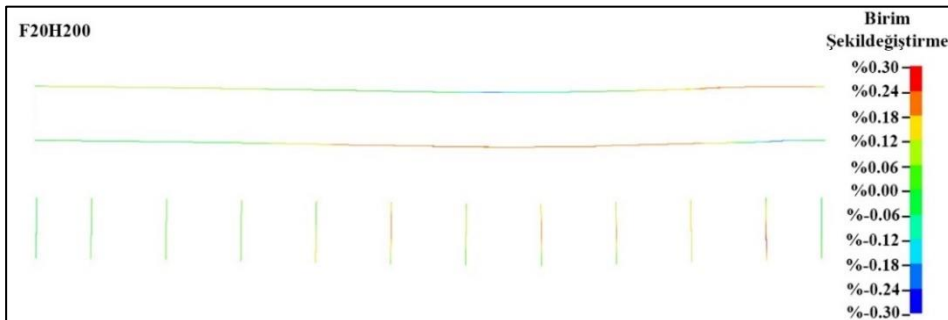


Şekil 6.29 : F20H450 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki ve T=200ms anındaki gerilme durumları.

Maksimum yerdeğiştirme anında donatılarda oluşan iç kuvvetler Şekil 6.30’da verilmiştir. F20H200 numunesinde alt donatılarda akma meydana gelirken, üst donatıların mesnete yakın kısımlarında akma oluşmuştur. Yine darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.31).

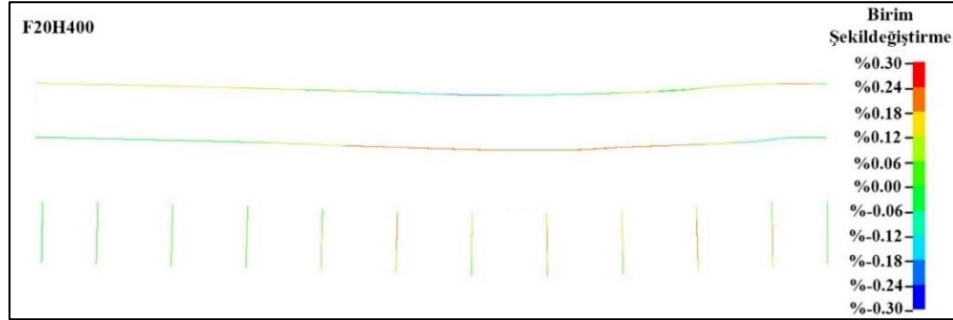


Şekil 6.30 : F20 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki donatılarda oluşan iç kuvvetler.



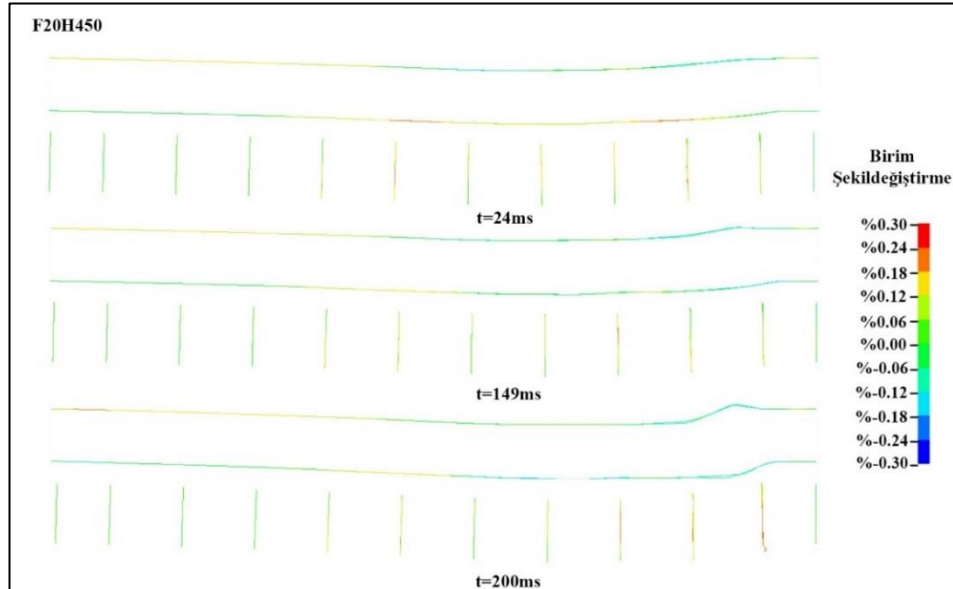
Şekil 6.31 : F20H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekil değiştirmeler.

Göçme öncesi durum olan F20H400 numunesinde alt ve üst donatılarda akma meydana gelirken, darbe ağırlığının doğu mesnetine yakın kenarına yakın üst ve alt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana geldiği görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.32).



Şekil 6.32: F20H400 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.

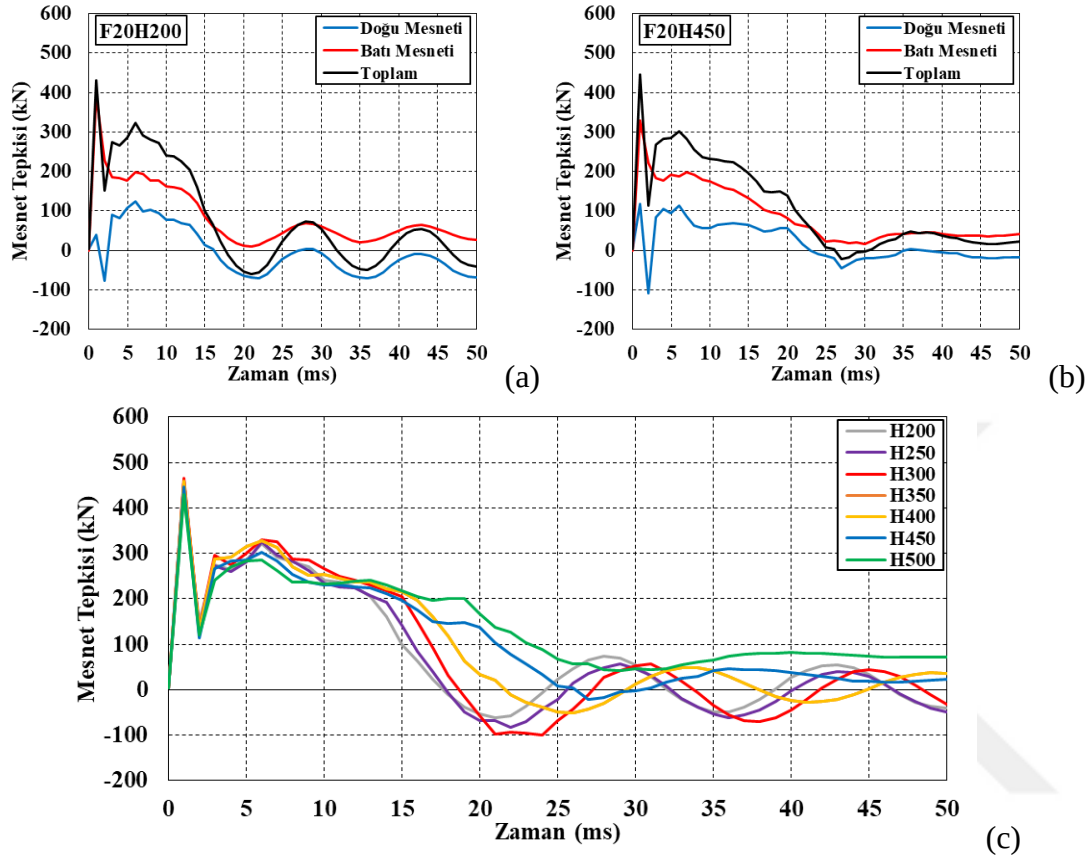
Göçme durumunu temsil eden F20H450 numunesinde alt ve üst donatılarda akma meydana gelirken, darbe ağırlığının doğu mesnetine yakın kenarına yakın üst ve alt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana geldiği görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.33).



Şekil 6.33 : F20H450 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.

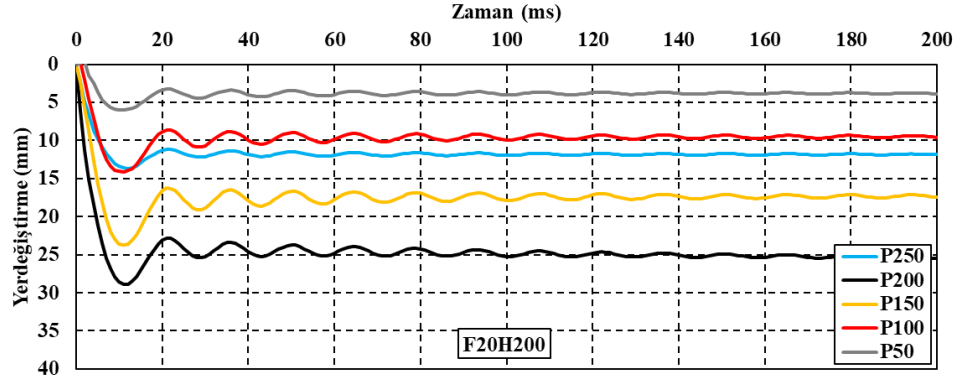
Mesnet tepkilerinin zamanla değişimi Şekil 6.34'te gösterilmiştir. Yükseklik artışıyla birlikte batı mesnetinde maksimum mesnet tepkisi artarken, doğu mesnetinde

azalmıştır. Toplam maksimum mesnet tepkisi en yüksek değerine F20H300 (465.2 kN) numunesinde ulaşırken, F20H500 numunesinde en düşük değer elde edilmiştir (429.8 kN).

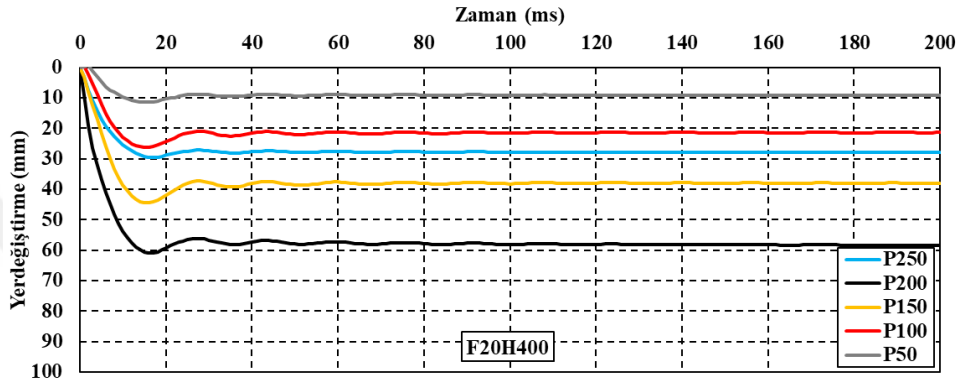


Şekil 6.34 : Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F20H200 numunesi, (b) F20H450 numunesi, (c) F20 serisi karşılaştırması.

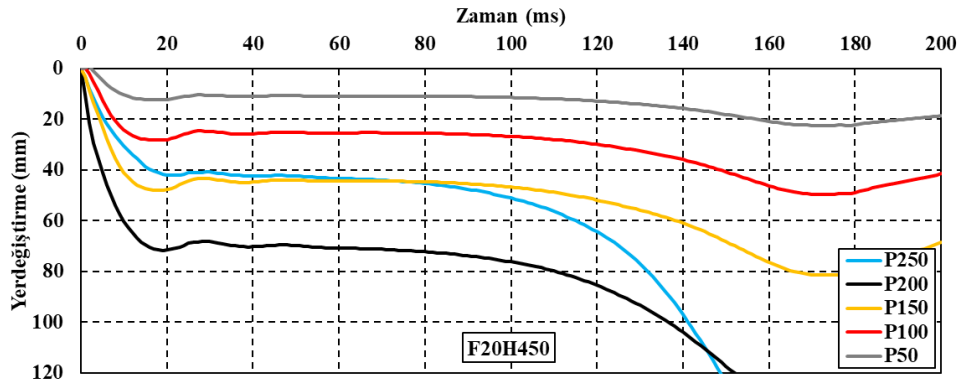
Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.35'te gösterilmiştir. Darbe sonrası F20H200 numunesinde darbe uygulanan bölge altında maksimum 29 mm yerdeğiştirme meydana gelirken, F20H400 numunesinde ise maksimum 61 mm yerdeğiştirme meydana gelmiştir. En büyük kalıcı yerdeğiştirme yine darbe uygulanan bölge altında meydana gelmiştir. F20H400 numunesinde 58 mm, F20H200 numunesinde ise 26 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür (Şekil 6.36).



(a)

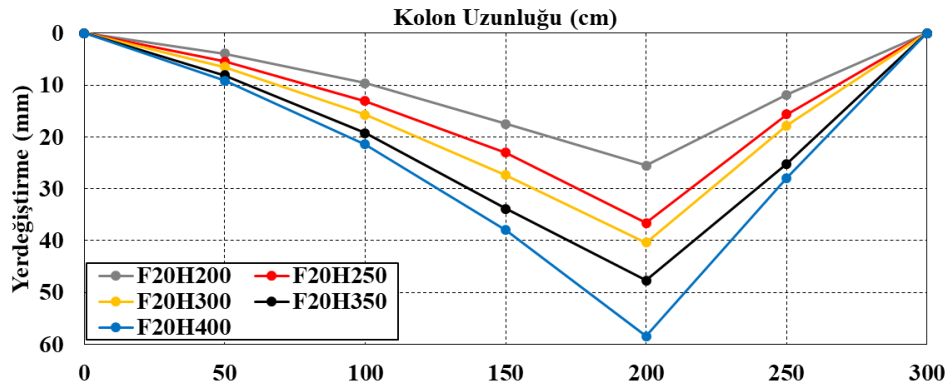


(b)



(c)

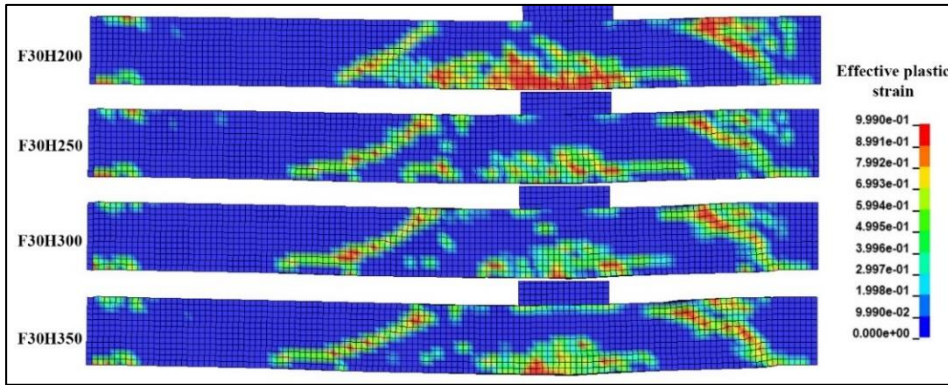
Şekil 6.35 : Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F20H200 numunesi, (b) F20H400 numunesi, (c) F20H450 numunesi.



Şekil 6.36 : F20 serisine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.

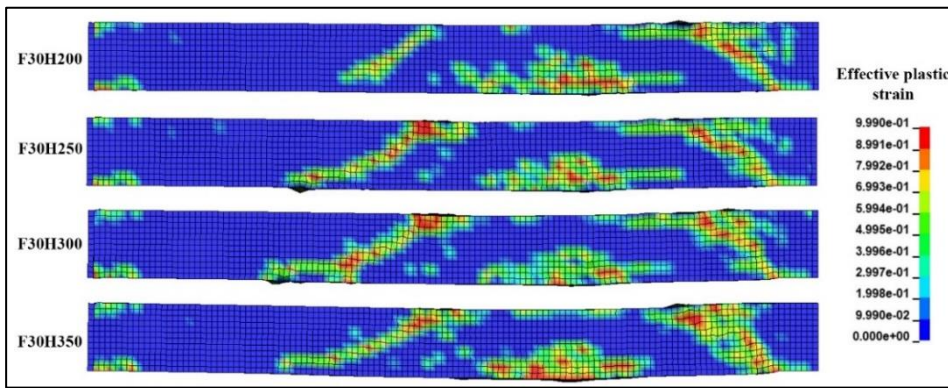
6.4.4 Eksenel yükün %30 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri

Eksenel yükün %30 düzeyinde olduğu (710 kN) betonarme kolonların 200 cm ila 400 cm yükseklikten (50 cm yükseklik artımıyla) darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.37 ve Şekil 6.38’de gösterilmiştir. Şekil 6.37 incelendiğinde, maksimum yerdeğiştirme anında tüm yükseklikler için kesme ve eğilme çatlaklarının oluştuğu, F30H300 numunesinden başlayarak yükseklik artışıyla birlikte kesitte burkulma meydana geldiği gözlenmiştir.



Şekil 6.37 : F30 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları.

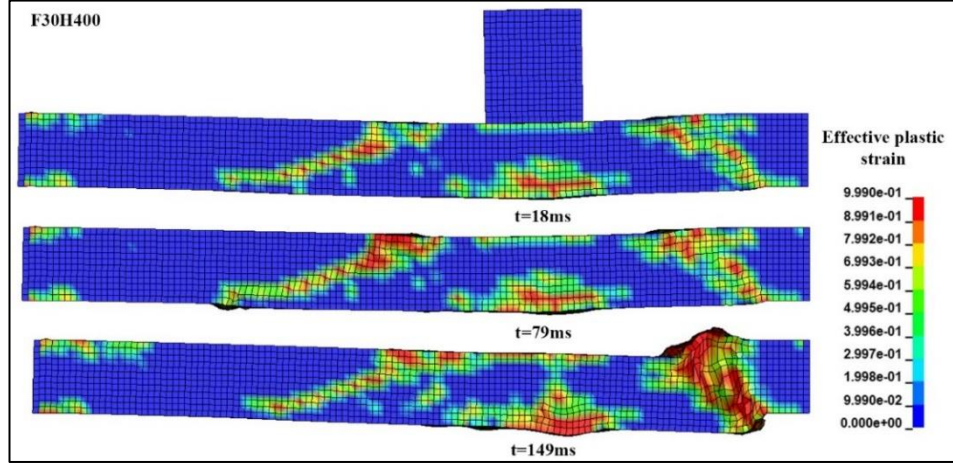
Kalıcı yerdeğiştirme durumunu gösteren Şekil 6.38 incelendiğinde, F30H200’den başlayarak F30H250 numunesine kadar eğilme çatlaklarının arttığı, F30H300 numunesinden başlayarak yükseklik artışıyla birlikte kesitte burkulmayla birlikte kesme davranışının doğu mesnetine doğru arttığı görülmüştür.



Şekil 6.38 : F30 serisine ait kalıcı yerdeğiştirme anında gerilme durumları.

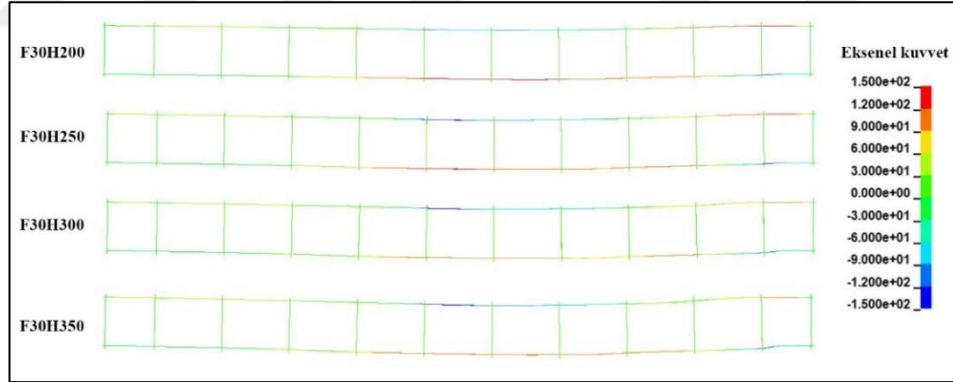
400 cm yükseklikten darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.39’da gösterilmiştir. Darbe ağırlığının her iki kenarından başlayarak mesnetlere doğru uzanan kesme

hasarları gözlenmiştir. F30H400 numunesi darbe yükü altında göçme durumuna ulaşmıştır.

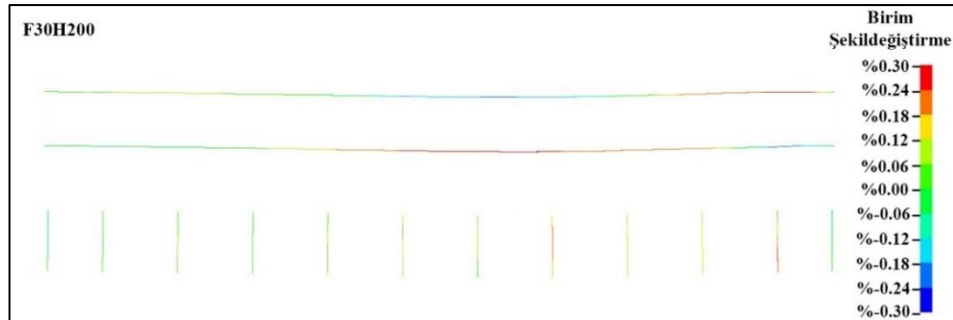


Şekil 6.39 : F30H400 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki ve T=200ms anındaki gerilme durumları.

Maksimum yerdeğiştirme anında donatılarda oluşan iç kuvvetler Şekil 6.40'ta verilmiştir. F30H200 numunesinde alt donatılarda akma meydana gelirken, üst donatıların mesnete yakın kısımlarında akma oluşmuştur. Yine darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.41).

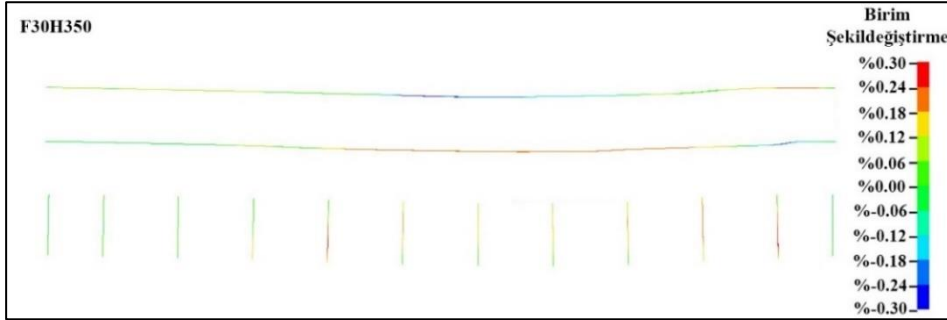


Şekil 6.40 : F30 serisine ait maksimum yerdeğiştirme anındaki donatılarda oluşan iç kuvvetler.



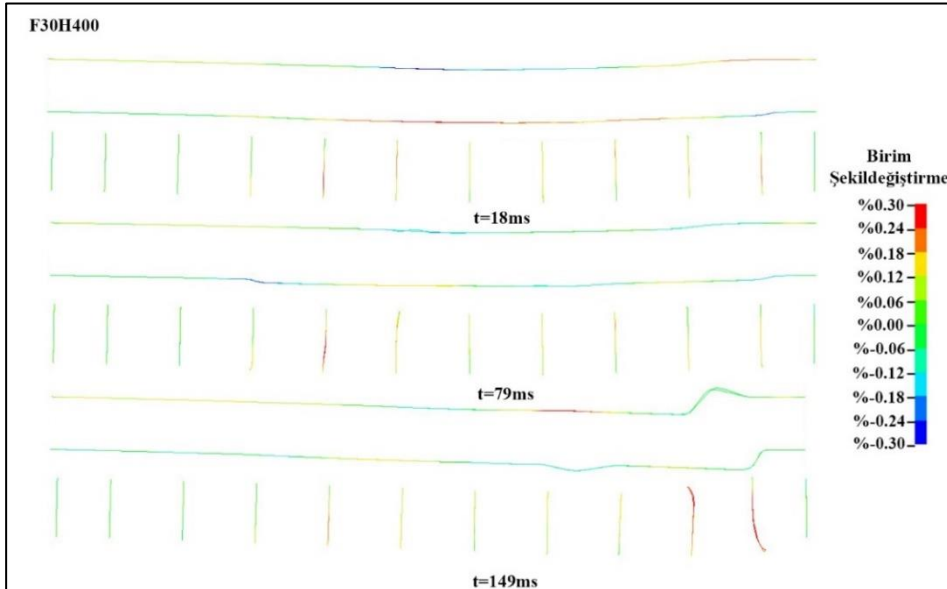
Şekil 6.41 : F30H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.

Göçme öncesi durum olan F30H350 numunesinde alt ve üst donatılarda akma meydana gelirken, darbe ağırlığının doğu mesnetine yakın kenarına yakın üst ve alt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana geldiği görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.42).



Şekil 6.42: F30H350 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildegıştirmeler.

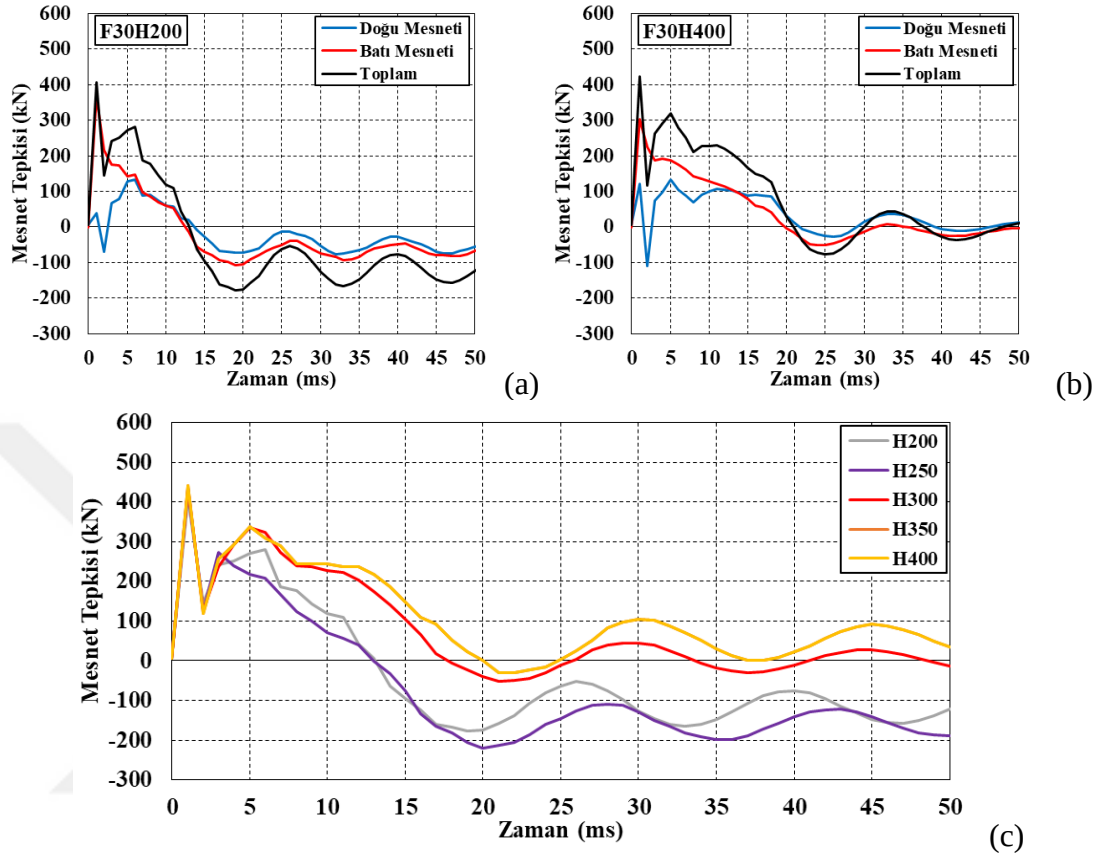
Göçme durumunu temsil eden F30H400 numunesinde alt ve üst donatılarda akma meydana gelirken, darbe ağırlığının doğu mesnetine yakın kenarına yakın üst ve alt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana geldiği görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.43).



Şekil 6.43 : F30H400 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildegıştirmeler.

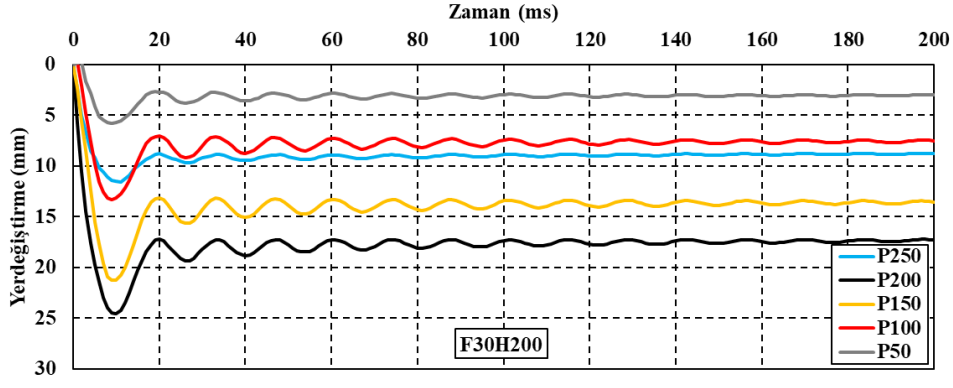
Mesnet tepkilerinin zamanla değişimi Şekil 6.44'te gösterilmiştir. Yükseklik artışıyla birlikte batı mesnetinde maksimum mesnet tepkisi artarken, doğu mesnetinde

azalmıştır. Toplam maksimum mesnet tepkisi en yüksek değerine F30H350 (442.6 kN) numunesinde ulaşırken, F30H200 numunesinde en düşük değer elde edilmiştir (407.1 kN).

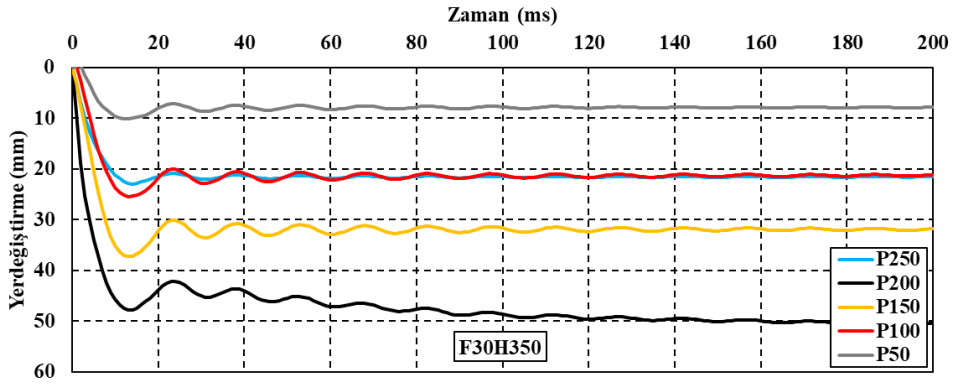


Şekil 6.44 : Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F30H200 numunesi, (b) F30H400 numunesi, (c) F30 serisi karşılaştırması.

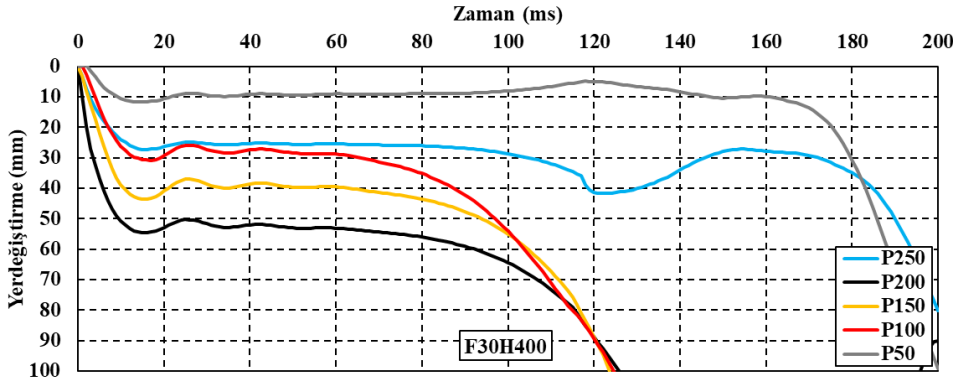
Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.45'te gösterilmiştir. Darbe sonrası F30H200 numunesinde darbe uygulanan bölge altında maksimum 24 mm yerdeğiştirme meydana gelirken, F30H350 numunesinde ise maksimum 51 mm yerdeğiştirme meydana gelmiştir. En büyük kalıcı yerdeğiştirme yine darbe uygulanan bölge altında meydana gelmiştir. F30H350 numunesinde 50 mm, F30H200 numunesinde ise 17 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür (Şekil 6.46).



(a)

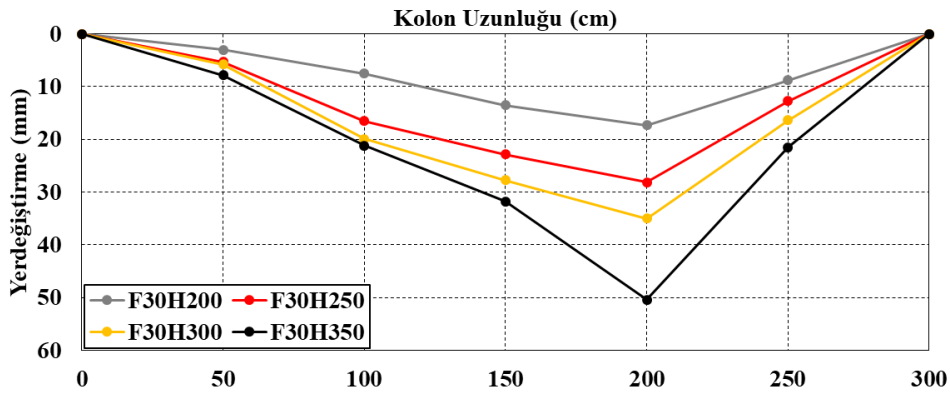


(b)



(c)

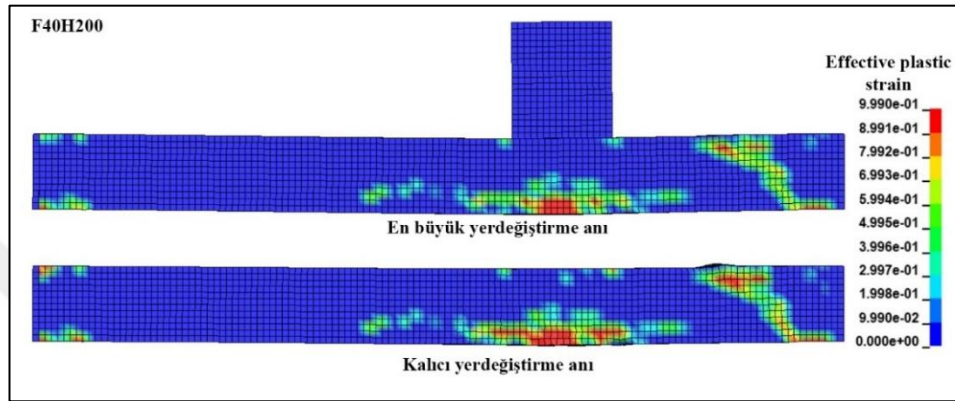
Şekil 6.45 : Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F30H200 numunesi, (b) F30H350 numunesi, (c) F30H400 numunesi.



Şekil 6.46 : F30 serisine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.

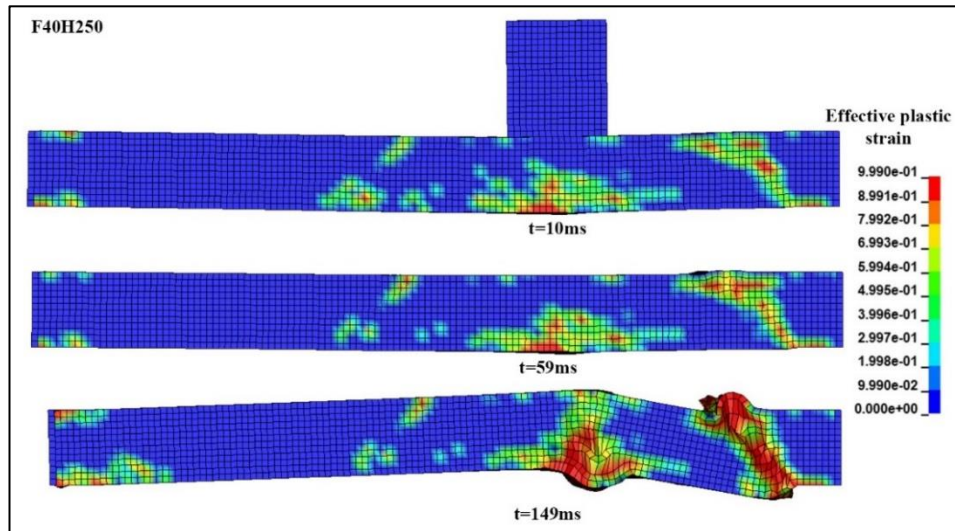
6.4.5 Eksenel yükün %40 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri

Eksenel yükün %40 düzeyinde olduğu (980 kN) betonarme kolonların 200 cm ve 250 cm yükseklikten (50 cm yükseklik artımıyla) darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.47 ve Şekil 6.48’de gösterilmiştir. Şekil 6.47 incelendiğinde, F40H200 numunesinde, eğilme ve kesme çatlaklarıyla birlikte kesitte burkulma meydana geldiği gözlenmiştir.



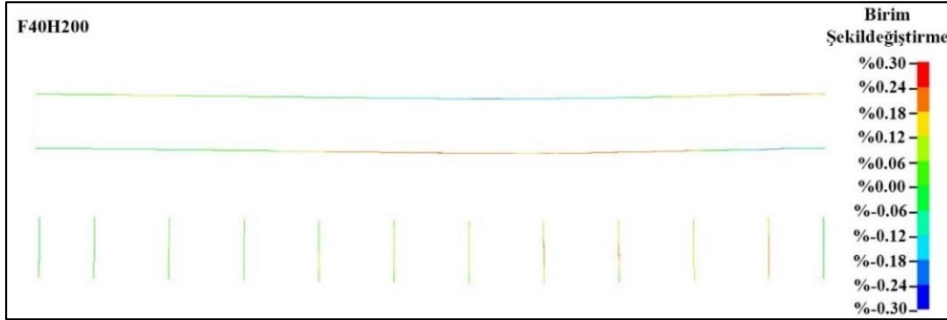
Şekil 6.47 : F40H200 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları.

250 cm yükseklikten darbe ağırlığının düşürülmesiyle, zamana bağlı meydana gelen gerilme durumları Şekil 6.48’de gösterilmiştir. Darbe ağırlığının her iki kenarından başlayarak mesnetlere doğru uzanan kesme hasarları gözlenmiştir. F40H250 numunesi darbe yükü altında göçme durumuna ulaşmıştır.



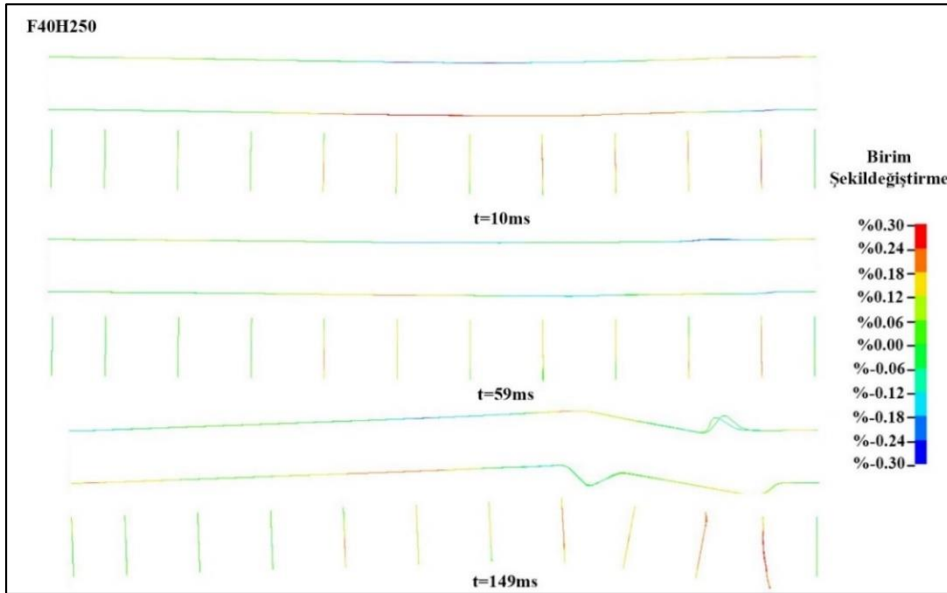
Şekil 6.48 : F40H250 numunesinde zamana göre gerilme durumları.

Göçme öncesi durum olan F40H200 numunesinde alt ve üst donatılarda akma meydana gelirken, darbe ağırlığının doğu mesnetine yakın kenarına yakın üst ve alt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana geldiği görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.49).



Şekil 6.49: F40H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildegıştirmeler.

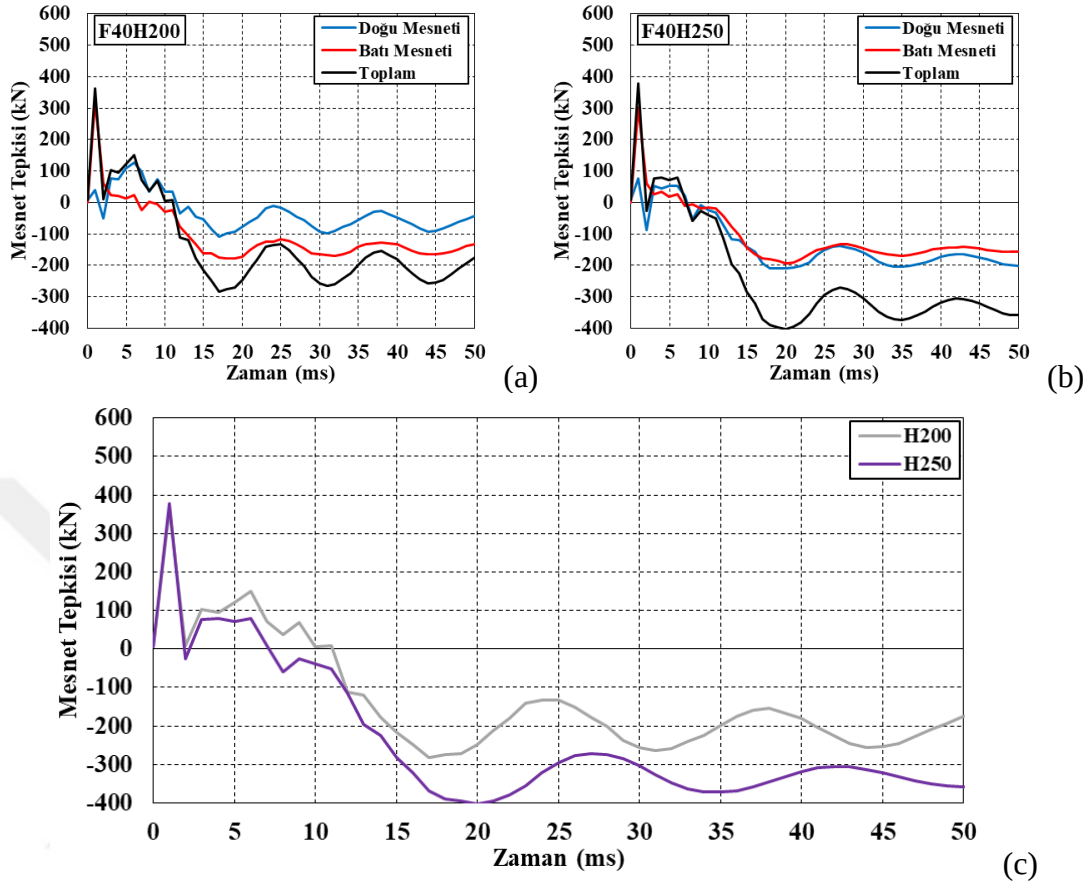
F40H250 durumunda anında donatılarda oluşan iç kuvvetler Şekil 6.50’de verilmiştir. 10 ms anında darbe uygulanan bölgede üst donatıda burkulma, 59 ms anında alt donatıda akma meydana gelmiş, 149 ms anında tüm boyuna donatılarda burkulma ile birlikte göçme oluşmuştur.



Şekil 6.50 : F40H250 numunesinde zamana bağlı oluşan birim şekildegıştirmeler.

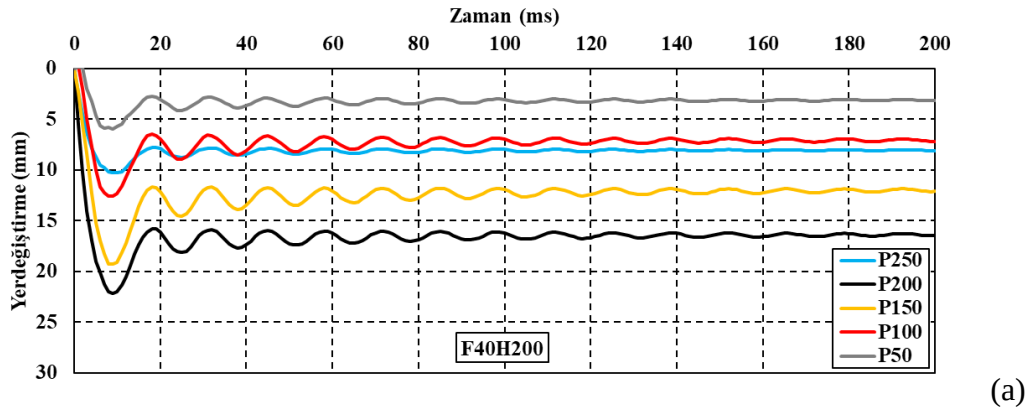
Mesnet tepkilerinin zamanla değişimi Şekil 6.51’de gösterilmiştir. Yükseklik artışıyla birlikte batı mesnetinde maksimum mesnet tepkisi artarken, doğu mesnetinde

azalmıştır. Toplam maksimum mesnet tepkisi F40H250 numunesinde 363.2 kN F40H200 numunesinde 378.6 kN olarak elde edilmiştir.

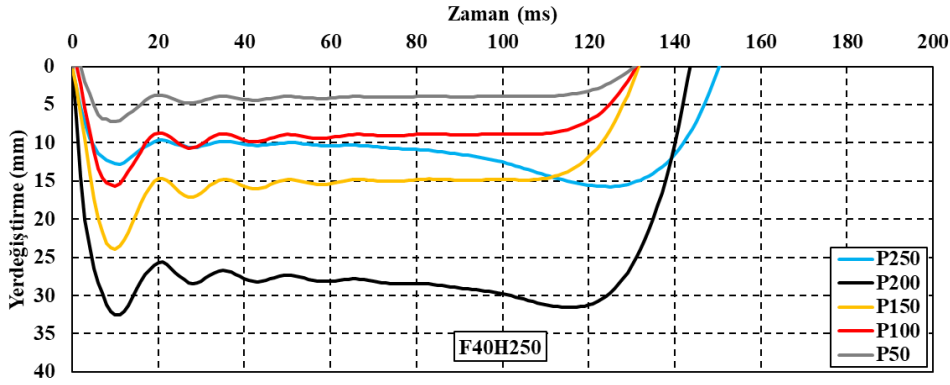


Şekil 6.51 : Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F40H200 numunesi, (b) F40H250 numunesi, (c) F40 serisi karşılaştırması.

Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 6.52’de gösterilmiştir. Darbe sonrası F40H200 numunesinde darbe uygulanan bölge altında maksimum 22 mm yerdeğiştirme meydana gelirken, 16 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür (Şekil 6.53).

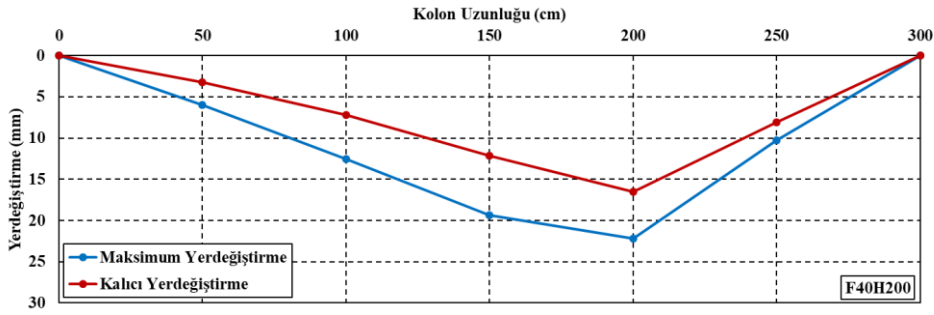


Şekil 6.52 : Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F40H200 numunesi, (b) F40H250 numunesi.



(b)

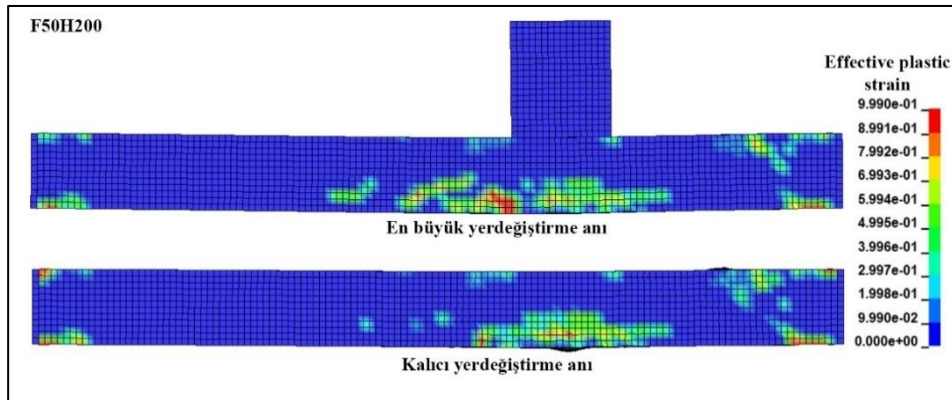
Şekil 6.52 (devamı) : Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F40H200 numunesi, (b) F40H250 numunesi.



Şekil 6.53 : F40H200 numunesine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.

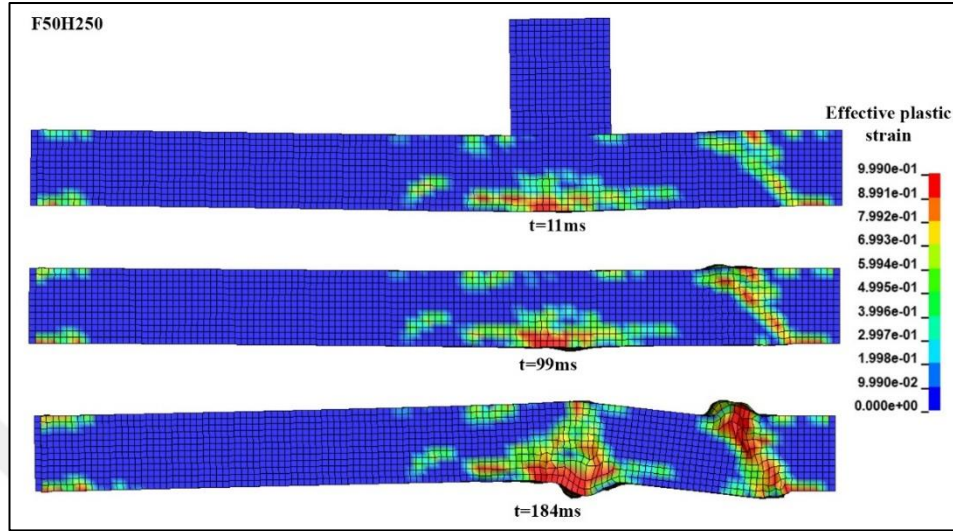
6.4.6 Eksenel yükün %50 düzeyinde olduğu duruma ait sonlu eleman analizleri

Eksenel yükün %50 düzeyinde olduğu (1350 kN) betonarme kolonların 200 cm ve 250 cm yükseklikten darbe ağırlığının düşürülmesiyle, en büyük yerdeğiştirme anında meydana gelen gerilmeler ve kalıcı gerilme durumları Şekil 6.54 ve Şekil 6.55'te gösterilmiştir. Şekil 6.54 incelendiğinde, F50H200 numunesinde, eğilme ve kesme çatlaklarıyla birlikte kesitte burkulma meydana geldiği gözlenmiştir.



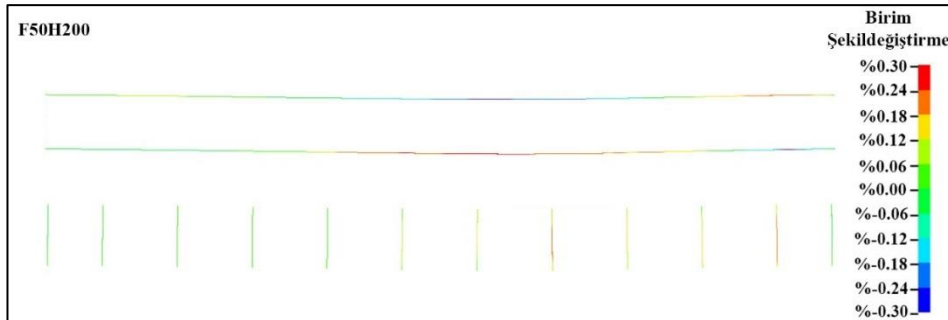
Şekil 6.54 : F50H200 numunesinde maksimum yerdeğiştirme anındaki gerilme durumları.

250 cm yükseklikten darbe ağırlığının düşürülmesiyle, zamana bağlı meydana gelen gerilme durumları Şekil 6.55'te gösterilmiştir. Darbe ağırlığının her iki kenarından başlayarak mesnetlere doğru uzanan kesme hasarları gözlenmiştir. F50H250 numunesi darbe yükü altında göçme durumuna ulaşmıştır.



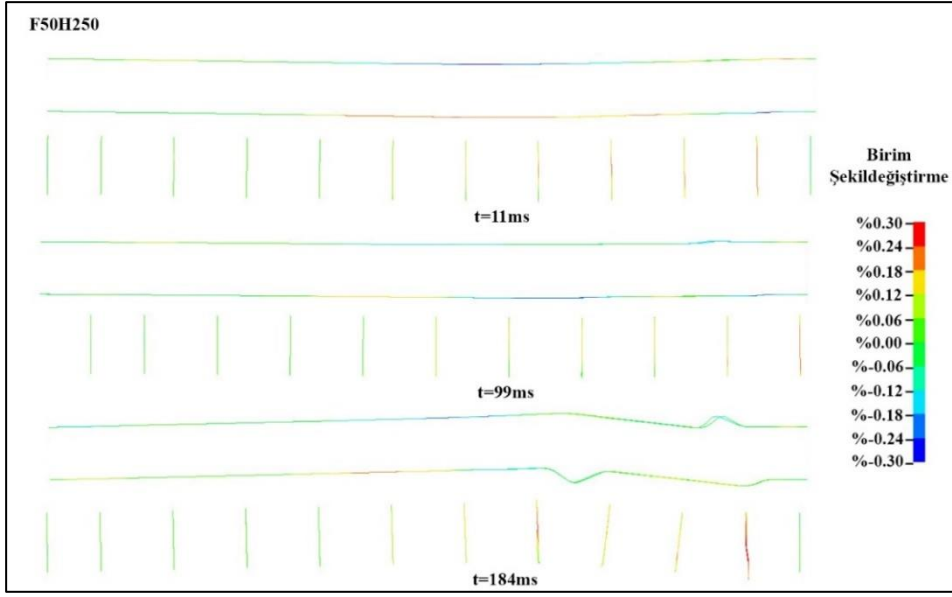
Şekil 6.55 : F50H250 numunesinde zamana göre gerilme durumları.

Göçme öncesi durum olan F50H200 numunesinde alt ve üst donatılarda akma meydana gelirken, darbe ağırlığının doğu mesnetine yakın kenarına yakın üst ve alt donatılarda maksimum birim kısalma sınırının ötesine geçilerek burkulma meydana geldiği görülmüştür. Darbe uygulanan bölgeye yakın etriyelerde akma meydana gelmiştir (Şekil 6.56).



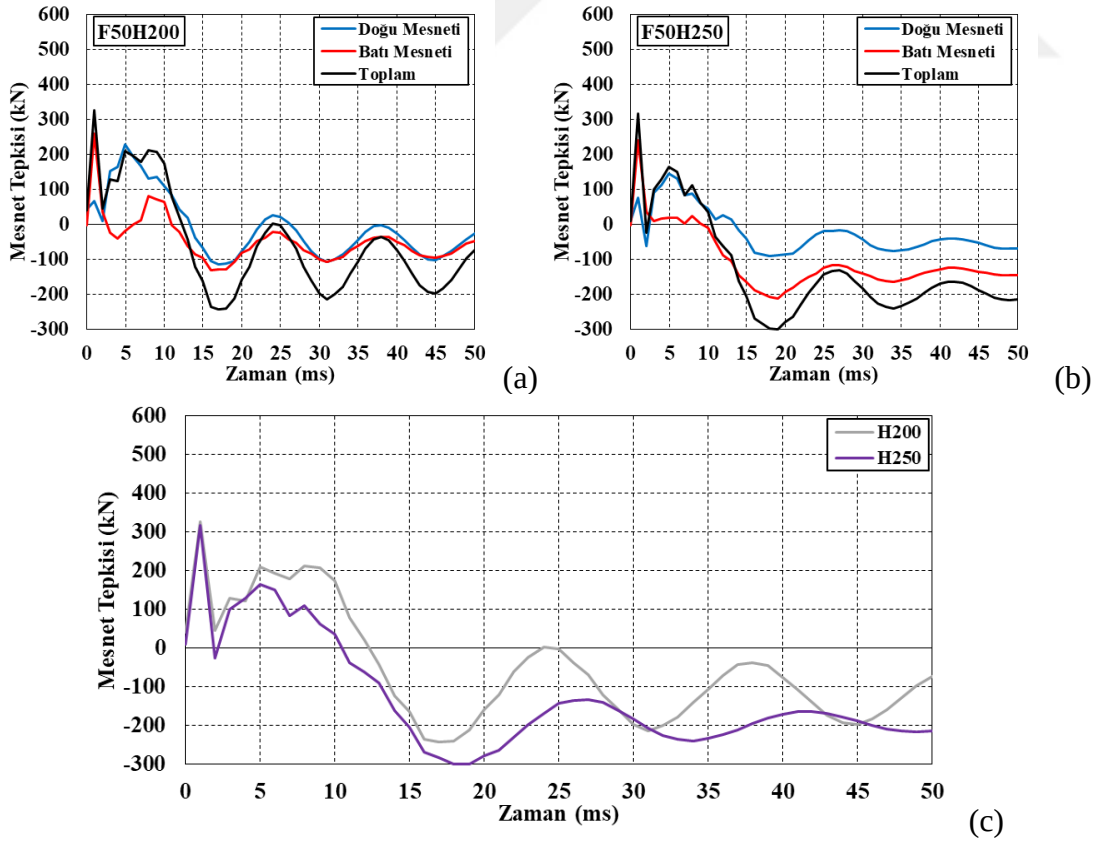
Şekil 6.56: F50H200 numunesi donatılarında maksimum yerdeğiştirme anında oluşan birim şekildeğiştirmeler.

F50H250 durumunda anında donatılarda oluşan iç kuvvetler Şekil 6.57'de verilmiştir. 11 ms anında darbe uygulanan bölgede üst donatıda burkulma, 99 ms anında alt donatıda akma meydana gelmiş, 184 ms anında tüm boyuna donatılarda burkulma ile birlikte göçme oluşmuştur.



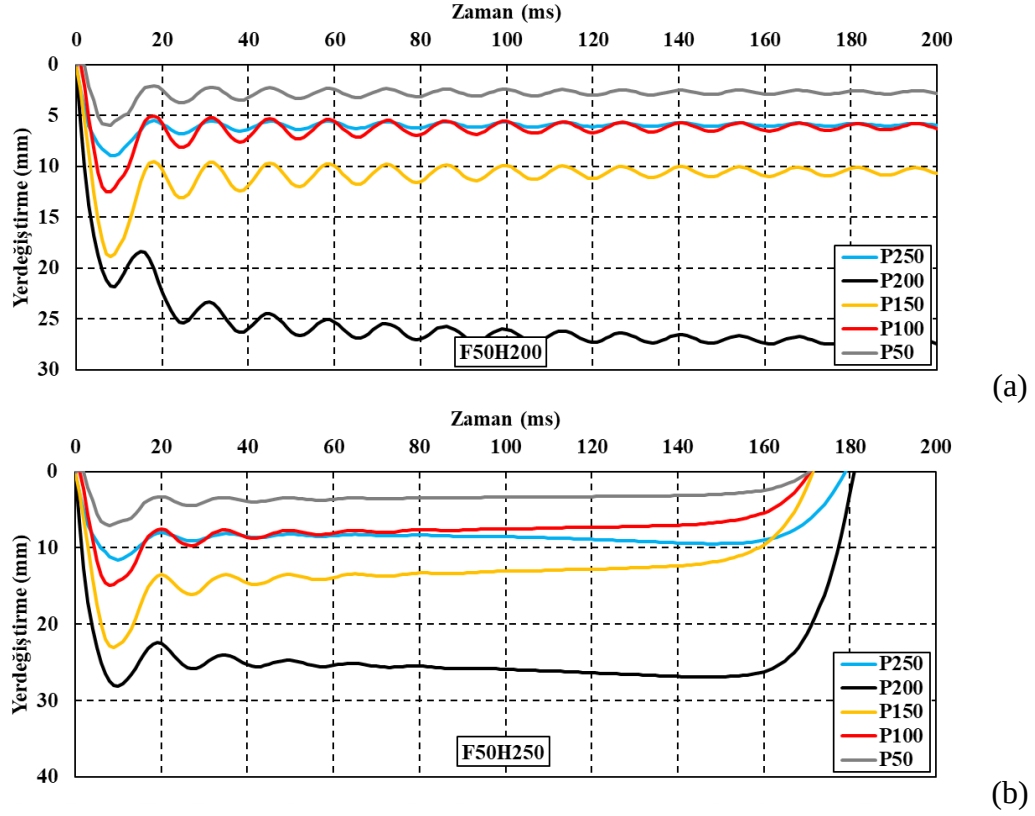
Şekil 6.57 : F50H250 numunesinde zamana bağlı oluşan birim şekildeğiştirmeler.

Mesnet tepkilerinin zamanla değişimi Şekil 6.58’de gösterilmiştir. Yükseklik artışıyla birlikte batı mesnetinde maksimum mesnet tepkisi artarken, doğu mesnetinde azalmıştır. Toplam maksimum mesnet tepkisi F50H250 numunesinde 326.6 kN F50H200 numunesinde 317.0 kN olarak elde edilmiştir.

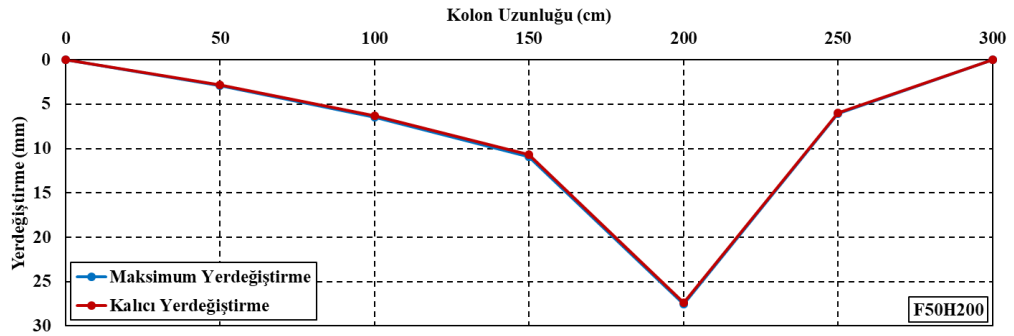


Şekil 6.58 : Mesnet tepkisi zaman grafikleri (a) F50H200 numunesi, (b) F50H250numunesi, (c) F50 serisi karşılaştırması.

Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi şekil 6.59’da gösterilmiştir. Darbe sonrası F50H200 numunesinde darbe uygulanan bölge altında maksimum 27 mm yerdeğiştirme meydana gelirken, 27 mm kalıcı yerdeğiştirme ölçülmüştür (şekil 6.60).



şekil 6.59 : Yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) F50H200 numunesi, (b) F50H250 numunesi.

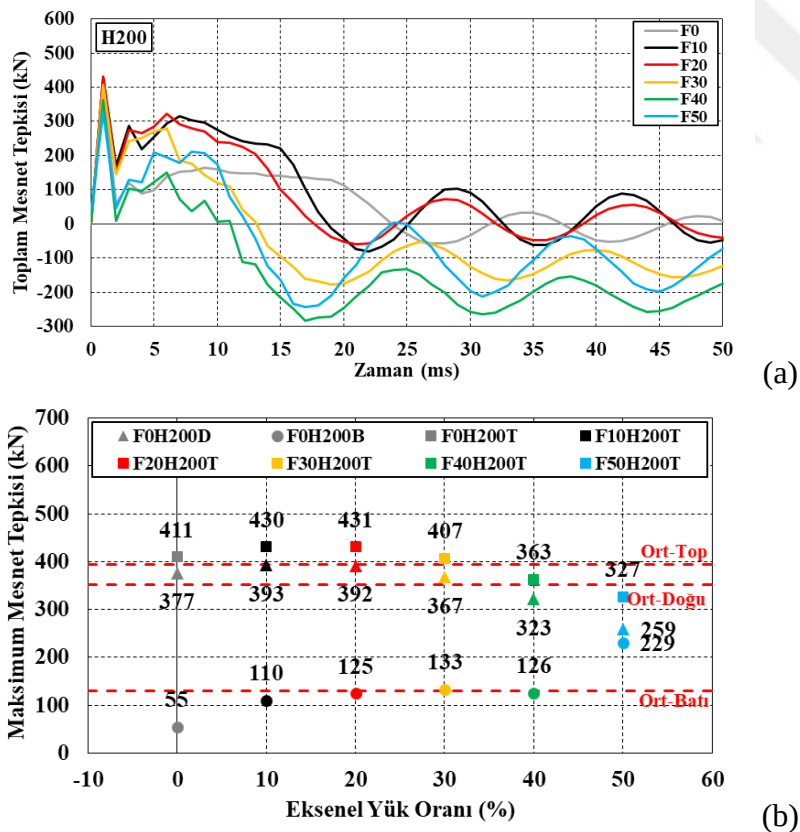


şekil 6.60 : F50H200 numunesine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.

6.5 Eksenel Yük Değişimi Etkisinin Sayısal Olarak Karşılaştırılması

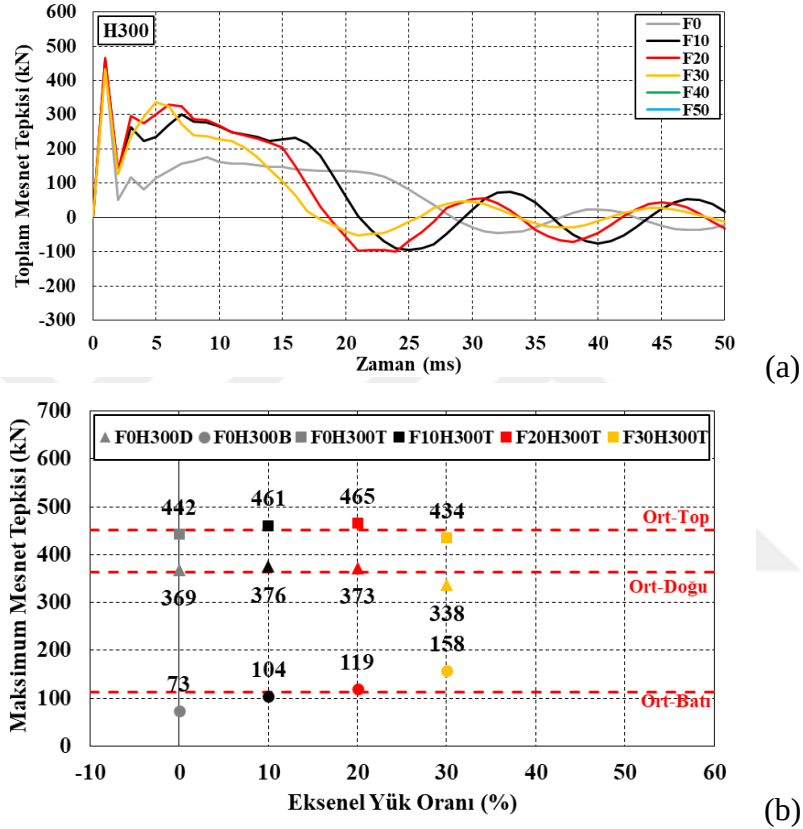
6.5.1 Mesnet tepkilerinin karşılaştırılması

Darbe yüksekliğinin 200 cm olduğu duruma ait farklı eksenel yük düzeylerinde meydana gelen toplam mesnet reaksiyonlarının zamanla değişimi Şekil 6.61a'da, maksimum mesnet reaksiyonlarının eksenel yük düzeyine göre değişimi ise Şekil 6.61b'de gösterilmiştir. Toplam mesnet reaksiyonlarının zamanla değişimi pik noktasına kadar (yaklaşık 2 ms anında) benzer davranış sergilerken bu noktadan sonra dalgalanma eğilimi göstermektedir. Eksenel yüksüz durum ile eksenel yükün %10 ve %20 olduğu durumların birbirine yakın davranış sergilediği görülmüştür. Toplam maksimum mesnet reaksiyonunun en küçük olduğu eksenel yük düzeyi %50 iken (326 kN) en büyük olduğu eksenel yük düzeyi %20'dir (431 kN). Maksimum mesnet reaksiyonu altı farklı eksenel yük durumu için ortalama 395 kN olarak hesaplanmıştır. Eksenel yükün olmadığı durumda batı mesnetinde 55 kN mesnet tepkisi ölçülürken bu değer eksenel yükün %50 olduğu durum için 229 kN değerindedir.



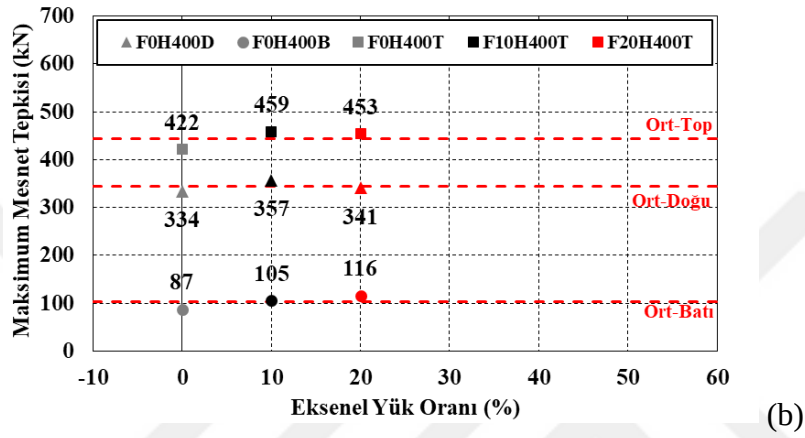
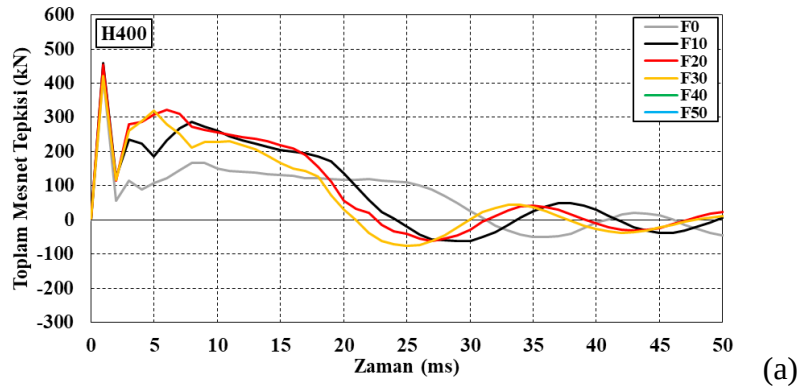
Şekil 6.61 : H200 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri.

Darbe yüksekliğinin 300cm olduğu durumda, toplam maksimum mesnet reaksiyonunun en küçük olduğu eksenel yük düzeyi %30 iken (434 kN) en büyük olduğu eksenel yük düzeyi %20'dir (461 kN). Maksimum toplam mesnet reaksiyonları birbirine oldukça yakın değerler almakla birlikte, dört farklı eksenel yük durumu için ortalama 451 kN olarak hesaplanmıştır. Eksenel yükün olmadığı durumda batı mesnetinde 73 kN mesnet tepkisi ölçülürken bu değer eksenel yükün %30 olduğu durum için 158 kN değerindedir (Şekil 6.62).



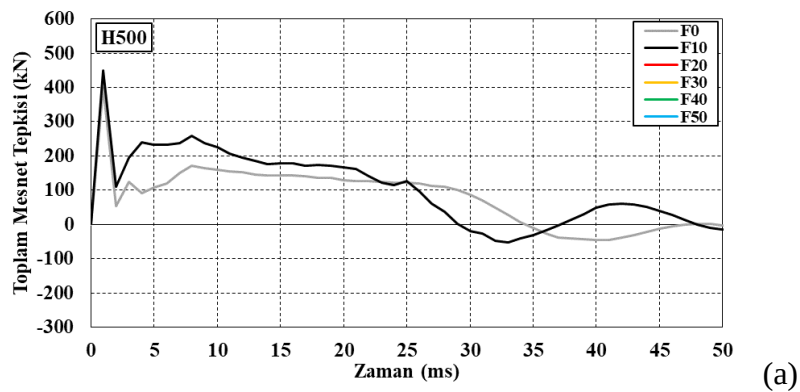
Şekil 6.62 : H300 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri.

Darbe yüksekliğinin 400 cm olduğu durumda toplam maksimum mesnet reaksiyonunun en küçük olduğu durum, eksenel yükün bulunmadığı durumdur (422 kN), en büyük olduğu eksenel yük düzeyi %10'dur (459 kN). Maksimum toplam mesnet reaksiyonları birbirine oldukça yakın değerler almakla birlikte, üç farklı eksenel yük durumu için ortalama 445 kN olarak hesaplanmıştır. Eksenel yükün olmadığı durumda batı mesnetinde 87 kN mesnet tepkisi ölçülürken bu değer eksenel yükün %20 olduğu durum için 116 kN değerindedir (Şekil 6.63).

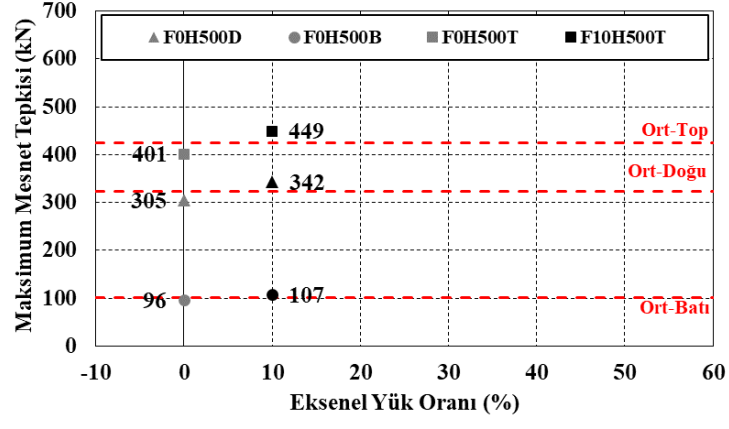


Şekil 6.63 : H400 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri.

Darbe yüksekliğinin 500 cm olduğu durumda toplam maksimum mesnet reaksiyonunun en küçük olduğu durum, eksenel yükün bulunmadığı durumdur (401 kN), en büyük olduğu eksenel yük düzeyi %10'dur (449 kN). Eksenel yükün olmadığı durumda batı mesnetinde 96 kN mesnet tepkisi ölçülürken bu değer eksenel yükün %10 olduğu durum için 107 kN değerindedir (Şekil 6.64).



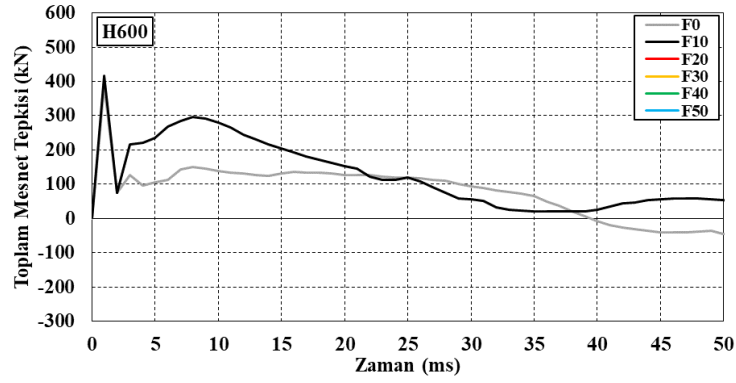
Şekil 6.64 : H500 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri



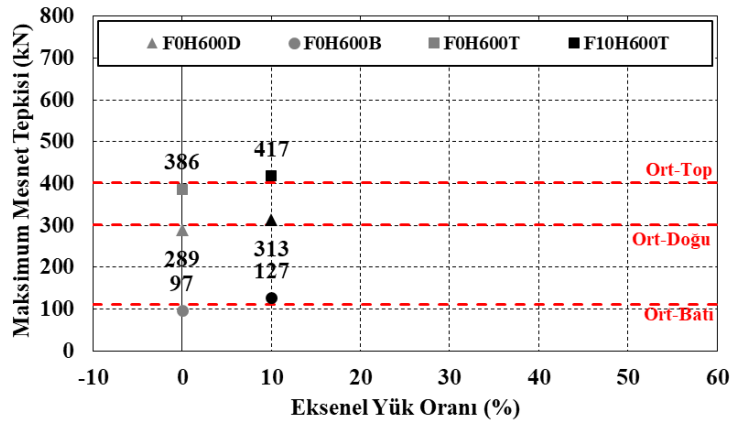
(b)

Şekil 6.64 (devamı) : H500 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri

Darbe yüksekliğinin 600 cm olduğu durumda toplam maksimum mesnet reaksiyonunun en küçük olduğu durum eksenel yükün bulunmadığı durumdur (386 kN), en büyük olduğu eksenel yük düzeyi %10'dur (417 kN). Eksenel yükün olmadığı durumda batı mesnetinde 97 kN mesnet tepkisi ölçülürken bu değer eksenel yükün %10 olduğu durum için 127 kN değerindedir.



(a)

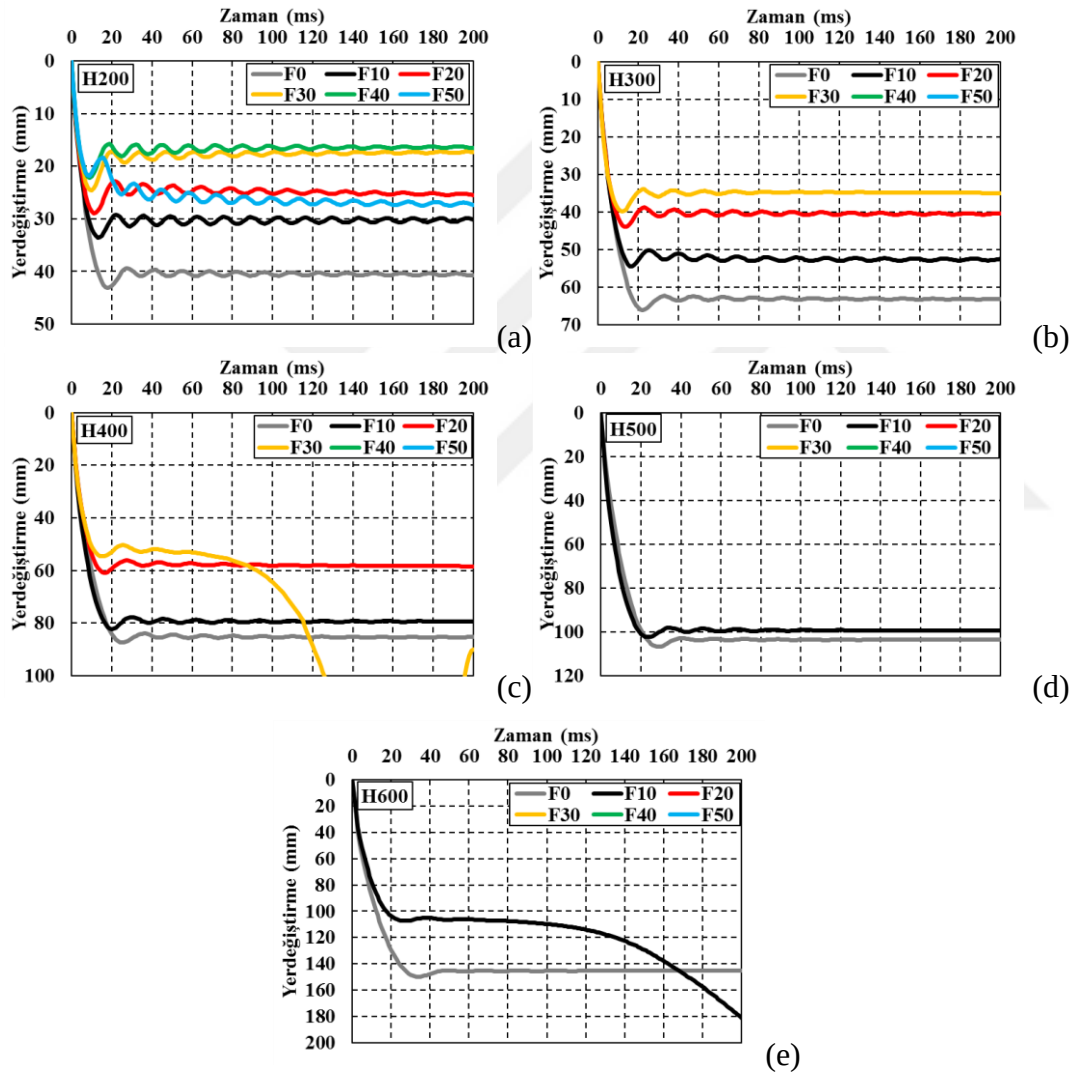


(b)

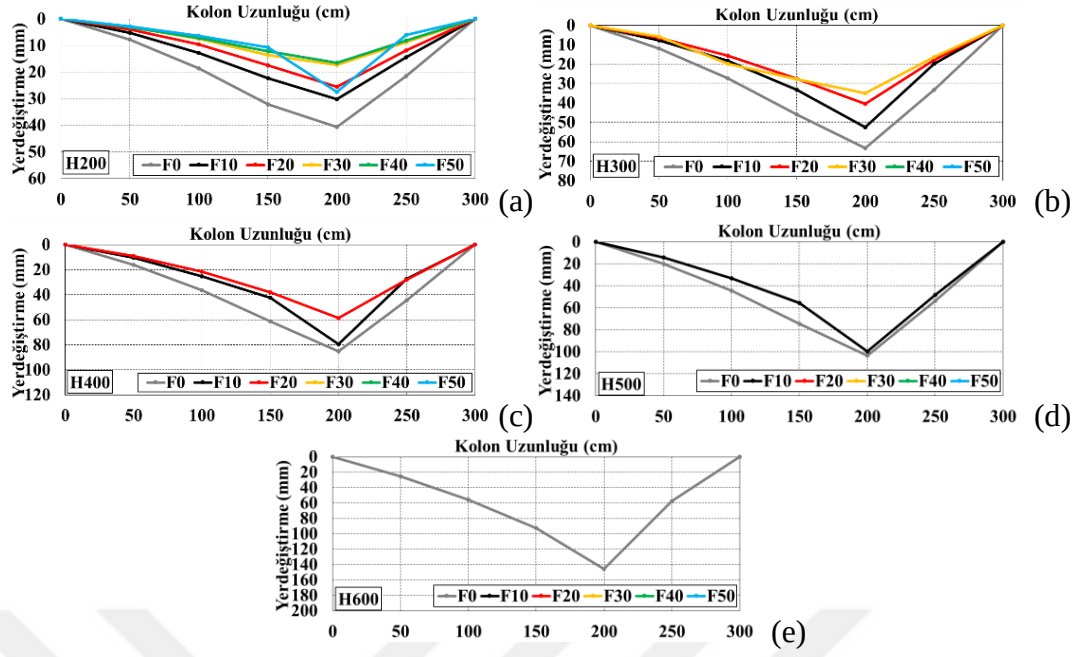
Şekil 6.65 : H600 darbe yüksekliğine ait (a) toplam mesnet tepkisinin zamanla değişimi, (b) maksimum mesnet tepkileri

6.5.2 Yerdeşiftirmelerin karşılaştırılması

Yerdeşiftirmelerin zamanla değişimi şekil 6.66'da, kalıcı yerdeşiftirmeler şekil 6.67'de gsterilmiştir. Darbe yksekliğinin 200 cm olduğu durumda maksimum yerdeşiftirme eksenel ykstsüz durumda (F0) 43.09 mm, minimum yerdeşiftirme ise eksenel yk düzeyinin %40 olduğu durumda (F40) 22.16 mm olarak olęlmüřtür. Maksimum kalıcı yerdeşiftirmeler ise yine aynı numunelerde 40.69 mm ve 16.48 mm olarak tespit edilmiştir. Diğer yerdeşiftirme durumlarına ait değerleri izelge 6.3 ve 6.4'te verilmiştir.



şekil 6.66 : Yerdeşiftirmelerin zamanla değişimi (a) H200 darbe yksekliği, (b) H300 darbe yksekliği, (c) H400 darbe yksekliği, (d) H500 darbe yksekliği, (e) H600 darbe yksekliği.



Şekil 6.67 : Kalıcı yerdeğiştirmeler (a) H200 darbe yüksekliği, (b) H300 darbe yüksekliği, (c) H400 darbe yüksekliği, (d) H500 darbe yüksekliği, (e) H600 darbe yüksekliği.

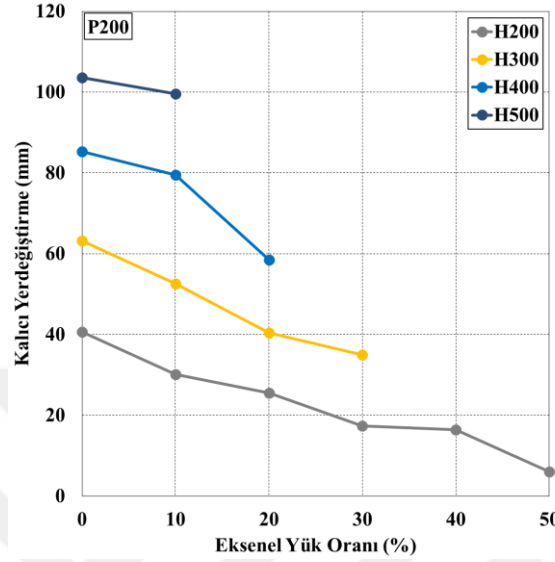
Çizelge 6.3 : Maksimum Yerdeğiştirmeler (mm).

Darbe Yüksekliği (cm)	Eksenel Yük Oranı (%)					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
H200	43.09	33.53	28.94	24.56	<u>22.16</u>	27.50
H250	55.62	43.55	38.95	<u>31.43</u>	-	-
H300	66.09	54.53	43.99	<u>39.81</u>	-	-
H350	66.09	60.04	<u>50.27</u>	50.60	-	-
H400	87.42	82.22	<u>61.02</u>	-	-	-
H450	108.01	<u>82.14</u>	-	-	-	-
H500	106.81	<u>102.43</u>	-	-	-	-
H550	136.02	<u>112.59</u>	-	-	-	-
H600	149.87	-	-	-	-	-

Çizelge 6.4 : Kalıcı Yerdeğiştirmeler (mm).

Darbe Yüksekliği (cm)	Eksenel Yük Oranı (%)					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
H200	40.69	30.16	25.51	17.32	<u>16.48</u>	27.41
H250	52.65	41.12	36.57	<u>28.10</u>	-	-
H300	63.20	52.52	40.38	<u>35.03</u>	-	-
H350	63.20	60.09	<u>47.70</u>	50.40	-	-
H400	85.31	79.45	<u>58.43</u>	-	-	-
H450	105.60	<u>79.51</u>	-	-	-	-
H500	103.63	<u>99.57</u>	-	-	-	-
H550	133.48	<u>112.59</u>	-	-	-	-
H600	145.45	-	-	-	-	-

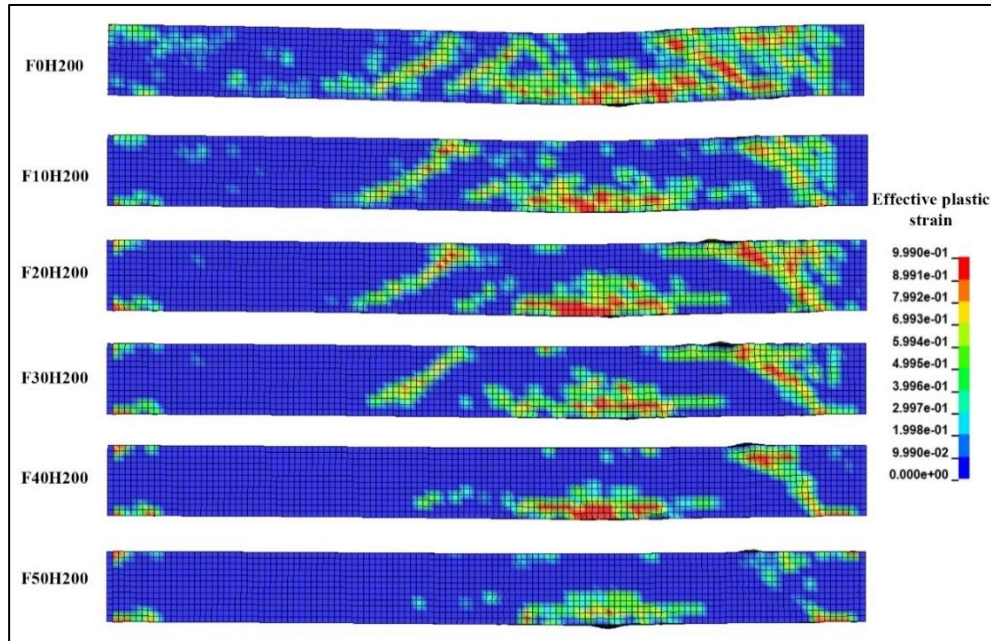
Darbe uygulanan bölgede, kalıcı yerdeğiştirmelerin eksenel yük oranına göre değişimi farklı darbe yüksekliklerine göre, Şekil 6.68’de verilmiştir. Darbe yüksekliği arttıkça kalıcı yerdeğiştirmelerin arttığı, eksenel yük arttıkça kalıcı yerdeğiştirmelerin azaldığı görölmüştür.



Şekil 6.68 : P200 potansiyometresine ait kalıcı yerdeğiştirmeler.

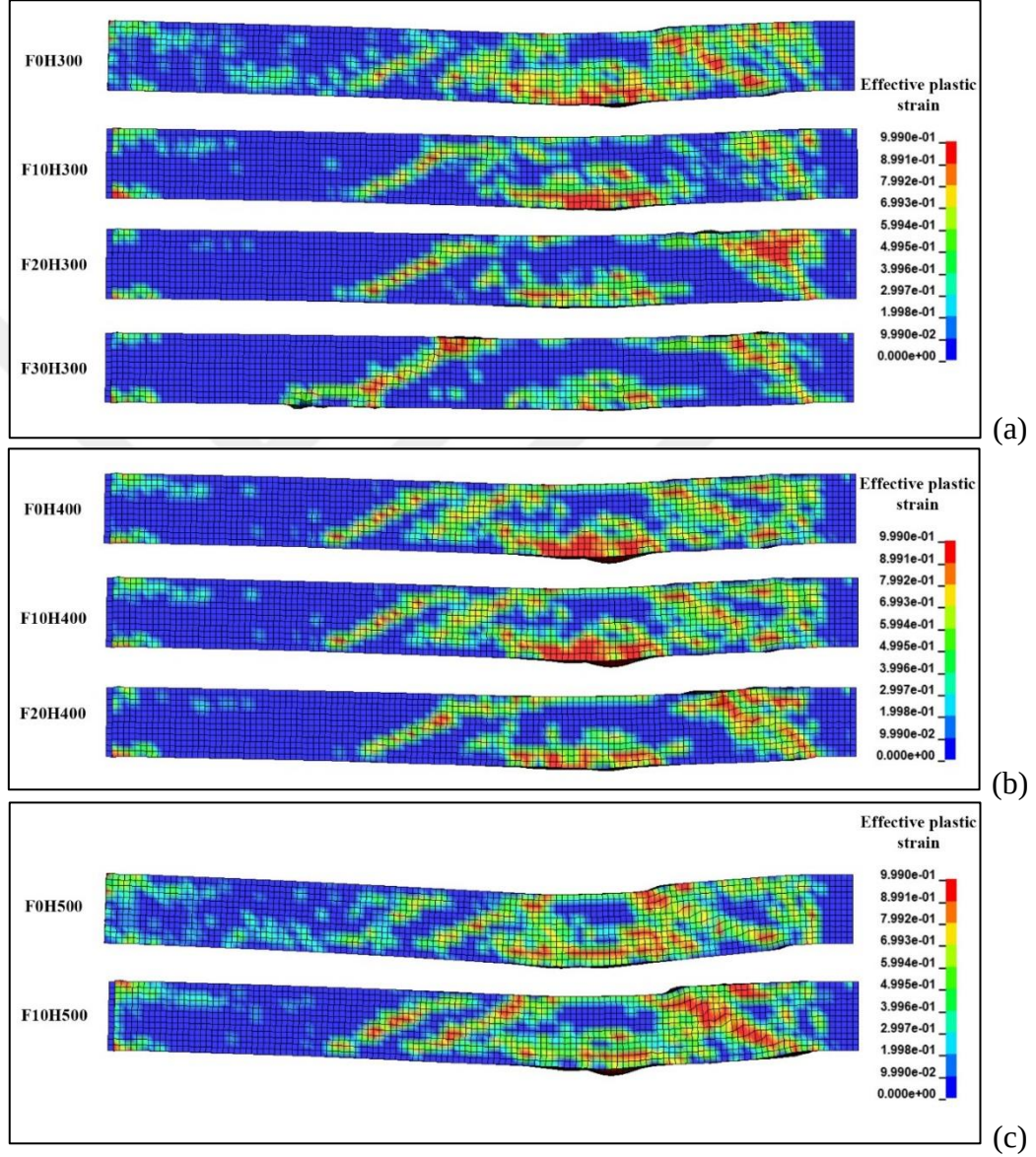
6.5.3 Hasar şekillerinin karşılaştırılması

Darbe yüksekliğinin 200 cm olduğu durumda farklı eksenel yük oranları için gerilme durumları Şekil 6.69’da verilmiştir. Eksenel yük düzeyi arttıkça numune üzerinde gerilmelerin azaldığı görölmüştür



Şekil 6.69 : H200 darbe yüksekliğine ait gerilme durumları.

Darbe yüksekliğinin 300, 400 ve 500 cm olduğu durumlarda farklı eksenel yük oranları için gerilme durumları Şekil 6.70’de verilmiştir. Eksenel yük düzeyi arttıkça numune üzerinde gerilmelerin azaldığı, bununla birlikte, eksenel yükün yüksek olduğu durumlarda yerdeğiştirmelerin ani bir şekilde artması ve donatı burkulmasıyla birlikte numunelerin göçmeye ulaştığı görölmüştür (Şekil 6.19, 6.29, 6.39, 6.48, 6.55).



Şekil 6.70 : Farklı eksenel yük düzeylerine ait gerilme durumları (a) H300 darbe yüksekliği, (b) H400 darbe yüksekliği, (c) H500 darbe yüksekliği.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Betonarme yapılara tasarımda göz önüne alınan yükler dışında yüklerin de etkimesi muhtemeldir. Bu çalışma kapsamında eksenel yüklü betonarme kolonlar üzerinde darbe yüklerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 30x30x320 cm boyutunda tam ölçekli betonarme kolonlar üretilmiş, statik ve dinamik testlerin yapılabilmesi amacıyla iki farklı test düzeneği oluşturulmuştur. Deney esnasında anlık değişen yüklerin ölçülebilmesi amacıyla yüksek kapasiteli yük ölçerler kullanılmıştır. Dinamik ve statik yükleme deneylerinde yükleme hızına ve veri frekans aralığına uygun veri toplama cihazları kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında darbe testleri, darbe sonrası artık kapasite testleri ve eksenel yük etkisinin sayısal olarak incelendiği sonlu eleman analizleri yapılmıştır.

Öncelikle, referans numunenin statik yükler altındaki davranışının belirlenmesi amacıyla 270 kN eksenel yüklü numune statik test düzeneği altında, darbe yükünün etkitileceği bölgeden, yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Bu test sonucunda yük-yerdeğiştirme ilişkileri, donatılarda oluşan birim şekildeğiştirmeler, çatlak şekilleri ve hasar durumları incelenmiştir. Bu test sonucunda:

- Yükleme esnasında ilk eğilme çatlağı 61.0 kN düzeyinde oluşmaya başlamış, 166.0 kN yük altında boyuna donatılar akmaya başlamış ve 176.9 kN düzeyinde numune yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır.
- Yükleme deneyi 81 mm yerdeğiştirmeye ulaşıldığında betonda ezilmeler başladığı anda sona erdirilmiş, yük tamamen kaldırıldığında kalıcı yerdeğiştirme 71 mm olarak ölçülmüştür.
- Deney esnasında boyuna donatılarda ve etriyelerde bulunan gerinim ölçerlerden alınan birim şekildeğiştirmelere göre boyuna donatıların akma bölgesine ulaştığı, etriyelerde henüz akmanın görülmediği tespit edilmiştir. Böylelikle referans numunenin eğilme baskın davranış gösterdiği deneysel olarak da doğrulanmıştır.
- Deney sonunda yük uygulanan bölge çevresinde 15 mm'ye varan eğilme çatlakları ölçülmüş, kesme çatlağına rastlanmamıştır.

Darbe etkisi, farklı darbe enerji seviyelerine karşılık gelecek şekilde, farklı yüksekliklerden serbest bırakılan kütlenin yatay olarak konumlandırılan kolonlara çarpması ile oluşturulmuştur. Darbe testleri sonucunda eksenel yük değişimleri, mesnet tepkileri, yerdeğiştirmeler, donatılarda oluşan birim şekildeğiştirmeler, çatlak şekilleri ve hasar durumları incelenmiştir. Bu testler sonucunda:

- Darbe etkisi öncesinde sabit olarak uygulanan 270 kN eksenel yükün darbe etkisiyle birlikte kısa süre içinde büyük değişikliklere ulaştığı tespit edilmiştir. Görece küçük darbe enerjisine maruz kalan numunelerde (Imp-H200, Imp-H300 ve Imp-H350) darbe sonrası eksenel yük düzeyinin yaklaşık olarak başlangıç seviyesine (270 kN) ulaştığı görülmüştür. Darbe enerjisi büyük olan numunelerde ise (Imp-H400, Imp-H450 ve Imp-H500) eksenel yükün başlangıç seviyesine ulaşmadığı tespit edilmiştir. Yüksek darbe enerjisi ile birlikte boyuna donatılarda meydana gelen burkulmalar ve numunedeki büyük yerdeğiştirmeler nedeniyle bu durumun ortaya çıktığı tespit edilmiştir.
- Darbe esnasında ortalama ilk 15 ms zaman içinde mesnet tepkilerinin maksimuma ulaştığı, daha sonra dalgalanarak 50 ms sonunda sönümlendiği ortaya çıkmıştır. Mesnetlerde okunan reaksiyonların pik değerleri arasında ortalama 4 ms zaman farkının olduğu gözlenmiştir.
- Darbe etkisine yakın mesnette daha büyük reaksiyonlar elde edilmiştir. Uygulanan darbe enerjisi ile toplam mesnet tepkileri arasında doğrusal bir ilişki bulunmamakla birlikte, tamamen kesme göçmesinin görüldüğü numune dışında (Imp-H500) toplam mesnet tepkileri birbiriyle yakın değerler almıştır.
- Uygulanan darbe enerjisi görece küçük olan numunelerde (Imp-H200, Imp-H300 ve Imp-H350) darbe enerjisi arttıkça yerdeğiştirmelerin arttığı, büyük darbe enerjisine maruz kalan numunelerde ise (Imp-H400, Imp-H450 ve Imp-H500) yaklaşık olarak aynı seviyede olduğu tespit edilmiştir.
- Darbe enerjisi arttıkça numunelerde hasara neden olan davranışın eğilmeden kesmeye doğru kademeli olarak dönüştüğü saptanmıştır. Başlangıçta tamamen eğilme hasarı gözlenen numuneler (Imp-H200, Imp-H300 ve Imp-H350), enerji seviyesi arttıkça kesme ve eğilme hasarlı davranışa (Imp-H400 ve Imp-H450), nihai olarak da tamamen kesme göçmesine (Imp-H500) ulaşmıştır.
- Betonda oluşan eğilme ve kesme çatlaklarının sayısı ve genişliği darbe enerjisi ile birlikte artmıştır. Tüm numunelerde boyuna donatıların akmaya eriştiği

saptanmıştır. Düşük darbe enerjisi uygulanan numunelerde boyuna donatılarda burkulma gözlenmezken, yüksek darbe enerjisi uygulanan numunelerde boyuna donatılarda burkulmalar gözlenmiştir.

Farklı yüksekliklerden darbe etkisi uygulanan üç numune (Imp-H300, Imp-H350 ve Imp-H400) kalan kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla tekrar statik yükleme düzeneğine alınmıştır. Darbe etkisi sonucu görülen hasar sonucu tamamen kapasiteye erişen numunelere (Imp-H450 ve Imp-H500) statik testler uygulanmamıştır. Bu deneylerde yük-yerdeğiştirme ilişkileri, donatılarda oluşan birim şekildeğiştirmeler, çatlak şekilleri ve hasar durumları incelenmiştir. Deneyler sonucunda:

- Uygulanan darbe enerjisi arttıkça numunelerin artık yük taşıma kapasitelerinin önemli ölçüde azaldığı saptanmıştır. 17.22, 20.09 ve 22.96 kJ darbe enerjisine maruz bırakılan numunelerde (sırasıyla Imp-H300, Imp-H350 ve Imp-H400) darbe sonrası artık yük taşıma kapasiteleri, referans numunenin yük taşıma kapasitesine oranla (176.9 kN), sırasıyla %89, %75 ve %50 seviyesine gerilemiştir. Yaklaşık olarak 32 km/sa hızla çarpan ortalama bir otomobilin yaklaşık olarak yarısı ağırlığındaki katı bir cismin (585 kg) deneysel çalışmadaki betonarme kolonun yatay yük taşıma kapasitesini yaklaşık olarak yarısına düşürebileceği saptanmıştır. Çarpması muhtemel aracın tüm ağırlıkları ihmal edilerek sadece rijit kütle sayılabilecek motor kısmının ağırlığı (150 kg) göz önüne alınırsa bu hız değeri 64 km/sa olarak hesaplanabilir. Deneysel çalışmada üretilen kolonların ülkemizde yaygın olarak kullanılan geometride ve donatı detayında olduğu düşünülürse, tasarımda göz önüne alınan güvenlik faktörlerinin bu düzeyde bir çarpmada yetersiz kalacağı düşünülebilir.
- Başlangıçta 30.8 Gpa olarak brüt kesit rijitliği hesaplanan referans numunenin, sekant rijitliği 15.5 Gpa olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte darbe uygulanan numunelerde bu rijitliğin önemli ölçüde azaldığı saptanmıştır. Artık taşıma kapasitesi incelenen numunelerde, darbe enerjisi arttıkça sekant rijitliği değerlerinin sırasıyla %56, %51 ve %38 değerlerine kadar düştüğü görülmüştür.
- Kolonların maruz kaldığı darbe enerjisi arttıkça statik yükleme esnasında yerdeğiştirme kapasitelerinin büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Referans numunede 176.9 kN maksimum yük ile birlikte 81 mm maksimum yerdeğiştirme görülürken, 22.96 kJ darbe enerjisi uygulanan numunede (Imp-

H400) maksimum 89.0 kN yük altında, en fazla 37.8 mm'ye kadar yerdeğiştirme değerine ulaşılabılmıştır. Böylelikle darbe uygulanan numunelerin enerji yutma kapasitelerinin de büyük ölçüde azaldığı görülmüştür.

- Darbe enerjisi arttıkça, tamamen kesme hasarı görülen numune dışında (Imp-H500), daha fazla darbe enerjisinin sönümlendiği görülmüştür. Bununla birlikte statik enerji sönüm kapasitesi ise azalmıştır. Darbe enerjisinin artmasıyla birlikte, dinamik sönüm oranı %56'dan %76'ya yükselirken, statik enerji yutma kapasitesi kaybı da %53'ten %82'ye yükselmiştir.

Tez alışması kapsamında numuneler üzerinde darbe etkisi sabit %10 eksenel yük düzeyi ile test edilmiştir. Bununla birlikte LS-DYNA sonlu eleman yazılımı deneysel olarak incelenen numunelerle eşdeğer modeller, 200 cm'den başlayarak 50 cm darbe yüksekliği artışlarıyla 600 cm yüksekliğe kadar, eksenel yüksüz durum, %10, %20, %30, %40 ve %50 eksenel yüklü durumlar göz önüne alınarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal analizlerde deneysel çalışmaya benzer şekilde mesnet tepkileri, yerdeğiştirmeler, donatılarda oluşan birim şekildeğiştirmeler ve hasar durumları analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda:

- Kurulan sonlu eleman modelleriyle, deneysel olarak incelenen numuneler karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen gerilme dağılımları ile deneysel olarak incelenen numunelerde oluşan çatlak şekillerinin birbirine oldukça benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Sayısal modellerde bulunan maksimum mesnet tepkileri deneysel sonuçlarla kıyaslandıkında, sonuçların ortalama %99 oranıyla uyuştuğu görülmüş ve ortalama görelilik hata oranı %5.45 olarak hesaplanmıştır. Maksimum yerdeğiştirmelerde, sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki oran %85 iken ortalama görelilik hata oranı yaklaşık %15'tir. Sayısal analizlerde bulunan boyuna donatı ve enine donatı birim şekildeğiştirmelerinin, deneysel sonuçlarla büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür.
- Tüm eksenel yük düzeyleri için, darbe bölgesine yakın olan doğu mesnetinde batı mesnetine oranla, daha yüksek değerde mesnet reaksiyonları oluşmuştur. Darbe enerjisi artışının maksimum mesnet reaksiyonu değerinde anlamlı bir değişikliğe neden olmadıkı görülmüştür. Yine farklı eksenel yük düzeylerine sahip, aynı enerji düzeyinde darbeye maruz kalan numunelerde de benzer

şekilde mesnet reaksiyonlarında kayda değer bir değişikliğin olmadığı görülmüştür.

- Aynı eksenel yük düzeyinde, darbe enerjisi artışının yerdeğiştirmeleri artırdığı saptanmıştır.
- Aynı darbe enerjisinin uygulandığı modellerde, eksenel yük düzeyi arttıkça yerdeğiştirmelerin azaldığı görülmüştür. Ancak darbe ile birlikte boyuna donatılarda meydana gelen burkulma neticesinde, numuneyi göçme bölgesine götüren darbe enerjisine yakın bir enerji seviyesinde, yerdeğiştirmelerin tekrar artış gösterebileceği saptanmıştır.
- Aynı eksenel yük düzeyinde, darbe enerjisi artışının numune üzerinde eğilme ve kesme gerilmelerini artırdığı ve donatılarda meydana gelen birim şekildeğiştirmelerin arttığı saptanmıştır.
- Aynı darbe enerjisine maruz kalan numunelerde, eksenel yük düzeyi arttıkça eğilme ve kesme gerilmelerinin azaldığı görülmüştür. Ancak, darbe ile birlikte boyuna donatılarda meydana gelen burkulmaların göçmeye neden olan esas etken olduğu görülmüştür. Bu nedenle, her ne kadar darbenin neden olduğu gerilmeler düşük olsa da, aynı darbe enerjisine maruz kalan numunelerden eksenel yük düzeyi büyük olan numunenin, ikinci mertebe etkileri nedeniyle, göçme durumuna geçebildiği saptanmıştır.



KAYNAKLAR

- Abdelkarim, O.I. ve ElGawady, M.A.** (2017). Performance of bridge piers under vehicle collision. *Engineering Structures*, 140, 337-352. <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.054>
- Al-Bukhaiti, K., Yanhui, L., Shichun, Z., Abas, H., Nan, X., Lang, Y., Yu, Y.X. ve Daguang, H.** (2022). Experimental Study on Existing RC Circular Members Under Unequal Lateral Impact Train Collision. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16:39. <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00529-5>
- Al-Bukhaiti, K., Yanhui, L., Shichun, Z., Abas, H., Yu, Y.X., Nan, X., Daguang, H. ve Lang, Y.** (2023). Failure mechanism and static bearing capacity on circular RC members under asymmetrical lateral impact train collision. *Structures*, 48, 1817-1832. <https://doi.org/10.11016/j.istruc.2023.01.075>
- Auyeung, S., Alipour, A. ve Saini, D.** (2019). Performance-based design of bridge piers under vehicle collision. *Engineering Structures*, 191, 752-765. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.005>
- Cai, J., Ye, J.-B., Chen, Q.-J., Liu, X. ve Wang, Y.-Q.** (2018). Dynamic behaviour of axially-loaded RC columns under horizontal impact loading. *Engineering Structures*, 168, 684-697. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.095>
- Chen, A., Liu, Y., Ma, R. ve Zhou, X.** (2023). Experimental and Numerical Analysis of Reinforced Concrete Columns under Lateral Impact Loading. *Buildings*, 13, 708. <https://doi.org/10.3390/buildings13030708>
- Chen, L., Xiao, Y. ve El-Tawil, S.** (2016). Impact Tests of Model RC Columns by an Equivalent Truck Frame. *Journal of Structural Engineering*, 142(5), 04016002. [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001449](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001449)
- Demartino, C., Wu, J.G. ve Xiao, Y.** (2017). Response of shear-deficient reinforced circular RC columns under lateral impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 109, 196-213. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.06.011>
- Demartino, C., Wu, J.G. ve Xiao, Y.** (2017). Experimental and numerical study on the behavior of circular RC columns under lateral impact loading. *Procedia Engineering*, 199, 2457-2462. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.386>
- DEWE-43A.** (2023). Technical Reference Manual. DEWESoft: Trbovlje, Slovenia. <https://downloads.dewesoft.com/manuals/dewesoft-dewe-43a-manual-en.pdf> (Erişim: 10.10.2023)

- DEWESoft X.** (2023). User Manual. DEWESoft: Trbovlje, Slovenia. <https://downloads.dewesoft.com/manuals/dewesoftx-getting-started-manual-en.pdf> (Erişim: 10.10.2023)
- Do, T.V., Pham, T.M. ve Hao, H.** (2018). Numerical investigation of the behavior of precast concrete segmental columns subjected to vehicle collision. *Engineering Structures*, 156, 375-393. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.033>
- Do, T.V., Pham, T.M. ve Hao, H.** (2019). Impact Response and Capacity of Precast Concrete Segmental versus Monolithic Bridge Columns. *Journal of Bridge Engineering*, 24(6), 04019050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001415](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001415)
- Do, T.V., Pham, T.M. ve Hao, H.** (2019). Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact. *Engineering Structures*, 183, 443-458. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.040>
- Fan, W., Liu, B. ve Consolazio, G.R.** (2019). Residual Capacity of Axially Loaded Circular RC Columns after Lateral Low-Velocity Impact. *Journal of Structural Engineering*, 145(6), 04019039. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002324](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002324)
- Gholipour, G., Zhang, C. ve 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. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.055>
- Gurbuz, T., Ilki, A., Thambiratnam, D.P. ve Perera, N.** (2019). Low-Elevation Impact Tests of Axially Loaded Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 116 (1), 17-449. <https://doi.org/10.14359/51710862>
- Hu, B., Cai, J. ve Jiabin, Y.** (2021). Numerical Simulation of Dynamic Response and Evaluation of Flexural Damage of RC Columns under Horizontal Impact Load. *Applied Sciences*, 11, 11223. <https://doi.org/10.3390/app112311223>
- Li, R.W., Zhou, D.Y. ve Wu, H.** (2020). Experimental and numerical study on impact resistance of RC bridge piers under lateral impact loading. *Engineering Failure Analysis*, 109, 104319. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104319>
- Li, X., Yin, Y., Li, T., Zhu, X. ve Wang, R.** (2023). Analytical Study on Reinforced Concrete Columns and Composite Columns under Lateral Impact, *Coatings*, 13, 152. <https://doi.org/10.3390/coatings13010152>
- Liu, B., Fan, W., Guo, W., Chen, B. ve Liu, R.** (2017). Experimental investigation and improved FE modeling of axially-loaded circular RC columns under lateral impact loading. *Engineering Structures*, 152, 619-642. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.009>
- LS-DYNA.** (2019). Theory Manual. Livermore Software Technology: Livermore, CA, USA.
- LS-DYNA.** (2021). Keyword User's Manual Volume 1. Livermore Software Technology: Livermore, CA, USA.

- LS-DYNA.** (2021). Keyword User's Manual Volume 2. Livermore Software Technology: Livermore, CA, USA.
- Mirmomeni, M., Heidarpour, A., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. ve Packer, J.A.** (2016). Size-dependency of concrete-filled steel tubes subject to impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 100, 90-101. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.11.003>
- Remennikov, A. ve Kaewunruen, S.** (2006). Impact resistance of reinforced concrete columns: experimental studies and design considerations. *University of Wollongong Research Online*. <http://ro.uow.edu.au/engpapers/379>
- Sharma, H., Hurlebaus, S. ve Gardoni, P.** (2012). Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact. *International Journal of Impact Engineering*, 43, 52-62. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.11.007>
- Sohel, K.M.A., Al-Jabri, K. ve Al Abri, A.H.S.** (2020). Behavior and design of reinforced concrete building columns subjected to low-velocity car impact. *Structures*, 26, 601-616. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.054>
- Song, Y., Wang, J. ve Han, Q.** (2023). Dynamic performance of flexure-failure-type rectangular RC columns under low-velocity lateral impact. *International Journal of Impact Engineering*, 175, 104541. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104541>
- Tantrapongsaton, W., Hansapinyo, C., Limkatanyu, S., Zhang, H. ve Vimonsatit, V.** (2022). Nonlinear Response of RC Columns Subjected to Equal Energy-Double Impact Loads. *Buildings*, 12, 1420. <https://doi.org/10.3390/buildings12091420>
- Thilakarathna, H.M.I., Thambiratnam, D.P., Dhanasekar M. ve Perera, N.** (2010). Numerical simulation of axially loaded concrete columns under transverse impact and vulnerability assessment. *International Journal of Impact Engineering*, 37, 1100-1112. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.06.003>
- TDS-540.** (2023). Data Logger Catalog. Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.: Tokyo, Japan. https://www.tml.jp/eng/documents/Catalog/TDS-540_E3011F.pdf (Erişim: 10.10.2023)
- TDS-7130v2.** (2023). Static Measurement Software Catalog. Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.: Tokyo, Japan. https://tml.jp/eng/documents/software/TDS-7130v2_E8002A.pdf (Erişim: 10.10.2023)
- TS 500.** (2000). *Betonarme Yapıların tasarım ve yapım kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 708.** (2016). *Çelik-Betonarme için-Donatı Çeliği*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3.** (2019). *Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Wang, W. ve Morgenthal, G.** (2017). Dynamic analyses of square RC pier column subjected to barge impact using efficient models. *Engineering Structures*, 151, 20-32. <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.003>
- Wang, X., Zhang, Y., Su, Y. ve Feng, Y.** (2011). Experimental Investigation on the Effect of Reinforcement Ratio to Capacity of RC Column to Resist Lateral Impact Loading. *International Conference on Risk and Engineering Management*, 35-41. doi:10.1016/j.sepro.2011.08.007
- Wei, J., Li, J., ve Wu, C.** (2019). An experimental and numerical study of reinforced conventional concrete and ultra-high performance concrete columns under lateral impact loads. *Engineering Structures*, 156, 375-393. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109822>
- Ye, J.-B., Cai, J., Chen, Q.-J., Xinpei, L., Tang, X.-L. ve Zuo, Z.L.** (2020). Experimental investigation of slender RC columns under horizontal static and impact loads. *Structures*, 24, 499-513. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.034>
- Ye, J., Wang, Y., Cai, J., Chen, Q. ve He, A.** (2022). Evaluation of Residual Lateral Capacities of Impact Damaged Reinforced Concrete Members. *Buildings*, 12, 669. <https://doi.org/10.3390/buildings12050669>
- Yilmaz, A., Kiraç, N. ve Anil, Ö.** (2019). Experimental investigation of axially loaded reinforced concrete square column subjected to lateral low-velocity impact loading, *Structural Concrete*, 20, 1358-1378. <https://doi.org/10.1002/suco.201800276>
- Yunlei, W., Lu, Z., Hai, F., Weiqing, L. ve Yifeng, M.** (2019). Experimental testing and numerical simulations of ship impact on axially loaded reinforced concrete piers. *International Journal of Impact Engineering*, 125, 246-262. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.016>
- Yuan, P. ve Harik, I.E.** (2010). Equivalent Barge and Flotilla Impact Forces on Bridge Piers. *Journal of Bridge Engineering*, 15(5), 523-532. https://doi.org/10.1061/_ASCE_BE.1943-5592.0000080
- Zhang, X., Hao, H. ve Li, C.** (2016). Experimental investigation of the response of precast segmental columns subjected to impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 95, 105-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.05.005>
- Zhao, W. ve Qian, J.** (2020). Resistance mechanism and reliability analysis of reinforced concrete columns subjected to lateral impact. *International Journal of Impact Engineering*, 136, 103413. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103413>
- Zhou, X., Ming, Z., Luo, D., Wu, B. ve Liu, L.** (2021). Study on the nonlinear response and shear behavior of RC columns under lateral impact. *Structures*, 34, 3834-3850. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.094>

EKLER

EK A: LS-DYNA ile modelleme aşamaları



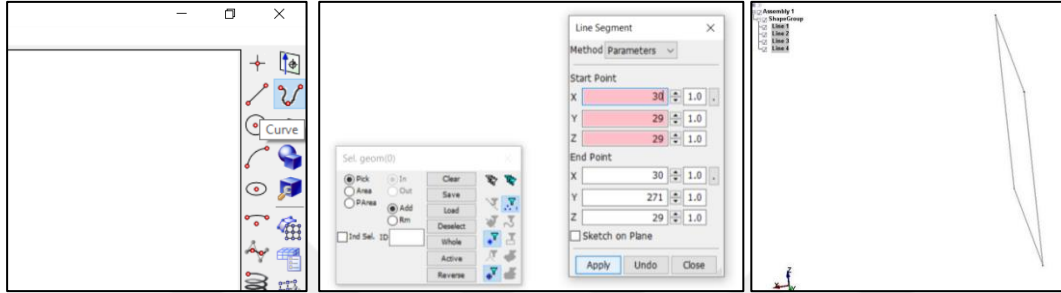
EK A: LS-DYNA ile modelleme aşamaları

Geometrinin Modellenmesi

Öncelikler modellenecek kolona ait etriyelerin, boyuna donatıların ve betonarme kolonun koordinatlarının oluşturulması gerekir. Bu amaçla kolon geometrisine uygun olarak koordinatlar hazırlanır.

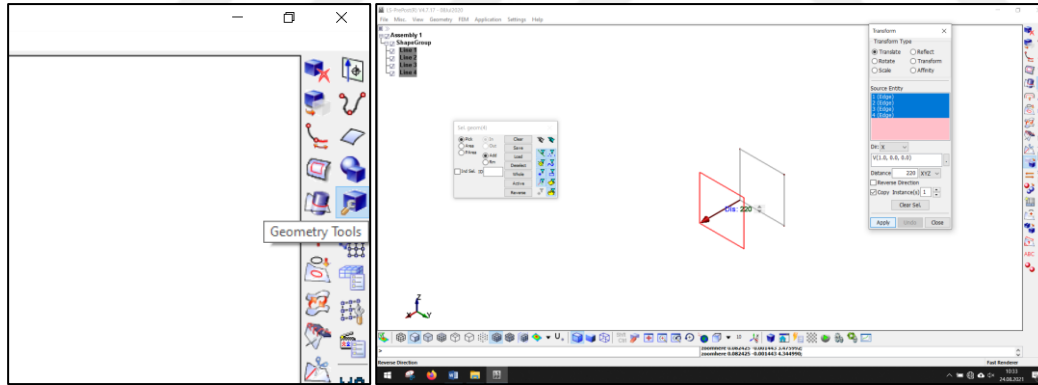
Etriyelerin modellenmesi

Sağ menüden *Curve* → *Line* yolu ile ilk etriyenin koordinatları girilir.



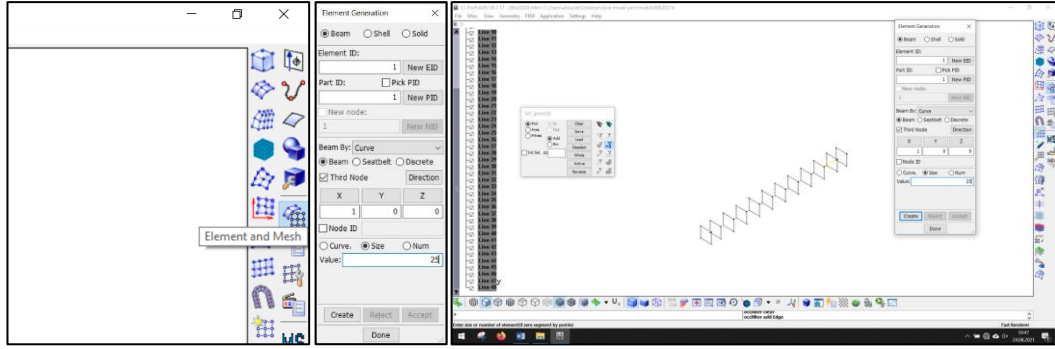
Şekil A.1 : Curve ve line komutunun kullanımı.

Bir etriye takımı (4 adet line) oluşturulduktan sonra etriyeler kopyalanır. Bunun için sağ menüden *Geometry Tools* → *Transform* yolu izlenerek etriyelerin kopyalanması sağlanır. Etriyeler kopyalanırken her etriyenin tek tek kopyalanması etriye grubunu oluşturan çizgilerin sırasının karışmaması açısından önemlidir.



Şekil A.2 : Etriyelerin oluşturulması.

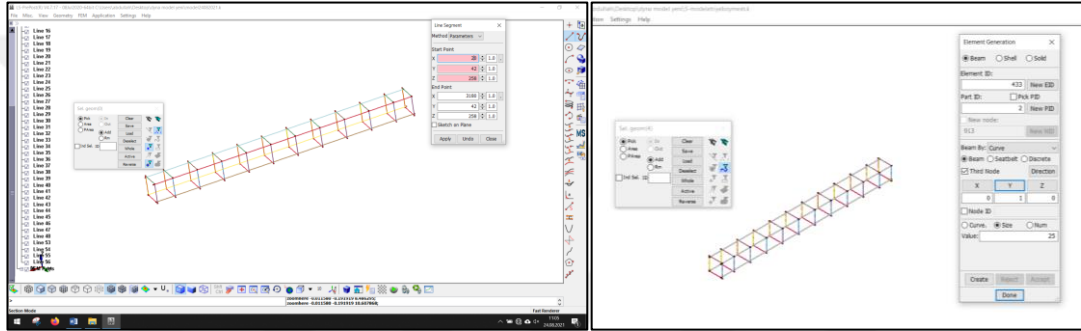
Etriyelerin sonlu elemanlara bölünmesi için sol tarafta bulunan listeden tüm çizgiler seçilir. *Element and Mesh* → *Element Generation* menüsünden *Curve* ve *Size* seçenekleri aktifleştirilir. Mesh yapılacak değer *Value* kısmına girilir soldan tüm çizgiler seçilir ve *Create* → *Accept* → *Done* kutucukları tıklanarak etriyelerin sonlu elemanlara bölünmesi sağlanmış olur. Burada önemli olan mesh yapılacak doğrultunun belirlenmesidir (X, Y, Z). Yön olarak mesh yapılması istenen doğrultuya dik doğrultu seçilmelidir. Örneğin Z doğrultusunda uzanan bir kolon boyuna donatısı için yön X veya Y seçilmelidir.



Şekil A.3 : Etriye grubunun oluşturulması.

Boyuna donatıların modellenmesi

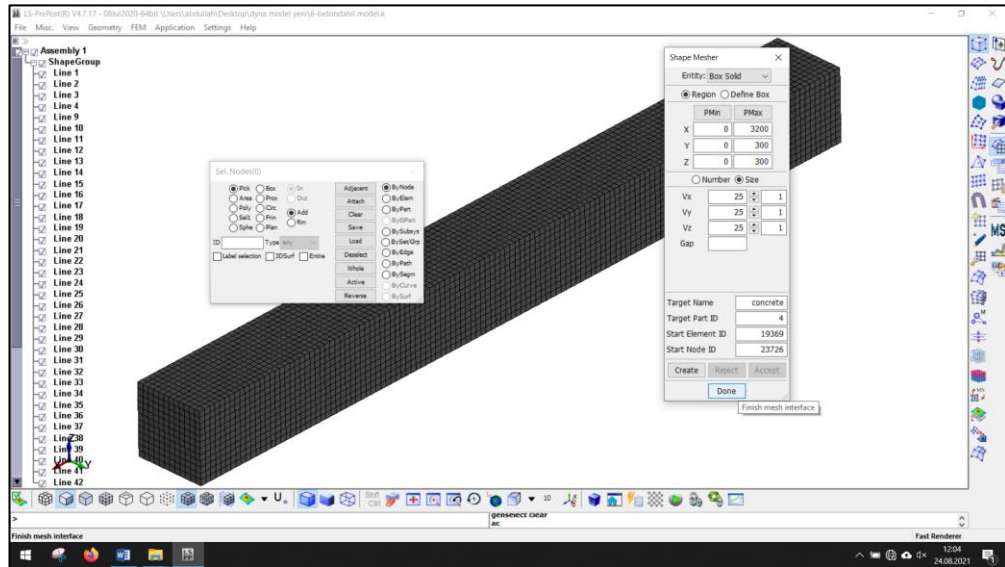
Boyuna donatılar da etriyelere benzer şekilde tanımlanır. Yalnızca *Element Generation* değerleri girilirken mesh yönüne dikkat edilmelidir.



Şekil A.4 : Donatı kafesinin oluşturulması.

Betonun Modellenmesi

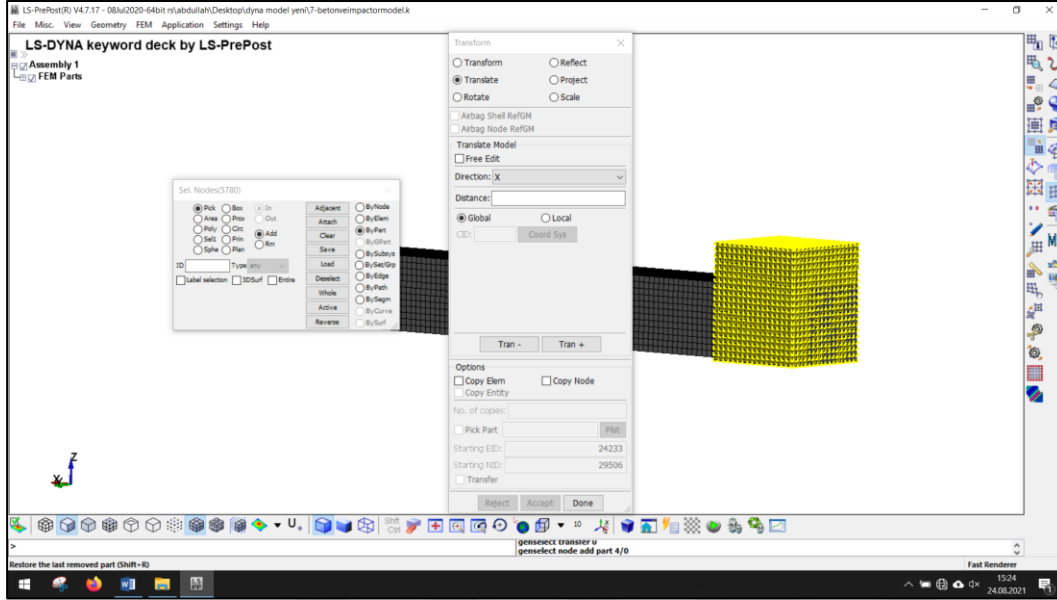
Betonun modellenmesi *Element and Mesh* → *Shape Mesher* yoluyla yapılır. Kolonun dış kenar koordinatları P_{min} ve P_{max} bölümlerine girilir. Size kısmı aktifleştirilerek Mesh boyutu ayarlanır. *Create* → *Accept* → *Done* kutucukları tıklanarak kolon modellemesi tamamlanır.



Şekil A.5 : Betonun modellenmesi.

Darbe ağırlığının (Impactor) tanımlanması

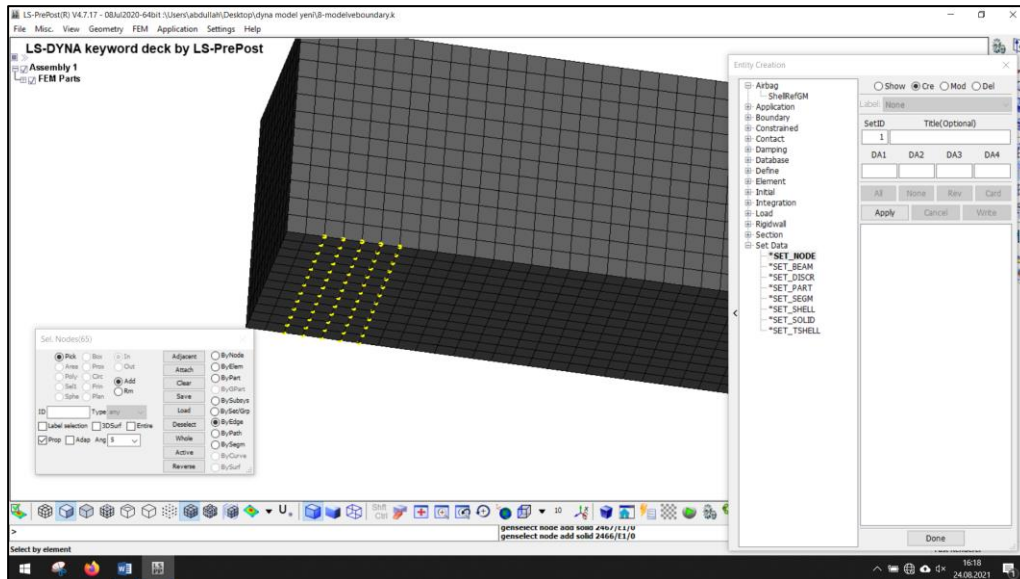
Impactorun modellenmesi, betona benzer şekilde, *Element and Mesh* → *Shape Mesher* yoluyla yapılır. Impactorun dış kenar koordinatları P_{min} ve P_{max} bölümlerine girilir. *Size* kısmı aktifleştirilerek Mesh boyutu ayarlanır. *Create* → *Accept* → *Done* kutucukları tıklanarak kolon modellemesi tamamlanır. *Element Tools* → *Transform* → *By Part* yoluyla impactor istenen bölgeye taşınır.



Şekil A.6 : Darbe ağırlığının modellenmesi.

Düğüm noktası gruplarının tanımlanması (Node Set)

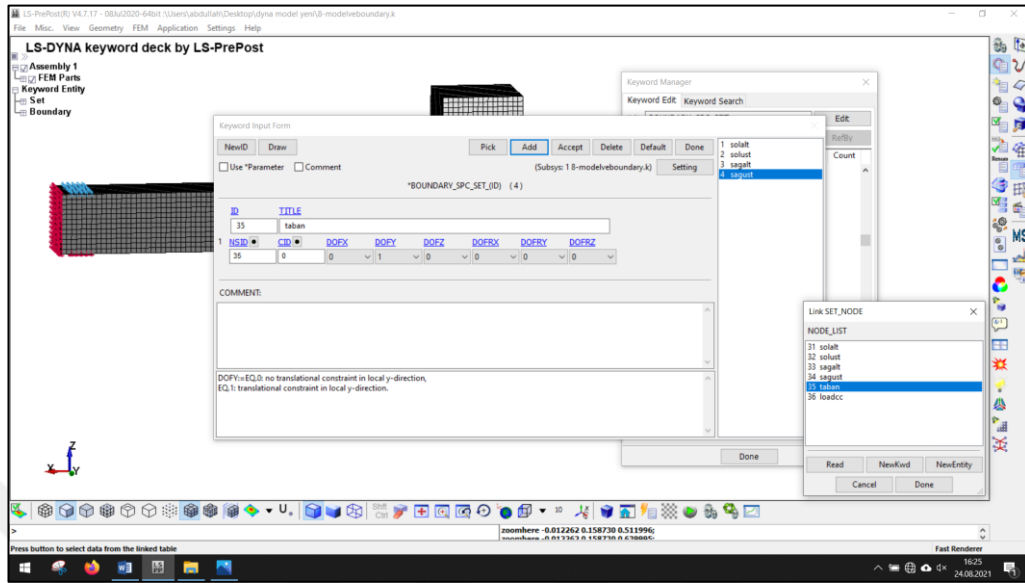
Sınır koşulları belirlenmeden önce tanımlanacak düğüm noktalarının gruplandırılması gerekir. Bu amaçla *Model and Part* → *Create Entity* → *Set Data* → *Set Node* → *By Edge* → *Prop* → *Angle 5* yoluyla noktalar seçilerek *Node Set*'ler oluşturulur. Her mesnet ve eksenel yük düzeyi için gruplar tanımlanır.



Şekil A.7 : Düğüm noktalarının tanımlanması.

Sınır koşullarının tanımlanması (Boundary Conditions)

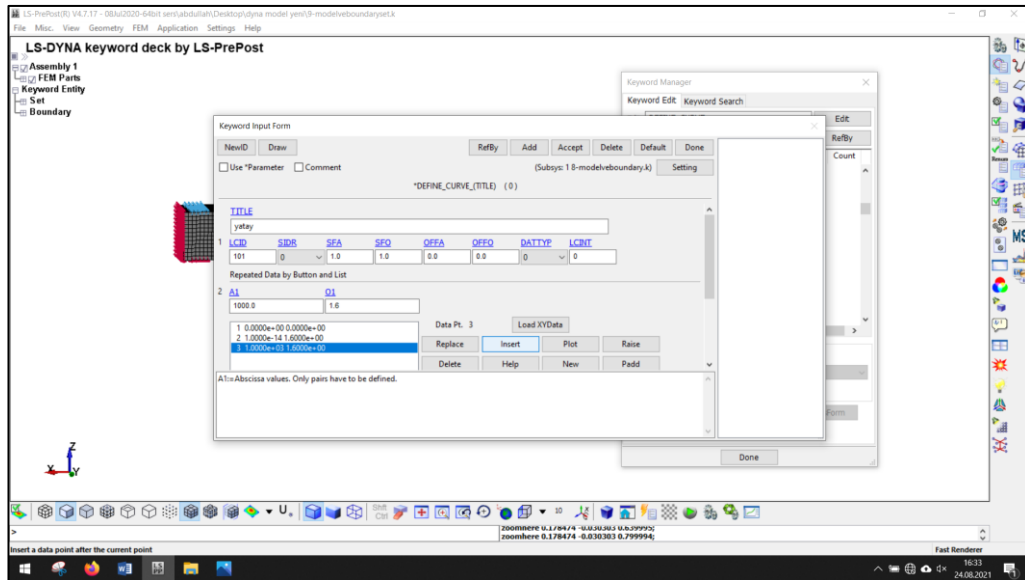
Düğüm noktası grupları (node set) oluşturulduktan sonra *Model and Part* → *Keyword Manager* → *Boundary* → *Spc Set* yoluyla sınır koşulları tanımlanır.



Şekil A.8 : Sınır koşullarının tanımlanması.

Eksenel Yükün Tanımlanması

Model and Part → *Keyword Manager* → *Define* → *Curve* yoluyla eksenel yük düzeyi tanımlanır. Eksenel yük düğüm noktalarına tanımlandığı için toplam yük, yük uygulanacak düğüm noktası sayısına bölünür.

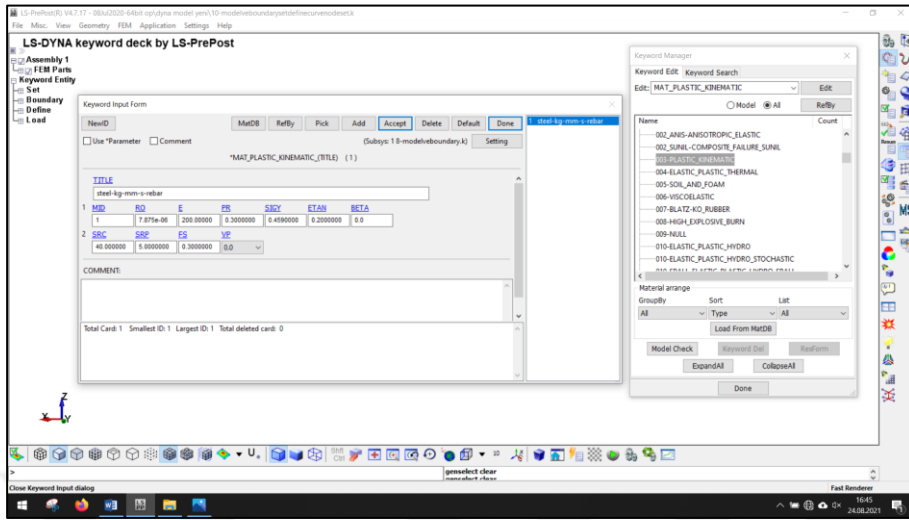


Şekil A.9 : Eksenel yükün tanımlanması.

Eksenel yük tanımlandıktan sonra *Model and Part* → *Keyword Manager* → *Load* → *Node_Set* yoluyla eksenel yük uygulanacak node set, yön, ve tanımlanan yük girdileri yapılır.

Donatıların tanımlanması

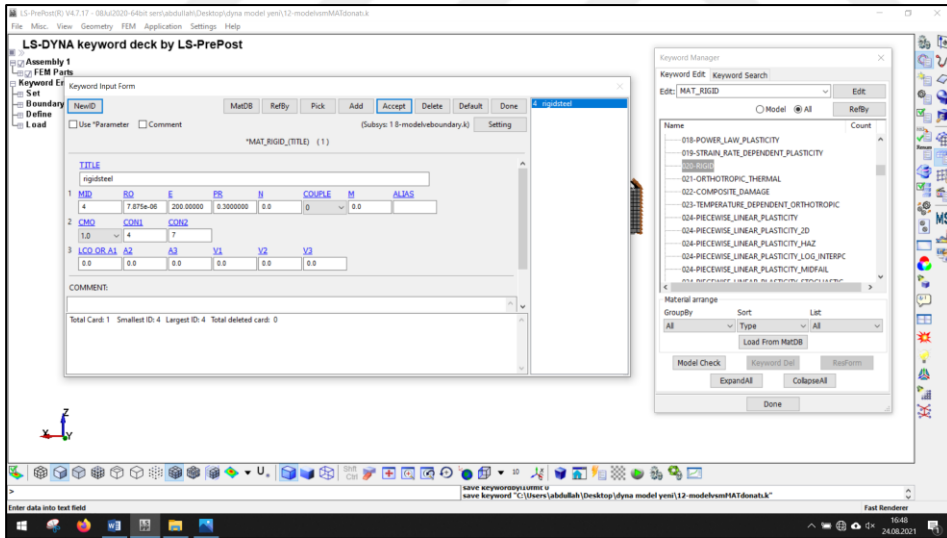
Donatıların tanımlanması *Model and Part* → *Keyword Manager* → *Mat* → *003-Plastic_Kinematic* yoluyla yapılır.



Şekil A.10 : Donatıların tanımlanması.

Darbe ağırlığının tanımlanması

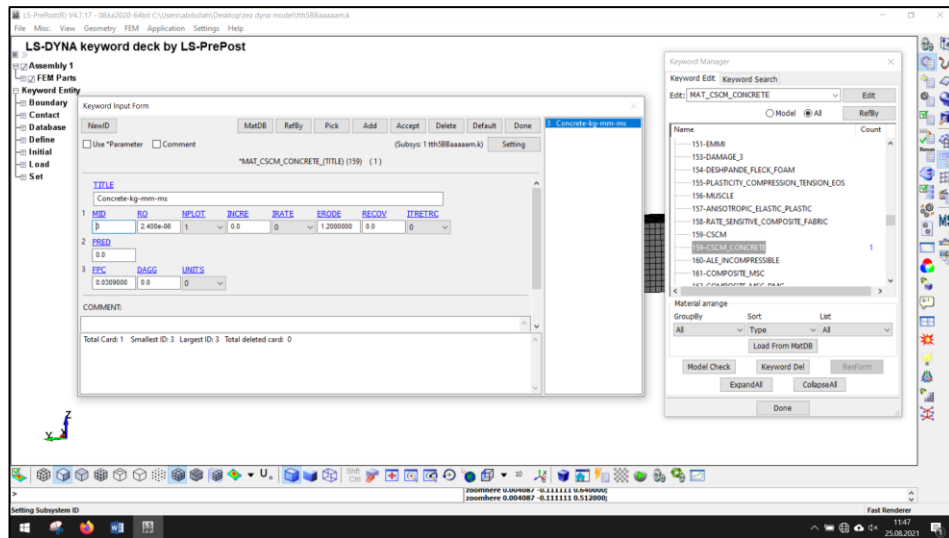
Darbe ağırlığının tanımlanması *Model and Part* → *Keyword Manager* → *Mat* → *020-Rigid* yoluyla yapılır.



Şekil A.11 : Darbe ağırlığının tanımlanması.

Betonun tanımlanması

Betonun tanımlanması *Model and Part* → *Keyword Manager* → *Mat* → *159-Cscm_Concrete* yoluyla yapılır.



Donatıların (Beam) tanımlanması

Donatıların tanımlanması *Model and Part*→*Keyword Manager*→*Section*→*Beam* yoluyla yapılır. Burada boyuna donatıların çapları, şekilleri girilir.

Betonun ve Impactorun (Solid) tanımlanması

Betonun ve darbe ağırlığının tanımlanması *Model and Part*→*Keyword Manager*→*Section*→*Solid* yoluyla yapılır.

Diğer tanımlamalar

Bölümlerin tanımlanması *Model and Part* $\rightarrow$ *Keyword Manager* $\rightarrow$ *Part* $\rightarrow$ *Part* yoluyla yapılır. Kesit ve malzemelerin eşlenerek atanması sağlanır.

Constrained tanımlanması *Model and Part*→*Keyword Manager*→*Set*→*Partlist* yoluyla öncelikle donatılar gruplandırılır. Daha sonra *Model and Part*→*Keyword Manager*→*Constrained*→*Lagrange_in_solid* yoluyla *Slave* rebars ve *Master* concrete seçilerek tamamlanır. Beton ve donatı ilişkisi tanımlanmış olur.

Contact yüzeyin tanımlanması *Model and Part* → *Keyword Manager* → *Contact* → *Automatic_surface_to_surface* yoluyla *Slave* impactor ve *Master* concrete seçilerek tamamlanır. Beton ve impactor yüzey ilişkisi tanımlanmış olur.

Control Termination tanımlanması *Model and Part* → *Keyword Manager* → *Control* → *Termination* yoluyla tanımlanmış olur.

Control Termination tanımlanması Model and Part $\rightarrow$ Keyword
 Manager $\rightarrow$ Initial $\rightarrow$ Velocity_generation yoluyla tanımlanmış olur.

Control Termination tanımlanması Model and Part → Keyword
Manager → Database → Binary_D3plot yoluyla tanımlanmış olur.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Abdullah CENGİZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2007-2015, İnşaat Mühendisi, Boğaziçi Üniversitesi
- 2015-2020, İnşaat Mühendisi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- 2020-2022, İnşaat Mühendisi, UAB AYGM DLH Marmaray Bölge Müdürlüğü
- 2022-2024, İnşaat Mühendisi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- 2024-....., İnşaat Mühendisi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Cengiz A., Gurbuz, T., Ilki, A., Aydoğan, M.** 2023. Dynamic and Residual Static Behavior of Axially Loaded RC Columns Subjected to Low-Elevation Impact Loading. *Buildings*, 14 (1), 92. <https://doi.org/10.3390/buildings14010092>

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gurbuz, T., Cengiz A., Kolemenoglu, S., Demir, C., Ilki, A.** 2023. Damages and failures of structures in Izmir (Turkey) during the October 30, 2020 Aegean Sea earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 27 (6), 1565-1606. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2086186>