CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON KİRİŞLERİN ÇARPMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Erkan KANTAR

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2009
ANKARA

Erkan KANTAR tarafından hazırlanan CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON KİRİŞLERİN ÇARPMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. Özgür ANIL
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüsnü CAN
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Özgür ANIL
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA
Mimarlık, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Tekin GÜLTOP
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Uğurhan AKYÜZ
İnşaat Mühendisliği, ODTÜ

Tarih: 19/02/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Erkan KANTAR

CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON KİRİŞLERİN ÇARPMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Erkan KANTAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2009

ÖZET

Beton inşaat sektöründe kullanılan en yaygın yapı malzemesi olmaya devam etmektedir. Önemli bir yapı malzemesi olan betonun ekonomik ömrü boyunca karşılaştığı dış etkilerden birisi de çarpma etkisidir. Çarpma yüklemesi büyüklüğü, etki zamanı ve oluşturduğu deformasyonların hesaplanması karışık olan ve az bilinen bir yükleme türüdür. Betonun çarpma dayanımının ve davranışının belirlenmesi için henüz bir yönetmelik veya standart test düzeneği mevcut olmayıp bu konudaki bilimsel araştırmalar devam etmektedir. Betonun çarpma davranışı ile ilgili araştırmalar sınırlı sayıda olmasına rağmen son yıllarda betonun çarpma davranışının incelenmesi için ağırlık düşürme yöntemi kullanılarak yapılmış olan çalışmaların sayısı artış göstermiştir. Ayrıca çarpma dayanımı ve davranışının iyileştirilmesi için yapılabilecek güçlendirmeler ile ilgili çalışmalar ise son derece sınırlıdır. Bu nedenle düzenlenen deneysel çalışma kapsamında, normal ve yüksek dayanımlı beton kiriş numuneleri inşaat sektöründe güçlendirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Karbon Takviyeli Elyaf Kumaşlar (CFRP) ile güçlendirilmiştir. Çarpma etkisi altında göstermiş oldukları davranış farkları araştırılmıştır. Deney programında 5 adet normal ve 5 adet yüksek dayanımlı betondan üretilen toplam 10 adet dikdörtgen kesitli beton kiriş test edilmiştir. Deney elemanları özdeş olarak CFRP şeritler ile güçlendirilmiş ve farklı yüksekliklerden düşürülen sabit ağırlıklı çekicin yaratmış olduğu çarpma etkisi altında test edilmiştir. Deney

elemanlarına 750, 700, 650, 600 ve 550 mm yükseklikten sabit ağırlığa ve geometriye sahip çekiç düşürülerek test yapılmıştır. Deneysel çalışmada CFRP şerit genişliği, uzunluğu sabit olup incelenen değişkenler beton basınç dayanımı ve düşme yüksekliği olarak belirlenmiştir. Deney elemanlarından alınan ivme ölçümleri kullanılarak deney elemanlarının hız, deplasman ve enerji kapasiteleri hesaplanmıştır. Deney elemanlarının dayanımlarındaki, çekiç düşme sayısındaki, ivme değerlerindeki ve göçme mekanizmalarındaki değişimler incelemiş ve normal ile yüksek dayanımlı deney serilerindeki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca Abaqus sonlu eleman yazılımı kullanılarak deneysel çalışma kapsamında incelenen çarpma testinin bilgisayar ortamında simülasyonu yapılmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçları deneysel sonuçlar karşılaştırılarak doğrulanmış bir sonlu eleman modeli oluşturulması için çalışmalar yapılmıştır.

Bilim Kodu : **911.1.143**
Anahtar Kelimeler : **Çarpma, beton, düşen ağırlık, CFRP**
Sayfa Adeti : **241**
Tez Yöneticisi : **Doç. Dr. Özgür ANIL**

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF IMPACT BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM STRENGTHENED WITH CFRP
(Ph. D. Thesis)

Erkan KANTAR

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
February 2009

ABSTRACT

Concrete widely used as structural building materials in civil engineering applications. One of the major external forces effects on the concrete structures is the impact forces throughout its economical life. The determination of the magnitude, the excitation time and the deformations due to impact loading is a complicated and rarely known subject. There are no certain solid regulations or standard test setups for determining the impact strength and behavior of concrete. Although there are some limited studies about impact behavior of concrete. The number of the studies which is including the drop weight impact tests on concrete as a impact method recently increased. In addition to that, the studies on the strengthening of concrete structures against impact loading are few in the literature. In this study, the high and low strength RC beam specimens are strengthened with CFRP and tested under impact loading experimentally. The behavioral difference between the normal and strengthened specimens under impact loading were observed and reported. Total 10 rectangular cross sectioned RC beams with coverage and high strength concrete specimens were tested. The specimens were strengthened similarly with CFRP strips and tested under the drop weight impact test apparatus with constant weight hammer but different drop heights. The hammer which has a constant weight and geometry was dropped from 750, 700, 650, 600 and 550 mm height. The concrete compression strength and the drop heights are the major

investigation parameters of the experimental study. The CFRP strip width and its length were kept constant. Drop velocity, displacement and energy dissipation capacities of the specimens were calculated through the acceleration instrumentations on the specimens. The variations of the strength, the number of the drops, accelerations, and failure mechanisms were investigated and the results taken from normal and high compression strength concrete specimens were compared. In addition, computer simulations of the same experimental impact test are performed by using Abaqus finite element software. The results of finite element analysis and experimental studies were compared, and finite element model was compared with that of the experimental results. As a result of finite element analysis a confirmed finite element model was established for the future studies.

Science Code : 911.1.143
Key Words : Impact, concrete, drop weight, CFRP
Page Number : 241
Adviser : Assoc. Prof. Dr. Özgür ANIL

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında ve üniversitedeki görevinden ayrılmasına rağmen tezin tamamlanmasına kadar geçen sürede çalışmalarıma katkısının devam etmesinden dolayı Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN'a, tamamlanmasında ki katkılarından dolayı danışman hocam Doç. Dr. Özgür ANIL'a, çalışmamın başlamasından tamamlanmasına kadar geçen sürede Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün tüm imkanlarından faydalanmamı sağlayan bölüm başkanımız Prof. Dr. Tekin GÜLTOP'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmasında kullanılan deney düzeneğinin ve ölçüm aletlerinin alınması Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi 06/2006-35 nolu BAP projesi kapsamında gerçekleşmiştir. Bu imkanı sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca, her zaman yanımda olan ve kendilerine ayıramadığım zamanlardan dolayı bana katlanan, sonsuz desteklerini esirgemeyen eşim Gülsüm'e, kızım Şevval Serra'ya ve oğlum Yağız Burak'a ve çalışmam tamamlanıncaya kadar maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anneme, babama, kardeşime ve eşimin ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ix

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xiii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xv

RESİMLERİN LİSTESİ xxiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xxvii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 6

3. DENEY ve ÖLÇÜM DÜZENEĞİ 30

3.1. Ağırlık Düşürücü Deney Düzeneği 30

3.2. İvmeölçerler 35

3.2.1. Genel bilgi 35

3.2.2. Piezoelektrik ivmeölçerler 38

3.2.3. Kapasitif ivmeölçerler 39

3.2.4. Deneylerde kullanılan ivmeölçer: Model 353B02 39

3.3. Kuvvet Algılayıcısı 42

3.3.1. Genel bilgi 42

3.3.2. Halka kuvvet algılayıcıları 42

3.3.3. Deneylerde kullanılan halka kuvvet algılayıcı: 201B03 Model ICP® 43

Sayfa

3.4. Veri Toplayıcı 45
3.4.1. Genel bilgi 45
3.4.2. Deneylerde kullanılan veri toplayıcı: NI 9233-USB-9162 45
3.5. Ölçüm Aygıtları Bağlantı Kabloları 46
3.6 Optik Fotosel 47
4. DENEYSEL ÇALIŞMA 49
4.1. Genel Bilgi 49
4.2. Malzeme Özellikleri 50
4.2.1. Agrega 50
4.2.2. Su 50
4.2.3. Çimento 51
4.2.4. Kimyasal katkı 52
4.2.5. Silis dumanı 54
4.2.6. Epoksi 56
4.2.7. Karbon takviyeli elyaf kumaş: CFRP 62
4.2.8. Kauçuk 66
4.2.9. Beton 67
4.3. Deney Elemanları 70
4.4. Deney Elemanlarının Deneye Hazırlanması 72
5. DENEYLER 79
5.1. Genel Bilgi 79
5.2. SC1 Deney Elemanı 81
5.3. SC2 Deney Elemanı 90

Sayfa

5.4. SC3 Deney Elemanı 99
5.5. SC4 Deney Elemanı 108
5.6. SC5 Deney Elemanı 117
5.7. SC6 Deney Elemanı 126
5.8. SC7 Deney Elemanı 135
5.9. SC8 Deney Elemanı 144
5.10. SC9 Deney Elemanı 154
5.11. SC10 Deney Elemanı 164
5.12. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 174
6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZ 181
6.1. Genel Bilgi 181
6.2. Modelin Oluşturulması 182
6.3. Malzeme Özellikleri 183
6.4. Analiz Çalışması 185
6.5. Analiz Sonuçlarının Deney Sonuçları İle Karşılaştırılması 190
6.5.1. SC1 Deney elemanı ile 1. analizin karşılaştırması 190
6.5.2. SC2 Deney elemanı ile 2. analizin karşılaştırması 193
6.5.3. SC3 Deney elemanı ile 3. analizin karşılaştırması 196
6.5.4. SC4 Deney elemanı ile 4. analizin karşılaştırması 198
6.5.5. SC5 Deney elemanı ile 5. analizin karşılaştırması 201
6.5.6. SC6 Deney elemanı ile 6. analizin karşılaştırması 204
6.5.7. SC7 Deney elemanı ile 7. analizin karşılaştırması 206
6.5.8. SC8 Deney elemanı ile 8. analizin karşılaştırması 209

Sayfa

6.5.9. SC9 Deney elemanı ile 9. analizin karşılaştırması 212

6.5.10. SC10 Deney elemanı ile 10. analizin karşılaştırması 214

6.6. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 217

6.7. Enerji Dengesi Prensibi İle Kinetik Enerji Değerlerinin Hesaplanması 220

6.8. Deney Kinetik Enerji Değerleri İle Abaqus Kinetik Enerji Değerlerinin Karşılaştırılması 225

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 232

KAYNAKLAR 238

ÖZGEÇMİŞ 240

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. İstatistiksel çalışmaya ait sonuçlar 16

Çizelge 2.2. Deneysel çalışmaya ait sonuçlar 19

Çizelge 3.1. Kestamit malzemesinin temel özellikleri 33

Çizelge 3.2. Model 353B02 İvmeölçerin teknik özellikleri 41

Çizelge 3.3. 201B03 Model ICP halka kuvvet algılayıcısı teknik özellikleri 44

Çizelge 3.4. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı teknik özellikleri 46

Çizelge 4.1. PÇ 42,5 CEM I 42,5 R Portland çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri 51

Çizelge 4.2. Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 36 yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcının özellikleri 52

Çizelge 4.3. SikaFume®-HR Silis dumanı (Silica Fume) içeren toz beton katkısının özellikleri 54

Çizelge 4.4. Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesinin özellikleri 56

Çizelge 4.5. SikaWrap®-230 C Yapısal güçlendirme için örgülü karbon lifli elyafın özellikleri 64

Çizelge 4.6. Neopren tipi kauçuk malzemenin özellikleri 67

Çizelge 4.7. Normal dayanımlı deney elemanlarındaki karışım oranları 68

Çizelge 4.8. Yüksek dayanımlı beton karışım oranları 69

Çizelge 4.9. Beton silindir numunelerin test sonuçları 70

Çizelge 4.10. Deney elemanlarının boyutları, adları ve dayanım sınıfları 72

Çizelge 5.1. Deney sonuçları 80

Çizelge 5.2. SC1 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 83

Çizelge 5.3. SC2 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 92

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.4. SC3 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 101

Çizelge 5.5. SC4 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 110

Çizelge 5.6. SC5 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 119

Çizelge 5.7. SC6 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 128

Çizelge 5.8. SC7 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 137

Çizelge 5.9. SC8 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 146

Çizelge 5.10. SC9 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 156

Çizelge 5.11. SC10 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar 166

Çizelge 5.12. Deneylerden elde edilen maksimum ve minimum ivme, hız ve deplasman değerleri 180

Çizelge 6.1. Normal dayanımlı beton malzemesine ait özellikler 184

Çizelge 6.2. Yüksek dayanımlı beton malzemesine ait özellikler 184

Çizelge 6.3. Çelik malzemesine ait özellikler 184

Çizelge 6.4. Kauçuk malzemesine ait özellikler 184

Çizelge 6.5. CFRP malzemesine ait özellikler 185

Çizelge 6.6. Kinetik enerji maksimum değerleri 231

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1 Temel geometrik model 13

Şekil 3.1. Ağırlık düşürücü deney düzeneğinin tasarım şeması 31

Şekil 3.2. Piezo yapı 36

Şekil 3.3. Piezoelektrik algılayıcılarda piezo malzeme şekilleri
a. Basınç b. Eğilme c. Kayma 36

Şekil 3.4. Piezoelektrik algılayıcılar a. Kuvvet b. Basınç
c. İvme algılayıcıları 38

Şekil 3.5. İvmeölçerlerin montaj şekilleri ve yüksek frekansa etkileri
1. Vida ile 2. Yapıştırıcı ile 3. Montaj pedi ile
4. Düz mıknatıs ile 5. Çift taraflı mıknatıs ile
6. El çubuğu ile(Manual) 40

Şekil 3.6. Halka kuvvet algılayıcısı montaj şekli 44

Şekil 3.7. 003A20 Model kablo iç yapısı 47

Şekil 4.1. Deney numuneleri ve ölçüm aleti yerleşimleri, a) Ön görünüş,
b) Üst görünüş 73

Şekil 5.1. SC1 Deney elemanının 1. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 84

Şekil 5.2. SC1 Deney elemanın 6. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 85

Şekil 5.3. SC1 Deney elemanın 19 düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 86

Şekil 5.4. SC1 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a) 1. düşü b) 6. düşü c) 19. düşü 87

Şekil 5.5. SC1 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 1. düşü b) 6. düşü c) 19. düşü 88

Şekil 5.6. Kuvvetölçerden elde edilen değerler 90

Şekil 5.7. SC2 Deney elemanının 2. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 93

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.8. SC2 Deney elemanın 12. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 94

Şekil 5.9. SC2 Deney elemanın 24. düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 95

Şekil 5.10. SC2 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a) 2. düşü b) 12. düşü c) 24. düşü 96

Şekil 5.11. SC2 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşü b) 12. düşü c) 24. düşü 97

Şekil 5.12. SC3 Deney elemanının 2. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 102

Şekil 5.13. SC3 Deney elemanın 11. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 103

Şekil 5.14. SC3 Deney elemanın 34. düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 104

Şekil 5.15. SC3 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a)2. düşü b) 11. düşü c) 34. düşü 105

Şekil 5.16. SC3 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a)2. düşü b) 11. düşü c) 34. düşü 106

Şekil 5.17. SC4 Deney elemanının 4. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 111

Şekil 5.18. SC4 Deney elemanın 20 düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 112

Şekil 5.19. SC4 Deney elemanın 29 düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 113

Şekil 5.20. SC4 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a)4. düşü b) 20. düşü c) 29. düşü 114

Şekil 5.21. SC4 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a)2. düşü b) 11. düşü c) 34. düşü 115

Şekil 5.22. SC5 Deney elemanının 1. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 120

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.23. SC5 Deney elemanın 36. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 121

Şekil 5.24. SC5 Deney elemanın 42. düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 122

Şekil 5.25. SC5 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a) 1. düşü b) 36. düşü c) 42. düşü..... 123

Şekil 5.26. SC5 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 1. düşü b) 36. düşü c) 42. düşü..... 124

Şekil 5.27. SC6 Deney elemanının 2. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 129

Şekil 5.28. SC6 Deney elemanın 30. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 130

Şekil 5.29. SC6 Deney elemanın 44. düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 131

Şekil 5.30. SC6 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a) 2. düşü b) 30. düşü c) 44. düşü..... 132

Şekil 5.31. SC6 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşü b) 30. düşü c) 44. düşü..... 133

Şekil 5.31. SC7 Deney elemanının 1. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 138

Şekil 5.32. SC7 Deney elemanın 19. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 139

Şekil 5.33. SC7 Deney elemanın 33. düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 140

Şekil 5.34. SC7 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a) 1. düşü b) 19. düşü c) 33. düşü..... 141

Şekil 5.35. SC7 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 1. düşü b) 19. düşü c) 33. düşü..... 142

Şekil 5.36. SC8 Deney elemanının 2. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 148

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.37. SC8 Deney elemanın 47. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 149

Şekil 5.38. SC8 Deney elemanın 71. düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 150

Şekil 5.39. SC8 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a) 2. düşü b) 47. düşü c) 71. düşü..... 151

Şekil 5.40. SC8 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşü b) 47. düşü c) 71. düşü..... 152

Şekil 5.41. SC9 Deney elemanının 1. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 158

Şekil 5.42. SC9 Deney elemanın 29. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 159

Şekil 5.43. SC9 Deney elemanın 56. düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 160

Şekil 5.44. SC9 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a) 1. düşü b) 29. düşü c) 56. düşü..... 161

Şekil 5.45. SC9 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 1. düşü b) 29. düşü c) 56. düşü..... 162

Şekil 5.46. SC10 Deney elemanının 2. düşü(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 168

Şekil 5.47. SC10 Deney elemanın 79. düşü(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 169

Şekil 5.48. SC10 Deney elemanın 89. düşü(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer 170

Şekil 5.49. SC10 Deney elemanı ilk çarpışma anı hız-zaman grafikleri
a) 2. düşü b) 79. düşü c) 89. düşü..... 171

Şekil 5.50. SC10 Deney elemanı ilk çarpışma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşü b) 79. düşü c) 89. düşü..... 172

Şekil 5.51. Düşü sayısı, düşü yüksekliği ve beton dayanımının karşılaştırması..... 174

Şekil 5.52. SC1 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi..... 175

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.53. SC2 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 175

Şekil 5.54. SC3 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 175

Şekil 5.55. SC4 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 176

Şekil 5.56. SC5 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 176

Şekil 5.57. SC6 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 176

Şekil 5.58. SC7 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 177

Şekil 5.59. SC8 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 177

Şekil 5.60. SC9 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 177

Şekil 5.61. SC10 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi 178

Şekil 6.1. Abaqus programı ile oluşturulan model 183

Şekil 6.2. Sonlu eleman boyutlarına göre ivme değerlerindeki değişim 187

Şekil 6.3. Deney elemanı modelinin sonlu elemanlara bölünmesi 188

Şekil 6.4. Çekiç modelinin sonlu elemanlara bölünmesi 188

Şekil 6.5. 750 mm için Abaqus gerilme dağılımı 191

Şekil 6.6. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 192

Şekil 6.7. SC1 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 192

Şekil 6.8. SC1 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 192

Şekil 6.9. SC1 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 193

Şekil 6.10. 700 mm için Abaqus gerilme dağılımı 194

Şekil 6.11. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 194

Şekil 6.12. SC2 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 195

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.13. SC2 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 195

Şekil 6.14. SC2 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 195

Şekil 6.15. 650 mm için Abaqus gerilme dağılımı 196

Şekil 6.16. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 197

Şekil 6.17. SC3 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 197

Şekil 6.18. SC3 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 198

Şekil 6.19. SC3 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 198

Şekil 6.20. 600 mm için Abaqus gerilme dağılımı 199

Şekil 6.21. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 200

Şekil 6.22. SC4 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 200

Şekil 6.23. SC4 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 200

Şekil 6.24. SC4 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 201

Şekil 6.25. 550 mm için Abaqus gerilme dağılımı 202

Şekil 6.26. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 202

Şekil 6.27. SC5 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 203

Şekil 6.28. SC5 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 203

Şekil 6.29. SC5 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 203

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.30. 750 mm için Abaqus gerilme dağılımı 204

Şekil 6.31. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 205

Şekil 6.32. SC6 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 205

Şekil 6.33. SC6 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 206

Şekil 6.34. SC6 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 206

Şekil 6.35. 700 mm için Abaqus gerilme dağılımı 207

Şekil 6.36. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 208

Şekil 6.37. SC7 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 208

Şekil 6.38. SC7 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 208

Şekil 6.39. SC7 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 209

Şekil 6.40. 650 mm için Abaqus gerilme dağılımı 210

Şekil 6.41. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 210

Şekil 6.42. SC8 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 211

Şekil 6.43. SC8 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 211

Şekil 6.44. SC8 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 211

Şekil 6.45. 600 mm için Abaqus gerilme dağılımı 212

Şekil 6.46. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 213

Şekil 6.47. SC9 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 213

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.48. SC9 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 214

Şekil 6.49. SC9 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 214

Şekil 6.50. 550 mm için Abaqus gerilme dağılımı 215

Şekil 6.51. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu 216

Şekil 6.52. SC10 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı ivme değerleri karşılaştırılması 216

Şekil 6.53. SC10 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı hız değerleri karşılaştırılması 216

Şekil 6.54. SC10 Deney ile Abaqus ilk çarpışma anı deplasman değerleri karşılaştırılması 217

Şekil 6.55. Kabul edilen kiriş deplasmanı 221

Şekil 6.56. Sonlu farklar yöntemi şekilsel gösterimi 224

Şekil 6.57. Normal dayanımlı beton, 550 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 226

Şekil 6.58. Yüksek dayanımlı beton, 550 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 226

Şekil 6.59. Normal dayanımlı beton, 600 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 227

Şekil 6.60. Yüksek dayanımlı beton, 600 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 227

Şekil 6.61. Normal dayanımlı beton, 650 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 228

Şekil 6.62. Yüksek dayanımlı beton, 650 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 228

Şekil 6.63. Normal dayanımlı beton, 700 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 229

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.64. Yüksek dayanımlı beton, 700 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 229

Şekil 6.65. Normal dayanımlı beton, 750 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 230

Şekil 6.66. Yüksek dayanımlı beton, 750 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması 230

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Geleneksel uygulama 21

Resim 2.2. Yeni uygulama 22

Resim 3.1. Deney düzeneği 32

Resim 3.2. Çekiç 34

Resim 3.3. Model 353B02 39

Resim 3.4. Montaj yeri ve aparatı 41

Resim 3.5. 201B03 Model ICP kuvars halka kuvvet algılayıcısı 43

Resim 3.6. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı 45

Resim 3.7. 003A20 Model düşük gürültülü koaksiyal kablo 47

Resim 3.8. Optik fotoseller ve yerleşimi 48

Resim 4.1. SikaWrap®-230 C 63

Resim 4.2. 250 dm^3 hacimli beton mikseri 68

Resim 4.3. Deney elemanlarının hazırlandığı döküm metal kalıplar 71

Resim 4.4. Deney elemanı üzerine açılan delikler 74

Resim 4.5. Pirinç sabitleme aparatları ve çelik-kauçuk birleşimi 75

Resim 4.6. CFRP yapıştırılmış deney elemanı 77

Resim 4.7. National Instruments firması tarafından hazırlanan Measurement & Automation programı 78

Resim 4.8. Deney elemanı 78

Resim 5.1. SC1 Elemanında oluşan ilk hasar 82

Resim 5.2. SC1 Elemanının göçme durumu 82

Resim 5.3. SC1 Elemanının agrega-matris görünümü 82

Resim **Sayfa**

Resim 5.4. SC1 Deney elemanı göçme durumu 89

Resim 5.5. SC2 Elemanında oluşan ilk hasar 91

Resim 5.6. SC2 Elemanının göçme durumu 91

Resim 5.7. SC2 Elemanının agrega-matris görünümü 92

Resim 5.8. SC2 Deney elemanı göçme durumu 98

Resim 5.9. SC3 Elemanında oluşan ilk hasar 99

Resim 5.10. SC3 Elemanının göçme durumu 100

Resim 5.11. SC3 Elemanının agrega-matris görünümü 100

Resim 5.12. SC3 Deney elemanı göçme durumu 107

Resim 5.13. SC4 Elemanında oluşan ilk hasar 108

Resim 5.14. SC4 Elemanının göçme durumu 109

Resim 5.15. SC4 Elemanının agrega-matris görünümü 109

Resim 5.16. SC4 Deney elemanı göçme durumu 116

Resim 5.17. SC5 Elemanında oluşan ilk hasar 117

Resim 5.18. SC5 Elemanının göçme durumu 118

Resim 5.19. SC5 Elemanının agrega-matris görünümü 118

Resim 5.20. SC5 Deney elemanı göçme durumu 125

Resim 5.21. SC6 Elemanında oluşan ilk hasar 126

Resim 5.22. SC6 Elemanının göçme durumu 127

Resim 5.23. SC6 Elemanının agrega-matris görünümü 127

Resim 5.24. SC6 Deney elemanı göçme durumu 134

Resim 5.25. SC7 Elemanında oluşan ilk hasar 135

Resim 5.26. SC7 Elemanının göçme durumu 136

Resim **Sayfa**

Resim 5.27. SC7 Elemanının agrega-matris görünümü..... 136

Resim 5.28. SC7 Deney elemanı göçme durumu..... 143

Resim 5.29. SC8 Elemanında oluşan ilk hasar..... 144

Resim 5.30. SC8 Elemanının göçme durumu 145

Resim 5.31. SC8 Elemanının agrega-matris görünümü..... 145

Resim 5.32. SC8 Deney elemanı göçme durumu..... 153

Resim 5.33. SC9 Elemanında oluşan ilk hasar..... 154

Resim 5.34. SC9 Elemanının göçme durumu 155

Resim 5.35. SC9 Elemanının agrega-matris görünümü..... 155

Resim 5.36. SC9 Deney elemanı göçme durumu..... 163

Resim 5.37. SC10 Elemanında oluşan ilk hasar..... 164

Resim 5.38. SC10 Elemanının göçme durumu 165

Resim 5.39. SC10 Elemanının agrega-matris görünümü..... 165

Resim 5.40. SC10 Deney elemanı göçme durumu..... 173

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
°C	Santigrat derece
a	İvme
a_h	Çekiç ivmesi
AC	Alternatif akım
B	Kirişin genişliği
cm	Santimetre
D	Kirişin yüksekliği
dak	Dakika
dB	Desibel
dev	Devir
dm	Desimetre
E_I	Darbe Enerjisi
E_{CT}	Basınç tokluk enerjisi
F	Kuvvet
f_c'	Basınç Dayanımı
g	Yerçekimi ivmesi
gr	Gram
h	Düşme yüksekliği
Hz	Hertz
I	Düğüm noktalarına etkiyen iç kuvvet
kg	Kilogram
kHz	Kilohertz
kN	Kilonewton
l	Mesnet açıklığı
m	Metre

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{m_h}$	Çekiç kütlesi
M	Kütle
mA	Mili amper
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
ms	Milisaniye
mV	Mili volt
N	Newton
P	Düğüm noktasına etkiyen dış kuvvet
Pa	Pascal
$\mathbf{P_t}$	Çekiç yükü
Ø	Çap
s	Saniye
T(t)	t anıda kirişteki kinetik enerji
U(t)	t anında kirişteki eğilme enerjisi
u(x,t)	Mesnetten x uzaklıkta t zamanındaki yerdeğiştirme
$\mathbf{u_0(t)}$	Kirişin orta noktasındaki t zamanındaki yerdeğiştirme
u'	Eğim
u''	Eğrilik
$\dot{\mathbf{u}}$	Hız
$\ddot{\mathbf{u}}$	Yapının ivmesi
VDC	Volt, doğru akım
VK	Varyasyon katsayısı
µs	Mikro saniye
ρ	Betonun özgül ağırlığı
ΔE	Çekiçteki enerji kaybı
$\mathbf{\Delta E_0(t)}$	Çekiç üzerinde t anındaki toplam enerji kaybı

Kısaltmalar	Açıklama
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFRP	Karbon takviyeli elyaf kumaş
CAE	Complete Abaqus Environment
ESLD	Eşdeğer servis limit durumu
EELD	Eşdeğer en büyük limit durumu
HHT	Hilber-Hughes-Taylor

1. GİRİŞ

Mühendislik bilimlerinin gelişimi, kullandıkları malzeme çeşitliliğine ve kullanılabilirliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle kullanılan malzemelerin temel özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. İnşaat Mühendisliği alanında kullanılan malzemelerin özellikleri belirlenirken öncelikli olarak çeşitli yükler altındaki dayanımı, davranışları, özellikleri, şekil değiştirmeleri ve kusurları önem kazanmaktadır.

Beton, insan hayatının her aşamasında iç içe olduğu bir yapı malzemesidir. İnşaat Mühendisliğinin de en önemli malzemelerinden biri olan beton, çok yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Bu malzeme çok çeşitli sektörlerde önemli alanlarda kullanılmaktadır. Bina, köprü, su yapıları(baraj, kanal vb.) yanında yol ve diğer yapıların inşaatında kullanılmakta olan beton, hem bir taşıyıcı eleman ve hem de dekoratif malzeme olarak ortaya çıkmaktadır. Yangına dayanıklılığı, su geçirmezliği ve ses yalıtımı bakımından da tercih edilmektedir. Stratejik öneme sahip yapılarda nükleer kazaların veya saldırıların etkilerine karşı da kullanılmaktadır. Ayrıca beton henüz inşaat sektöründe yer alan en ekonomik inşaat malzemelerinden biridir. Bileşiminde barındırdığı malzeme çeşitliliğinden dolayı kompozit bir malzeme olarak davranış gösterebilmektedir.

Beton, kullanıldığı alanlarda kullanım ömrü boyunca çok çeşitli yüklere maruz kalmaktadır. Malzemelerin maruz kaldığı bu yükleri genel anlamda statik ve dinamik yükler olarak ikiye ayırabiliriz.

Statik yükler kalıcı yüklerdir. Malzemelerin kendi ağırlığı, teşkil edilen yapı üzerinde bulundurulan sabit üniteler, depolama alanlarında yapı üzerinde depolanan malzemelerin ağırlığı vb. yükler statik(kalıcı) yüklerdir.

Dinamik yükler ise anlık ortaya çıkan, etkiyen ve belirli zaman aralıklarında devam eden yüklerdir. Kalıcı olmamalarına rağmen etkileri çok büyük olabilmektedir.

Dinamik yüklere örnek olarak; deprem yükleri, yorulma(fatigue) yükleri(makine titreşimleri vb.), binalara etkiyen rüzgâr yükleri sayılabilir.

Bu çalışmaya konu oluşturan çarpma etkisi ise iki farklı nesnenin çarpışması anında meydana gelen temasla oluşan dinamik etkiler sonucunda nesneler üzerinde ortaya çıkan yüksek gerilmelerin, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde oluşturduğu değişimlerdir. Dinamik yüklerin davranışıyla benzerlik göstermekle birlikte hala birçok bilinmezlikler taşımaktadır. Bu bilinmezliklerin belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapılmaktadır.

Çarpma etkilerini meydana getiren olaylar; betonarme yapılara otomobil, uçak vb. araç çarpması, petrol platformlarının ve köprülerin betonarme ayaklarına gemi çarpması, askeri tesisler içerisinde bulunan cephanelik vb. yerlerde patlayıcı maddelerin patlaması sonucu ortaya çıkan etkiler, nükleer santrallerde meydana gelen kazaların oluşturduğu veya bu santrallere yapılan saldırıların oluşturduğu çarpma etkileri, karayolları ve demiryollarında bulunan yapılara araç çarpması, yolların kenarlarında bulunan yamaçlardan yol üzerinde bulunan yapıların üzerine kaya düşmesi ve benzeri olarak düşünülebilir ve örneklemeler artırılabilir.

Yapıyı meydana getiren elemanların çarpmaya karşı tepkisi, bir elemanın tasarımında göz önüne alınması gereken önemli özelliklerden biri olduğu düşünülmektedir. Bir elemanın çarpma direnci, birçok uygulamada servis ömrü boyunca kritik ölçülerde meydana gelebilmektedir.

Yapı elemanlarının çarpma etkisi altındaki davranışlarının araştırılması ve incelenebilmesi için araştırmacılar çeşitli çarpma test prosedürleri ve düzenekleri geliştirmişlerdir. Çarpma testi, malzemelerin enerji yutma kapasitelerini ve dayanıklılığını değerlendirmede kullanılmaktadır. Çarpma deneyi süresince yutulan enerji, malzemenin mukavemetinin ve tokluğunun bir ölçüsünün göstergesi olarak kullanılabilmektedir.

Çarpma deneyleri yakın tarihimize kadar temel yapı elemanlarından olan çelik üzerinde yoğunlaşmıştır. Fakat betonun aktif kullanımı yaygınlaştıkça, çarpma etkisi altında göstermiş olduğu yapısal özellikler önem kazanmaya başlamıştır.

Çarpma deneyleri ile ilgili en temel teorik çalışma 1824 yılında demir üzerinde yapılan çalışmadır [21]. 1857 yılında Rodman silah yapımında kullanılan çeliklerin özelliklerini karakterize etmek amacıyla ağırlık düşürücü bir düzenek geliştirmiştir [22]. Fransız araştırmacı Charpy çarpma etkisi altındaki davranışı incelemek için bir test düzeneği geliştirmiş ve bu düzenek ile çentikli çelik numuneler üzerinde deneyler yapmıştır. Literatürde geliştirilen deney prosedürü ve test düzeneği "Charpy Testi ve Charpy Metodu" olarak isimlendirilmiş ve en yaygın olarak kullanılan çarpma testi haline gelmiştir.

Küresel ölçekte çarpma deneylerinin standartlaştırılması çalışmaları devam etmektedir. Bu güne kadar yapılan çalışmalarda deney metotları ve prosedür hakkında herhangi bir standart oluşturulamamıştır. Fakat ASTM E 23(American Society for Testing and Materials) standardında çarpma deneylerinde kullanılacak limitlerin belirlenmesinde ve kullanılan makinelerin performanslarının artırılmasında oldukça önemli gelişmeler kaydetmiştir[17].

Çarpma olayındaki en önemli etki çarpan kütlenin boyutu ile ilişkilidir. Önem sırasına göre çarpmayı üç tipte sıralayabiliriz. Birinci sırada oldukça büyük beton elemana aşırı küçük kütle çarpmasıdır. Bu durumda hasar genellikle kontak bölgesi ile sınırlıdır. Üçüncü sıradakinde ise küçük beton elemana büyük kütle çarpmasıdır. Birçok araştırmacı bu olayları tanımlamak için ampirik formüller önermişlerdir. Ortada yani ikinci tipte ise çarpan kütle ve beton eleman karşılaştırılabilir boyutlardadır. Araştırmaların büyük birçoğunda bu tip geçerli olmakta ve pratik olarak uygulanabilmektedir [6].

Bu çalışmanın amacı: daha önce çarpma etkisi incelenen normal ve yüksek dayanımlı beton kirişlerin günümüzde yaygın olarak kullanılan karbon lif ile güçlendirilmiş polimer(CFRP) malzemesi ile güçlendirmesinin beton kiriş elemanların çarpma

davranışını nasıl etkilediğinin deneysel olarak incelenmesidir. Ayrıca yaygın olarak kullanılan ve çarpma modellemesi yapılabilen lineer olmayan sonlu elemanlar programlarından biri olan Abaqus programı ile deney modellenerek bilgisayar simülasyonu ile deneysel verilerin artırılması olanağının mümkün olup olmadığı araştırılmıştır. Sonlu eleman modellemesi ve deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak deney sonuçlarına uyumlu sonuçlar verebilen bir model oluşturulmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneğinin tasarlanması ve üretilmesi de çalışmanın bir diğer amacıdır.

Bu tez çalışmasında, deneylerin yapılışının temelini oluşturan deney aletinin tasarımı ön plana çıkmıştır. Çarpma deneylerinin yapılabilmesi için literatürde kabul görmüş olan serbest ağırlık düşürme deney düzeneği tercih edilmiştir. Tez çalışmasında deney düzeneğinin tasarımı ve üretimi önemli bir aşama olarak yer almıştır. Deney düzeneğinin tasarımı için çok sayıda çalışma incelenmiş ve oldukça kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Ayrıca tasarım aşaması tamamlanan deney düzeneğinin test edilmesi için oldukça fazla sayıda pilot deney yapılmıştır. Deney düzeneği tasarım aşamasının önemli bir aşama olarak görülmesinin temel nedeni beton veya betonarme elemanların çarpma davranışının araştırılması için halen standart bir deney düzeneğinin bulunmayışıdır.

Düzenlenen deneysel çalışmada iki grup halinde normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı 5 er adet olmak üzere toplam 10 adet 150×150×710 mm boyutlarında beton kiriş numunesi üretilmiş ve test edilmiştir. Beton dayanımı olarak normal dayanımlı beton için minimum C20 ve yüksek dayanımlı beton için minimum C40 dayanımın değerleri esas alınmış ve beton karışımları buna göre hazırlanmıştır. CFRP ile güçlendirme işlemi normal ve yüksek dayanımlı deney elemanlarına özdeş olarak uygulanmıştır. Beton kiriş deney elemanlarına deney elemanı genişliğine eşit genişlikte (150 mm) tek doğrultulu CFRP şerit kiriş alt yüzeyine tüm serbest kiriş açıklığı boyunca yapıştırılmıştır.

Deneysel çalışmada değişken olarak beton dayanımı ve çekicin düşme yüksekliği incelenen değişkenlerdir. CFRP güçlendirme detayı sabit tutularak tüm deney

elemanlarında özdeş bir şekilde uygulanmıştır. Düşen çekicin ağırlığı 5,250 kg'dır ve bütün deney elemanları için sabit tutulmuştur. Deney elemanlarına uygulanan düşme yükseklikleri sırasıyla 550, 600, 650, 700, 750 mm alınmış ve elemanlar hasar alana kadar düşme yapılmış ve düşme sayısı, ivme ve zaman ölçümleri alınmıştır.

Deneylerde ölçüm aleti olarak piezoelektrik ivmeölçerlerden 2 adet kullanılmıştır. İvmeölçerler deney elemanı üzerine simetrik olarak yerleştirilmiş ve beton kiriş elemanların yüklemenin uygulandığı noktanın sol ve sağ tarafında kalan kesme açıklıklarında davranışın nasıl değişim gösterdiği belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca halka kuvvetölçer de çalışmada kullanılmış fakat elde edilen değerler aletin ölçme kapasitesini aştığı için pik değerler ölçülememiştir. Çekicin düşme hızını belirlemek için düşme zamanı ölçülmüştür. Zaman ölçümünde 3 adet optik fotosel kullanılmış ve okunan zaman değerleri milisaniye hassasiyetinde olmuştur. Deneyler sırasında alınan zamana bağlı ivme ölçümleri kullanılarak deney elemanlarının hız ve deplasman davranışları elde edilmiştir. Ayrıca uygulanan her serbest düşme yükleme adımında deney elamanlarının hasar dağılımları ve davranışları incelenmiştir. Deney elemanların enerji tüketim kapasiteleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile lineer olmayan sonlu eleman modeli doğrulanmış ve modelin deneysel sonuçlar ile uyumu sağlanmıştır.

Bu çalışmada çok fazla farklılaşım gösteren ve belirli bir standardı olmayan beton elemanların çarpma davranışını incelemek için bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Tasarlanan deney düzeneği kullanılarak yürütülen deneysel çalışma ile elde edilen veriler ışığında oluşturulan sonlu eleman modeli doğrulanmış ve model kullanılarak deney sayısının bilgisayar simülasyonu ile artırılabileceği düşünülmüştür.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapılan kapsamlı literatür incelemesi çarpma etkisinin ilk olarak metaller üzerinde incelendiğini göstermiştir. Bu yönde çalışmaların yoğun olmasının nedeni, endüstriyel devrimin ortaya çıkması ve çeliğin kullanımının yaygınlaşması sonucudur. Metaller üzerinde yapılan çalışmaların belli koşullar altında yapılmasını sağlamak için standartlaştırma çalışmaları yapılmıştır. Uzun bir zaman homojen malzemeler üzerinde çarpma deneyleri yapılmış ve belirli bir standart oluşturulmaya çalışılmıştır. Daha sonra yapı malzemesi olarak betonun önem kazanmasıyla farklı malzemeler üzerinde de çalışmalar yapılmaya başlamıştır. Fakat son zamanlara kadar betona etkiyen statik yükler dikkate alınmış ve diğer etkiler arka planda kalmıştır. Yapıların büyümesi, işlevselliklerin farklı alanlarda artması ile statik yüklerin etkisinin yanında dinamik yüklerin ve diğer etkilerin önemi ön plana çıkmıştır. Buna bağlı olarak beton üzerinde yapılan çarpma deneyleri de artmış ve literatürde bu konuda yapılan çalışmalar artmaya başlamıştır. Bu çalışmalarda incelenen değişkenlerin sayısı oldukça fazladır. Örnek verecek olursak; çarpan çekicin ağırlığı, düşme yüksekliği, malzemenin özellikleri, çarpma noktasının alanı, çarpan çekicin şekli vb. sıralanabilir.

Karbon takviyeli elyaf kumaşlar(CFRP) inşaat sektörüne yeni girmiş ve çoğunlukla betonarme yapıların güçlendirilmesinde giderek yaygınlaşarak kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Ancak literatür incelendiğinde CFRP ile güçlendirilen beton elemanların çarpma davranışını inceleyen tatmin edici sayıda çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle bu konunun incelenmesi düşünülmüştür. Bu bölümde çalışma kapsamında değişken olarak incelenen beton basınç dayanımının değişiminin çarpma davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen ve beton elemanların çarpma davranışı araştıran önemli çalışmalar kısaca özetlenmiştir. Ayrıca CFRP yerine betonun çarpma davranışını iyileştirmek için kullanılan bazı malzemelerin incelendiği az sayıda çalışmada özetlenmiştir.

Arslan'ın Çalışması;

Arslan A. çalışmasında lifli beton malzemenin karışık modda çarpma direncini belirlemek için test yöntemi geliştirmiştir[3]. Çelik lifli ve polipropleni lifli betonların çarpma direnci için tekrarlı düşen ağırlık deney düzeneği kullanılarak bir seri deneyden sonuçları elde etmiştir. Güçlendirmenin betonun çarpmaya karşı davranışında olumlu bir etkiye sahip olduğuna dair görüşlerin yavaş yavaş artmaya başladığını belirtmiştir.

Deneylerinde kullandığı numuneler bir kenarının uzunluğu 150 mm olan küplerdir. Bu numuneler üzerinde 85 mm derinliğinde çentikler yer almaktadır. Numuneler, normal beton ve liflerle güçlendirilmiş betondan oluşmaktadır. Beton içersine katılan çelik liflerin ağırlığı, toplam ağırlığın %1, %2 ve %3, polipropleni liflerin ağırlığı ise toplam ağırlığın %0,1, %0,2 ve %0,3 ü kadar alınmıştır. Beton karışımının hazırlanmasında, karışıma katılan çimento, kum, iri agrega ağırlıkça 1:1,8:2,8 alınmıştır. Çalışma boyunca su/çimento oranı 0,45 olarak sabit tutulmuştur. Her bir seri için 12 ayrı numune ve deneylerden önce 6 adet standart kontrol numunesi kullanılmıştır. Numuneler kalıplara döküldükten 24 saat sonra kür tankına bırakılmış ve 28 gün oda sıcaklığında bırakılmışlardır. Kullanılan çekiçler: 5, 10, 20, 30 ve 40 N ağırlığındadır. Maksimum düşme yüksekliği ise 2500 mm'dir.

Bu çalışmanın amacı;

- Çarpma yükleri altında beton içerisine katılan liflerin malzemenin kırılma performansına etkisini belirlemek
- Çatlak şekillerinin oluşumu ve yerlerinin belirlemek,
- Çalışma incelenen elemanların göçmesini sağlayan düşme sayısına ve yutmuş olduğu çarpma enerjisini bulmak olarak sayılabilir.

Bu çalışmanın sonucunda;

- İki ayrı çatlak paterninin geliştiği, bunlardan birinin kesmeye ve diğerinin de çekme kuvvetine bağlı olduğu,
- Darbe altındaki kırılma enerjisinin normal betonlar için statik testlerdekinden 10 kat daha fazla olduğu,
- Kırılma enerjisindeki artışın güçlendirilmiş betonda normal betondan daha fazla olduğu, sonuçlarına ulaşılmıştır.

Aros J. ve Doumbalski N.'in Çalışması;

Arros J. ve Doumbalski N. çalışmalarında nükleer santral binalarına uçak çarpmasının analizlerini basit bir model tasarlayarak LS-DYNA adlı sonlu eleman programını kullanarak ele almışlardır[2]. 11 Eylül 2001 de Dünya Ticaret Merkezi'ne yapılan uçak çarpması saldırısından sonra nükleer santrallerin de böyle bir saldırı olabilecek önemli tesisler kategorisine eklenmiştir. Yapı, gerçekte olmayan basit bir nükleer tesis kullanılmıştır. Analizi yapmak için alınan yüklerde ise Riera force history metodu kullanılmış, çarpan uçak modeli olarak da Boeing 747-400 seçilmiştir. Nükleer bir yapı kullanılmasının temelinde yatan amaç çok ani hızlara ve çok büyük değerlere sahip yüklerin ortaya çıkabileceği gerçeğini yansıtmaktır. Modellenen yapının boyutları planda 48,15 m×35,96 m ve yüksekliği de 29,87 m dir.

Bu çalışmanın amacı;

- LS-DYNA programında gerçek olamayan bir nükleer tesis binası ve Boeing 747 benzeri uçağı tasarlamak,
- Bu modelin analizinden elde edilen sonuçları değerlendirmek,
- Tartışma ve karşılaştırma için sonuçlar temel alınarak, yorumlar yapılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar;

- Gelişmiş bilgisayar sistemleri ve sonlu eleman programları yardımıyla uçak çarpması gibi dinamik problemlerin modellenmesi ve analizleri günümüzde uygun işlem sürelerinde gerçekleştirilebileceği,
- Hedef yapıya model uçağın çarpması modellemesi ile Riera force time history metodunda yapının yüksek frekans içeriği ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Rijitlik artışı ile bağlantılı betondaki çatlaklar ile meydana gelen süreksizliklerin yüksek frekanslara ulaşılmasına sebep olduğudur. Modelleme açısından daha gerçekçi olan lineer olmayan model davranışı daha iyi yansıtmaktadır. Fakat bu model çözüm açısından zaman gereksinimini artırmaktadır.

Barr B. ve Baghli A.'nın Çalışması;

Barr B. ve Baghli A. çalışmalarında beton için tekrarlı düşen ağırlık deney aleti geliştirmiş ve çok yönlü kullanmışlardır[6]. Çelik lifli beton deney elemanının tamamen kırılması için gerekli olan düşme sayısı ile çarpma direnci belirlenmiştir. Araştırma parametreleri deney elemanı geometrisi, çentik derinliği, çelik lif içeriği ve düşen ağırlığın kütlesi ve düşme yüksekliğidir. Deneysel çalışma için 2 seri karışım hazırlanmıştır. Birinci seride numune boyutları 500×100×100 mm olup 27 adet hazırlanmıştır. İkinci seride ise numune boyutları 250×100×100 mm olup 18 adet hazırlanmıştır. Numunelerde mesnet açıklığı, birinci seride 400 mm ikinci seride ise 200 mm'dir. Numunelerin üzerinde 20, 40 ve 60 mm derinlikli çentikler açılmıştır. Üç farklı çekiç kütlesi(1, 2, ve 4 kg) ve üç farklı düşme yüksekliği(0,5-1,0 ve 2,0 m) alınmıştır.

Bu çalışmanın amacı;

- Tekrarlı düşen ağırlıklı çarpma deney düzeneğini geliştirmek,
- Geliştirilen deney düzeneğiyle lifli betonların çarpma direncini belirlemek,
- Deneylerde kullanılan test elemanlarının tamamen kırılması için gerekli düşme sayısının belirlenmesi ve buna bağlı olarak da çarpma direncinin ölçülmesidir.

Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar;

- Lifli beton kirişlerin çarpma direncini belirlemek için basit tekrarlı düşen ağırlık çarpma deney aleti geliştirilmiştir.
- Çarpma test sonuçlarının ortalama %15-20 değişim katsayısı ile iyi üretildiği görülmektedir.
- Kısmen tutarlı bir yaklaşımla çentikli numunelerin zayıf noktalarının yeri önceden belirlenebilmiştir.
- Lif içeriğinin artması çarpma direncini arttırmıştır.
- Büyük deney elemanlarında lif içeriği %1 den %2'ye çıktığında artmanın daha büyük olduğu gözlenmiştir. Kısa deney elemanlarında ise çarpma direncinin artmasının daha düzenli olduğu gözlenmiştir.

Barr B. ve Bouamrata A.'nın Çalışması;

Barr B. ve Bouamrata A. çalışmalarında lifle güçlendirilmiş beton elemanların darbe dayanımlarını bulmak amaçlı deneysel bir çalışma yapmışlardır[7]. Çalışma elemanı göçmeye götürecek düşme sayısına yoğunlaşmıştır. Değişik enerjiler altındaki yüklemeler farklı yükseklikler ile sağlanmıştır. ACI 544 (American Concrete Institute)′ün önermiş olduğu test metotları bu çalışmanın ana eksenini oluşturmuştur. ACI 544′ün önerisine göre deney 4,5 kg'lık bir çelik top kullanılarak, 457 mm düşme yüksekliğinde, 63,4 mm kalınlığında ve 152 mm çapında elemanlar kullanılarak yapılmıştır.

Barr ve Bouamrata′nın çalışmalarında elemanların su/çimento oranı 0,5 ve karışım oranları çimento:kum:agrega sırasıyla 1:1,8:2,8'dir. Çimento Portland çimentosudur. Güçlendirici lifler toplam hacmin yüzdesi olarak 0,25, 0,5, 0,75 ve 1 oranlarına sahiptir. Karışımlar 0,056 m³'lük mikserde 5 ile 10 dak karıştırılarak oluşturulmuştur. Güçlendirici liflerin üniform olarak dağıtılması deney sonuçlarını etkileyeceği için özel dikkat sarf edilmiştir. Düşürülen kütle 1 ile 4 kg arasında değişkendir. Her bir farklı karışım için 500×100×100 mm ebatlarında standart

kirişler ve 100 mm boyutlu kontrol küpleri dökülmüştür. Elemanlar 28 gün boyunca kür tanklarında tutulmuşlar ve 21. gün, çentik elemanlara açılarak tekrar tanklara bırakılmışlardır. 10, 20 ve 30 mm olmak üzere üç ayrı çentik boyutu kullanılmıştır.

Barr ve Bouamrata tarif ettikleri test prosedürleri ve ağırlık düşürücü alet ile şu dört değişkenin araştırılabileceğini söylemişlerdir.

1. Kütlenin etkisi: 1 ile 4 kg arasında değişken
2. Düşme yüksekliği: 0,5 m ve 1 m kullanılmıştır fakat 2,5 m′ye kadar uygunluk sağlanabilir.
3. Çentik derinliğinin etkisi
4. Etkili eleman açıklığının etkisi: 400 mm'lik açıklığa sahip elemanlar kullanılmıştır.

Bu çalışmada, deney sonuçlarına çok etkili olduğu bilinen sürtünme kuvveti ihmal edilmiştir. Yükleme sayısının etkisini basit anlamda sergileyebilmek için enerji eşitliğinden yararlanılmıştır. Tüm çarpma testleri çentikli elemanlar üzerinde yapılmıştır.

Bu deneysel çalışmanın sonucunda;

- Yükseklik arttıkça elemanı göçmeye götüren düşme sayısının arttığı sonucuna varılmıştır.
- Açılan çentik, elemanın boyutundaki artışın düşme sayısını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Varılan diğer bir yargı ise güçlendirici lif oranının artışının elemanın kırılma enerjisinin artışına neden olduğudur.

Suaris W. ve Shah S.P.'nin Çalışması;

Suaris W. ve Shah S.P. değişik karışım özelliklerine sahip beton elemanların, farklı güçlendirme oranlarında çarpma etkisi altındaki enerji yutma kapasitelerini ve

deformasyonları gözlemlemişlerdir[19]. Çarpma yükü altında özellikle etkileşimin olduğu yüzeydeki kesme, çarpma ve çekme etkilerinin meydana getirmiş olduğu davranışın kompleksliğine vurgu yapılmıştır.

Deneysel çalışma sırasında ağırlığı 1,07 kN olan bir çekiç, düşürülen alet olarak kullanılmıştır. Enerji yutma kapasitesi, uygulanan yükün eleman ile etkileşimde olduğu zaman boyunca alınan integralinin hız ile çarpımıyla elde edilmiştir. Fakat daha güvenilir bir enerji yutma kapasitesinin yük-deformasyon grafiği altındaki alandan elde edilebileceği vurgulanmıştır. Bu nedenle çalışma sırasında LVDT(Linear Variable Differential Transformer) kullanılarak eleman üzerindeki deformasyonlar gözlemlenmiştir.

Kullanılan kiriş elemanları 38,1×76,2×457,2 mm (genişlik-derinlik-boy) boyutlarındadır. Elemanlar tam merkezi yüklemeye tabi tutulmuşlardır. Elemanlar 14 gün kür koşullarında ve 7 gün ise normal çevre koşullarında bekletilmişlerdir.

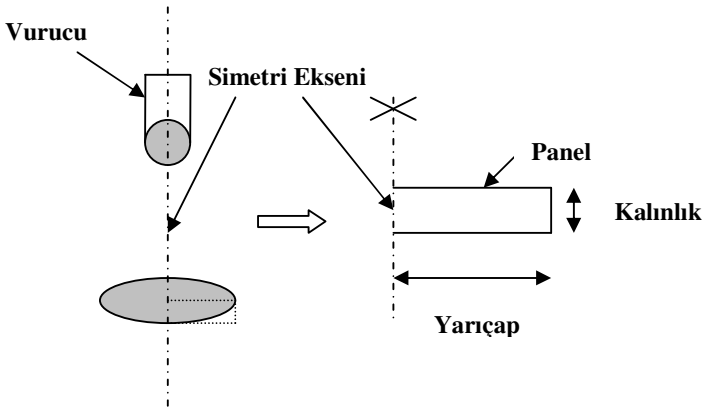
Çarpma deneyleri 1,016 m/sn'lik hızlarda gerçekleştirilmiştir. Elemanlardaki su/çimento oranı sabit ve 0,5'tir. Suaris ve Shah deneysel çalışmalarında kum ve çimento karışımı harç üzerinde de çarpma etkisi çalışması yapmışlardır. Normal beton elemanlar güçlendirmeye tabi tutulmazken harç elemanlarında toplam hacmin %0,1'i oranında lifli güçlendirmeye gidilmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda;

- Harç ve beton ikilisi arasında bir karşılaştırma imkânı sunmaktadır.
- Uygulanan birim deformasyon oranının veriliş hızı arttıkça beton ve harç malzemesinde statik haldeki dayanımdan daha fazla dayanım gözlenmiştir.
- Betonun çekme dayanımının deformasyon oranına olan duyarlılığının basınç dayanımına olan duyarlılığından çok daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.
- Deneylerde normal beton ve güçlendirilmiş betondan alınan sonuçlar göstermektedir ki, harç çatlakları deformasyonların ortaya çıkışını etkileyen en büyük etkenlerdendir.

Breen C., Guild F. ve Pavier M. 'nin Çalışması;

Breen C., Guild F. ve Pavier M. çarpma hızının önemini araştırmak adına uçakların kanatlarında kaplama olarak kullanılan 24 mm kalınlığındaki karbon lifle güçlendirilmiş polimer tabakaları çarpma etkisi altında incelemiştir(Şekil2.1). Bu tabakalar uzun ekonomik ömürleri boyunca sürekli çarpmaya maruz kalmaktadırlar. Çalışma hem sonlu eleman programları hem de deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılan sonuçları içermektedir. Sonlu eleman çözümlerinde hız değişimiyle birlikte modellenen elemandaki gerilme yığılımlarının değişkenliği gözlemlenmiştir. Bu modellemeye ek olarak yapılan deneysel çalışmada dinamik olarak yüklenen elemanların yarı statik olarak yüklenen elemandan %20 daha az bir gerilme aldığı görülmüştür. Breen çalışmasında Abaqus/Explicit adlı sonlu eleman programını kullanmıştır[8].



Şekil 2.1 Temel geometrik model

Breen C., Guild F. ve Pavier M.'e göre sabit enerji alınmak şartıyla çarpma etkisi altında elamanlardan aynı kırılma enerjisi değerinin alınacağı yargısı tam olarak geçerli değildir. Çünkü aynı enerjiyi sağlayan farklı çarpma hızları altında elemanlarda farklı etkiler gözlemlenmiştir. Breen C., Guild F. ve Pavier M. 26 adet sonlu eleman modeli oluşturmuş, modellerinde 8 mm kalınlığında yarıçapları 200 mm ve 500 mm olan yapıları 2 ile 14 m/s arasında değişen hızlarda darbe etkisi

altında incelemiştir. Çekiç 25 mm çapında rijit küresel bir kütle olarak modellenmiştir. Tüm modellerde çarpma enerjisi 40 J olarak sabitlenmiştir.

Deneysel çalışmada 8 mm kalınlığında paneller kullanılmıştır. Maksimum 4,3 m yükseklikten 9,2 m/s hıza ulaşılmıştır. Çarpma hızının etkisini gözlemlemek için tam dinamik ve yarı statik test makineleri kullanılmıştır. Her iki deneyde yine ulaşılan enerji miktarı aynı alınmıştır. Yarı statik test sonuçlarında yük-deplasman grafiği altındaki alan 180 J olarak hesaplanmıştır. Bu enerji dinamik testte kullanılan 4,3 kg'lık kütlenin 4,3 m yükseklikten düşürülmesiyle elde edilen enerjiye eşittir.

Bu çalışmanın sonucunda;

- Çarpma olayının süresi ve maksimum deformasyon daha hızlı meydana gelen çarpmalarda azalma eğilimi sergilemektedir.
- Paneldeki maksimum gerilme çarpma hızı ile değişim göstermektedir.
- Çarpma hızı ile meydana gelen çekme dayanımındaki azalma direk olmamak üzere içsel rijitliğe ve gerilme yığılma etkisine bağlı olmaktadır.

Go´mez-del Rı´o T., Zaera R., Barbero E., Navarro C.'nin Çalışması;

Go´mez-del Rı´o T., Zaera R., Barbero E., Navarro C., Bren tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi aynı özelliklere sahip panelleri yine düşük hızlarda fakat daha düşük sıcaklıklarda çarpma etkisi altında incelemişlerdir[11]. Bu çalışmada tamamen deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Kare geometride olan, değişik özelliklere(yarı izotropik, tek yönlü ve örgü şekilli) sahip elemanlar ağırlık düşürücü bir alet yardımıyla testlere tabi tutulmuştur.

Testlerin yapıldığı sıcaklık değerleri 20 ile -150 °C arasında değişmektedir. Deneylerden sonraki çatlak gelişimleri optiksel olarak ve elektron mikroskobuyla incelenmiştir.

Düşen ağırlık olarak kullanılan vurucunun kütlesi 3,62 kg olup 20 mm çapında küresel bir uca sahiptir. Çarpma anında ortaya çıkan yükü ölçmek adına bir yük ölçer vurucu üzerine yerleştirilmiştir. Çarpmadan sonra düşen ağırlığı tutan bir sistem yardımıyla tekrar düşmeler(rebound) engellenmiştir.

Deneysel çalışma sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Artan çarpma enerjisiyle birlikte düşük hızlı çarpmalarda güçlendirilmiş panellerdeki hasar artmaktadır,
- Çarpmadan önce elemanların soğutulması çarpma enerjisindeki artışın eleman üzerinde yaptığı etkiyi yapmaktadır, daha geniş çatlaklar, derin çentikler gözlenebilmektedir. Ayrıca lif ile harç arasında bağ kopmaları ve hatta lif kırılmalarına rastlanmaktadır.
- Özellikle yarı izotrop panellerde sıcaklık 20 °C'den -150 °C'ye düştüğü zaman yutulan eşik enerjisi miktarı %50'ye varan oranlarda azalmaktadır.
- Liflerin geometrisi ve yığınsal özellikleri sıcaklık etkisinin fazla olduğu koşullarda güçlendirilmiş paneller üzerinde çok büyük etkilere sahip olabilmektedir. Paralel olarak her tabakada örülmüş bir şekilde yerleştirilen liflere sahip panellerde sıcaklık değişimi hasar gelişimini ve içsel gerilme yığılımlarını artırmamaktadır.

Nataraja M.C., Dhang N. ve Gupta A.P.'nin Çalışması;

Nataraja M.C., Dhang N. ve Gupta A.P. ağırlık düşürücü aletlerle yapılan testlerin sonuçlarını değerlendirmek adına istatistiksel bir çalışma yapmıştır[14]. İlk çatlağın oluşumu bakımından varyasyon katsayısı %46 ile %57 arasında iken, pik dayanım bakımından yüksek dayanımlı betonda %54, normal dayanımlı betonda ise %51 varyasyon katsayısı bulunmuştur.

Bu çalışmada, normal dayanımlı betona çelik lifli güçlendiricilerin eklenmesiyle betonun enerji yutma kapasitesinin ve çatlak direncinin arttığını belirtmiştir. Bu nedenle ağırlık düşürücü testler normal ve güçlendirilmiş beton arasındaki yapısal

farkları ortaya çıkarmak açısından tercih edilen en etkin test yöntemi olmuştur. Bu deneysel çalışmada önceki bölümlerde bahsedilen ACI 544'ün önermiş olduğu yöntemleri kullanmıştır.

Elemanlarda doğal portland çimentosu kullanılmıştır. 0,5 mm çaplı, kırılma dayanımları 550 Mpa olan çelik lifler güçlendirme elemanı olarak karışımda yerini almıştır. 1 m³ karışım için 397 kg çimento, 562 kg ince kum ve 1152 kg kaba agrega kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,49'dur. Normal ve yüksek dayanımlı beton için ortalama basınç dayanımları sırasıyla 29,4 Mpa ve 36 Mpa'dır. Bu çalışmada 15 eleman üzerinde yapılmış olan çarpma deneyleri sonuçları Çizelge 2.1.'de özetlemiştir.

Çizelge 2.1. İstatistiksel çalışmaya ait sonuçlar

Eleman No	Çarpma Hızı(m/s)	Kütle(g)	İlk Çatlak İçin Düşme Sayısı	Göçme İçin Düşme Sayısı	Düşme Sayısındaki Artış(%)
1	4706	2790	114	124	8,8
2	4568	2826	89	92	7,0
3	4638	2850	119	125	5,0
4	4737	2852	51	55	7,8
5	4410	2872	34	41	20,6
6	4885	2780	38	42	10,5
7	4667	2792	63	70	11,1
8	4613	2950	130	136	4,6
9	4773	2745	21	30	42,9[1]
10	4562	2800	60	62	3,3
11	4483	2862	43	51	18,6
12	4846	2690	79	83	5,1
13	4601	2864	38	44	15,8
14	4571	2800	90	96	6,7
15	4627	2814	48	56	16,7
16	4669	2818	120	130	8,3
Ortalama(x)	4647	2819	71	77	10,0
S.D(σ)	124	59	35	36	5,5
Varyasyon Katsayısı(σ/x) %	2,67	2,09	49,3	46,7	55,0

Çizelge 2.1.'de de görüldüğü gibi ağırlık düşürücü testlerde alınan sonuçlar çok büyük standart sapmalara sahiptir.

[1] Hesaba katılmamıştır.

Bu çalışmanın sonucunda;

- Çatlak başlangıcı değişim katsayısı lifli beton ve normal beton için sırasıyla %51,9 ve %43,1 bulunmuştur.
- Daha güvenli sonuçlar, deney sayısını minimuma indirerek elde edilebilir.

Soroushian P. ve Elzafraney M. 'nin Çalışması;

Soroushian P. Ve Elzafraney M. çalışmasında hasarların beton performansı üzerinde ve küçük yapısal elemanlarda ne tür etkileri olduğunu araştırmak üzere deneysel bir çalışma yapmıştır[18]. Hasarların eğilme dayanımına, darbe direncine, geçirgenliğe ve çatlak ilerleyişine olan etkileri incelenmiştir. Deneyler normal ve yüksek dayanımlı betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Isınma-soğuma etkileri ile beton içindeki çimento-agrega etkileşiminde çatlaklar oluşur. Sonradan dış yükler ve çevresel etkilerle beton içinde çekme gerilmeleri ortaya çıkar. Doğal sonuç olarak beton performansında kayıplar ortaya çıkmaya başlar.

Elemanlar basınç, darbe, donma-çözülme, basınç+donma-çözülme ve yorulma gibi farklı hasar yaratan etkiler altında incelenmiştir. Silindir ve prizma geometrisine sahip olan elemanlarda silindir boyutları 102×51 mm, prizma boyutları ise 76×76×305 mm olarak seçilmiştir.

Karşılaştırmalı olarak elde edilen sonuçlardan çarpma etkisi göz önüne alındığında elde edilen sonuçlar;

- Darbe etkisi mikro çatlakların genişliklerini artırmaktadır.
- Mikro çatlak paterninin şekli ve ulaştığı boyutlar betonun dış yüklere karşı performansında önemli bir olgudur.

Marar K., Çelik T. ve Eren Ö.,'nün Çalışması;

Marar K., Çelik T. ve Eren Ö. çalışmasında ağırlık düşürücü alet kullanarak yüksek dayanımlı çelik lifle güçlendirilmiş betonun, basınç tokluğu ve darbe enerjisi arasındaki ilişki üzerine bir araştırma yapmışlardır[13]. Boy/çap oranları 60, 75 ve 83 olan kanca uçlu, beton hacminin 0,5%, 1,0%, 1,5% ve 2,0% oranında hacme sahip silindir elemanlar üzerinde hem basınç hem de darbe testleri yapılmıştır. Yutulan toplam enerjiyi bulmak için elemanların gerilme-birim deformasyon eğrileri çıkarılmıştır. Çelik liflerin elemanlara eklenmeleri betonun darbeye karşı dayanımını ve enerji yutma kapasitesini artırmıştır.

Deneysel çalışmada, ACI 544'ün normal beton için önermiş olduğu ağırlık düşürücü aletin, yüksek dayanımlı betonda düşürülen kütlenin hafifliği nedeniyle(4,54 kg) kullanılmasının zor olduğu belirtilmiştir. Fakat diğer taraftan da eğer kütle 13,5 kg'dan büyük olursa düşme sayısının azaldığı belirtilmiştir.

Elamanlarda su/çimento oranı 0,31 dir. Deneye tabi tutulacak silindirler 150x300 mm'lik silindirlerden kesilen 150 mm(çap)x60 mm(uzunluk) ebatlarındaki silindirler olarak belirlenmiştir. Düşürülen kütle 13,5 kg, düşme yüksekliği ise 0,3 m alınmıştır. Basınç deneyleri 3000 kN kapasiteye sahip bir test makinesi yardımıyla 0,03 mm/dakika oranlı bir yükleme ile yapılmıştır. Basınç testlerinde kullanılan gerilme-birim deformasyon eğrisi maksimum 0,023 mm/mm'lik birim deformasyon oranına kadar devam ettirilmiştir. Çarpma enerjisi ve basınç dayanımları 28 günlük elemanlardan elde edilmiştir. Çizelge 2.2.'de alınan sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

l/d oranı arttıkça basınç tokluğu ve darbe enerjisi artmaktadır. Yine l/d oranına göre aşağıda verilen logaritmik bağlantılar deney sonuçlarıyla elde edilmiştir.

$$E_{CT}(60) = 1392{,}8\ln(E_I / E_{I0}) + 1185{,}2 \quad (2.1)$$

$$E_{CT}(75) = 1706{,}4\ln(E_I / E_{I0}) + 1132{,}3 \quad (2.2)$$

$$E_{CT}(83) = 1735{,}6\ln(E_I / E_{I0}) + 1293{,}0 \quad (2.3)$$

Eş. 2.1, Eş. 2.2 ve Eş. 2.3 de E_{I0} yüksek dayanımlı normal betonun darbe enerjisidir.

Çizelge 2.2. Deneysel çalışmaya ait sonuçlar

l/d Oranı	$f_c^{'}$ (MPa)	Darbe Direnci(Düşme Sayısı)		Tam Göçmede E_I N m(VK)	0,023 mm/mm E_{CT} N m(VK)
		İlk Çatlak	Tam Göçme		
60	82,2	4	18	398(0,1404)	2933(0,0785)
60	82,8	8	45	994(0,0890)	4237(0,0600)
60	84,6	22	75	1656(0,0768)	5300(0,0634)
60	85,9	40	192	4240(0,0913)	6030(0,0450)
75	80,4	101	37	817(0,1013)	4421(0,0860)
75	82,5	17	56	1237(0,0722)	5400(0,0669)
75	84,2	29	151	3335(0,0874)	7041(0,0812)
75	87,9	43	276	6095(0,0670)	7873(0,0329)
83	83,0	116	48	1060(0,0971)	5081(0,0954)
83	83,9	21	68	1502(0,0905)	6469(0,0673)
83	86,0	33	172	3798(0,0876)	7320(0,0732)
83	87,3	81	373	8237(0,0346)	8552(0,0304)

$f_c^{'}$: Basınç dayanımı

E_I: Darbe enerjisi

E_{CT}: Basınç tokluk enerjisi

VK: Varyasyon katsayısı

Bu çalışmanın sonucunda;

- Ağırlık düşürücü bir darbe test aleti yardımıyla beton malzemesinin basınç dayanımı elde edilebilir.
- Basınç dayanımının önemli olduğu sistemlerde tasarımın daha kolay olması sağlanabilecektir.

Delhomme F., Mommessin M., Mougin J. P. ve Perrotin P.,'nin Çalışması;

Delhomme F., Mommessin M., Mougin J. P. ve Perrotin P., arazideki kaya dökülmelerinde, kaya çarpması ile betonarme döşemelerin davranışları üzerine gerçek hayatta da uygulanma fırsatı bulmuş bir çalışma yapmışlardır[9]. Özellikle betonarme döşemede zımbalama etkisi inceleme altına alınmıştır.

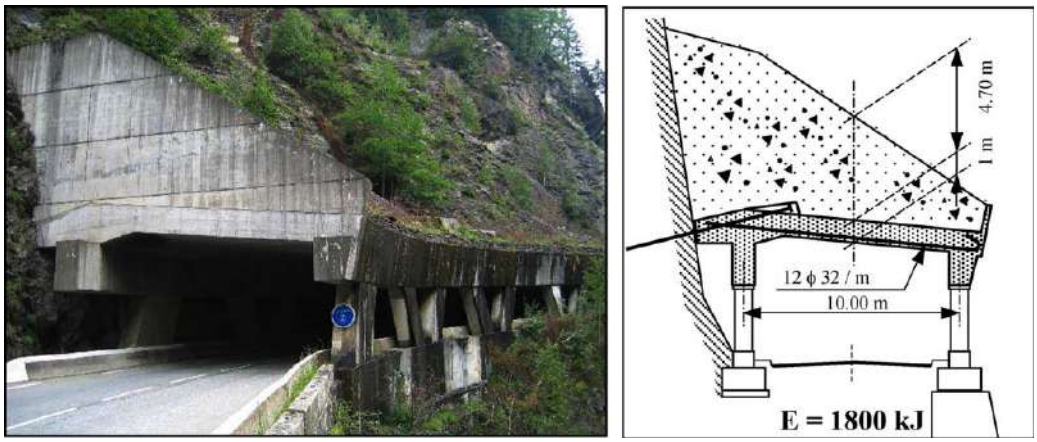
Geleneksel uygulama (Resim 2.1) olarak arazide kaya düşmelerine karşı otoyollar veya tren yolları gibi yapılarda tehlike arz edebilecek kesimler betonarme bir döşeme ile kaplanırlar. Bu döşeme, yüksek kesimlerden düşebilecek cisimlerin enerjilerinin kırılmasında görev alır.

Çalışmaya başlamadan önce, geleneksel uygulamadan daha ucuz ve daha sürekliliği olan bir koruma sistemi geliştirmek için literatürde geçen bazı kavramların anlaşılması gerektiği vurgulanmıştır.

Bunlar:

- Çarpışan iki elementin malzeme yapıları,
- İlk çatlakların ortaya çıkışı,
- Çarpan yapı veya aletin şekli,
- Hızlar,
- Çarpan yapı veya aletin çarpma açısı,
- Çarpmaya maruz kalan cisim veya yapının rijitliği olarak, sıralanmıştır.

Fransa'da bir otoyolu kaya düşmelerinden korumak için yapılmış döşemenin (Resim 2.1) incelenerek yeni bir döşeme sisteminin (Resim 2.2) uygulanması adına önce planlanan yapının 1/3'ü hazırlanarak test edilmiştir. 4,8 m genişliğinde, 12 m uzunluğunda ve 0,28 m kalınlığında, dayanımı 30 MPa olan betondan imal edilmiş betonarme bir döşeme hazırlanmıştır. Döşeme 22 metal ayak ile sabitlenmiştir. Metaller 100 mm yüksekliğinde, 70 mm çapında ve 2,9 mm kalınlığındadır. Burkulma dayanımları 260 kN'dur.

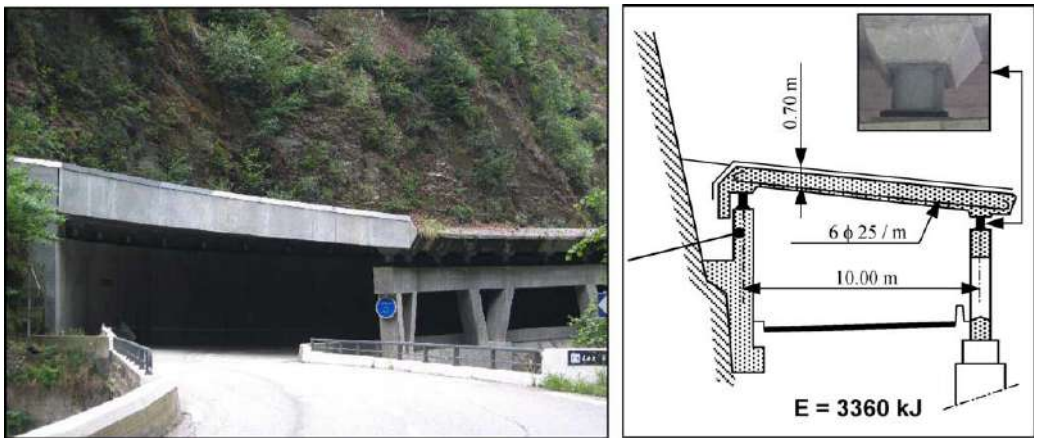


Resim 2.1. Geleneksel uygulama

Kaya düşmesini modellemede iki ayrı çarpma sınıfı incelenmiştir. Bunlar:

1. Eşdeğer Servis Limit Durumu(ESLD): Geri dönüşü mümkün hasarlar,
2. Eşdeğer En Büyük Limit Durumu(EELD): Geri dönüşü mümkün olamayan hasarlar(maksimum enerji seviyesi)

ESLD için 450 kg kütle 15 m yükseklikten, EELD için ise aynı kütle 30 m yükseklikten döşeme üzerine serbest düşmeye bırakılmıştır.



Resim 2.2. Yeni uygulama

Yukarda tariflenen deneysel prosedür altında tasarlanan sistemin kullanılabilirliği açıklanmıştır ve uygulanmıştır. Düşük enerjili şoklarda döşeme tüm çarpma enerjisini soğurmakta iken, yüksek enerjili darbelerde sistem gözle görülür bir hasara uğramaktadır. Fakat deneylerde görülmüştür ki etkin bir tamirat ile döşeme davranışı iyileştirilebilmektedir.

Bu çalışmada, döşemenin iki moda bağlı olarak hasar gördüğünü, bunların zımbalama ve eğime modları olduğunu belirtmişlerdir.

Server W. L.'nin Çalışması;

Server W. L., önceden çatlaklı beton numuneler üzerinde ASTM tarafından standartlaştırılmış test prosedürlerine uygun olarak üç noktalı eğilme testi yapmıştır[16].

Bu çalışmada kullanılan numunenin açıklık/genişlik oranı $L/W = 4$ tür ve çatlak açıları 60 dereceden, çatlak boyutu ise eğik yönde 0,5 mm den küçüktür. Server çalışmasında ASTM′nin nükleer basınç tankları için kullanılmasını önerdiği yöntemin detaylı bir çalışmasını sunmuştur.

Bu çalışmada varılan sonuç;

- Bu yöntemin değişik malzemeler için kullanılmasının gelecekte mümkün olabileceğidir.

Banthia N. P.'nin Çalışması;

Banthia N. P. doktora tezi olarak "Betonun Darbe Dayanımı" adlı deneysel çalışma olarak sunmuştur[5]. İlk olarak ifade edilen yaklaşım; statik yükler altında deformasyon oranlarına karşı hassas bir malzeme olan betonun ani ve çok hızlı gelişen deformasyon oranlarında sergileyeceği davranışı kestirmenin zor olduğudur. Deneysel çalışma 500 adet kiriş numunesi üzerinde yapılmıştır. Karışımlar 42 MPa dayanımlı ve 82 MPa dayanımlı betonlar şeklinde hazırlanmıştır. Çekiç düşme yüksekliği 150 mm'den 2300 mm'ye kadar seçilmiştir. Farklı bir gözlem aygıtı olarak 10000 fps yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Numune boyutları 1525x150x150 mm, 1400x100x125 mm ve 1200x100x125 mm şeklinde seçilmiştir. Normal dayanımlı betonlarda su:çimento:ince agrega: kalın agrega oranları sırasıyla 0,5 : 1 : 2 : 3,5 alınmıştır. 24 saat boyunca kalıpta bekletilen numuneler kür odasına alınmışlardır ve 1 aylıktan 1 yıllığa kadar ömre sahip numuneler çarpma testine tabi tutulmuştur. Yüksek dayanımlı beton numunelerde su/çimento oranı 0,33'e düşürülmüştür. Ayrıca yüksek dayanım elde edilmesi için kimyasal katkı mikrosilika kullanılmıştır. Su : çimento : mikrosilika : ince agrega : kalın agrega oranları sırasıyla 0,33:0,86:0,14:1,57:1,04 şeklinde alınmıştır. Güçlendirilmiş betonda, hacmin %5'i oranında 50 mm uzunluğunda çelik lifler ile toplam ağırlıkça %0,5 oranında 37 mm uzunluğunda polipropilen kullanılmıştır. Donatı ile güçlendirilmiş konvansiyonel betonda ise nervürlü 9,52 mm çapında iki adet çelik çubuk kullanılmıştır. Paspayı 25 mm dir. Çentikli numunelerde ise 65-70 mm arasında değişen çentikler açılmıştır.

Darbe testi aletinde potansiyel enerjinin çarpma anında kinetik enerjiye dönüşmesi yaklaşımı uygulamada kullanılan temel yaklaşımdır. Buradaki enerji dönüşümü

numune üzerinde çok çok hızlı bir şekilde gerçekleşen gerilme yığılımına neden olmaktadır.

Banthia deneylere başlamadan önce ölçüm aygıtları ve düşürülen çekicin sahip olduğu yerçekimi ivmesi için kalibrasyon çalışması yapmıştır. Hava direnci ve çekicin maruz kaldığı sürtünmeye bağlı olarak yerçekimi ivmesi hesaplanmıştır. Çekice kılavuzluk eden kısımların her testten önce temizlenmesi sağlanarak yerçekimi ivmesi 9,6 m/s^2 olarak hesaplanmıştır. Banthia, numuneler üzerine yerleştirmiş olduğu ivmeölçerler yardımıyla eğilme momenti ve ivme dağılımının matematiksel (doğrusal veya trigonometrik dağılım) özelliğine ulaşmak için çeşitli ampirik yaklaşımlar geliştirmiştir. Elde edilen moment ve gerilme eşitlikleriyle mesnetlerdeki ve orta noktadaki yüklere ulaşmaya çalışmıştır.

Normal dayanımlı beton ile yüksek dayanımlı betonun çeşitli şekillerde darbe yükü altındaki kıyaslaması yapılmıştır. Yüksek dayanımlı betonda statik durumda olduğu gibi darbe yükleri altında da daha yüksek eğilme momenti değerlerine ulaşılmıştır. Bununla beraber yüksek dayanımlı beton kırılma enerjisinin azlığına bağlı olarak normal dayanımlı betondan daha gevrek bir davranış sergilemektedir. Banthia tez çalışmasında, beton malzemesinin deformasyon oranına duyarlı olduğunun daha önceden yapılan birçok çalışma sayesinde bilinmekte olduğunu belirtmiştir. Fakat ulaşılan sonuçların hemen hepsinin ampirik olduğunu, dahası farklı deneysel metotlar ve en önemlisi meydana gelen kayıplar nedeniyle elde edilen sonuçlar arasında bir uyumun gözlenemediğini vurgulamıştır.

Teorik olarak enerji kayıpları ihmal edilirse düşme öncesi ve çarpma anında enerji eşitlenmesi sağlanacaktır. Fakat uygulamada görülmüştür ki enerji kayıpları ihmal edilemeyecek kadar önemlidir. Banthia, çalışmasında kayıp olan enerjinin beton numune üzerine tam çarpma anında ve tam kırılma anında olmak üzere iki farklı zamanda aktarılabileceğini enerjinin korunumu kanunundan faydalanarak açıklamaya çalışmıştır. Çalışmalar boyunca serbest düşme ile çarpma anındaki enerji değişimi aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir.

$$\Delta E(t) = \frac{1}{2} m_h \left[2a_h h - (\sqrt{2a_h h} - \frac{1}{m_h} \int P_t(t)dt)^2 \right] \quad (2.4)$$

Eş. 2.4'de;

a_h : Çekiçin ivmesi,

h : Çekiçin düşme yüksekliği,

m_h : Çekiçin kütlesi,

P_t : Etkileşim anındaki yüktür.

Deneysel çalışmanın diğer bir kısmında, çentikli numuneler üzerinde çatlak boyutu ve çatlak gelişim hızının göçmeye olan etkisi incelenmiştir. Bu kısımda, ulaştığı herhangi bir kritik değerde malzemeyi göçmeye götürecek olan gerilme yoğunluk faktörü $K_{ıc}$ üzerinde yoğunlaşılmıştır. Deneysel çalışmada normal dayanımlı ve lif ile güçlendirilmiş beton numunelerin karşılaştırılmalarına yer verilmiştir. Çentikler 65 mm ile 70 mm derinliğinde ve yaklaşık 3 mm genişliğindedir. Statik halde yüksek dayanımlı beton normal dayanımlı betondan dirençli gözükürken, çentikli numunelerde dinamik halde yüksek dayanımlı betonun daha zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Güçlendirmenin başka bir yolu olan çelik çubukların kullanıldığı numuneler üzerinde yapılan inceleme deneysel çalışmanın diğer bir kısmını oluşturmaktadır. Konvansiyonel betonda gerilme uygulama oranındaki artışın maksimum eğilme momentinde bir artışa neden olduğu gözlenmiştir. Yani yük dinamik etkiye doğru yaklaşırken malzeme daha elastik bir davranış sergilemektedir. Yine, su/çimento oranındaki azalma pik yüklerin artışına neden olmaktadır.

Banthia çok detaylı ve çok yönlü olarak yapmış olduğu deneysel çalışmalar ışığında aşağıda sıralanmış olan çok önemli sonuçlara ulaşmıştır. Sonuçlar sıralanırken şu husus göz önünde bulundurulmalıdır; beton gevrek bir malzeme olduğu için çarpma tarzı ani yüklerde bazı ciddi kusurlara sahiptir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar;

- Normal beton numuneler için;

1. Çarpma etkisi altında kırılma enerjileri ve mukavemetleri statik testlerdekinden daha fazla bulunmuştur.
2. Çarpma etkisi koşullarında yüksek dayanımlı beton(mikrosilika ile) normal betondan daha fazla dayanıklı gözükmektedir.
3. Darbe testleri sayesinde malzemelerin kırılma toklukları hesaplanabilmektedir.
4. Numunelerin analitik olarak davranışlarının incelenmesi enerji korunumu prensibine veya dinamik yüklerin eşitliği prensibine uygundur.

- Lif ile güçlendirilmiş betonlar için;

1. Çelik lifler veya polipropleni lifler statik ve dinamik durumda karışımın elastikliğini artırmaktadırlar.
2. Polipropleni lifler genelde kırılmaya maruz kalırken çelik lifler ise çoğunlukla birbirlerini bırakmaktadırlar yani yerlerini terk etmektedirler.
3. Çelik lifler yüksek dayanımlı numunelerde çok daha etkin olarak işlev görmektedirler (Mikrosilika ile lifler arasındaki bağın kuvvetli olduğu düşünülmektedir.).
4. Çentikli numunelerde liflerin varlığı büyük oranda kırılma tokluğunu fazlalaştırmaktadır.

- Konvansiyonel beton numunelerde;

1. Kırılma enerjisi açısından çubuklar ile güçlendirilmiş numunelerde kırılma enerjisi açısından daha iyi bir performans gözlenmektedir.
2. Kesme donatısı kullanılması çarpma performansını dolayısıyla elastikiyeti artırıcı bir etki yapmaktadır.
3. Konvansiyonel donatılı beton numunelere polipropleni eklenmesi darbe etkisindeki sünekliği artırmaktadır.

Banthia tez çalışmasını sonuçlandırırken, global anlamda geçerli olabilecek bir test tekniği yöntemi geliştirilmesiyle bir çok değişik kaynaktan gelen verilerin geçerliliğinin/güvenilirliğinin ortaya çıkarılabileceğini söylemektedir.

Badr A. ve Ashour A.F. Çalışması;

Badr A. ve Ashour A.F. çalışmasında ACI Committee 544'ün tekrarlı düşen ağırlık testinin sonuçlarının büyük değişimleri olduğu için sık sık eleştirildiğine dikkat çekmişlerdir[4]. Bu çalışmada bu büyük değişimlerin kaynağı tespit edilmiş ve bu sonuçlara göre ACI testinde değişiklikler yapılmasını önermişlerdir.

Bu değişimleri önermek ve sonuçları değerlendirebilmek için polipropilen lifli betondan iki grup halinde 40 adet deney elemanı hazırlamışlardır. Her iki metodla yapılan çalışmaların sonuçları sayısal analiz yapılarak karşılaştırılmıştır.

Betonların her ikisindeki sonuçlar arasındaki farklar ve benzerlikler belirlenmiştir. Polipropilen lifli beton elemanların ACI testi ile bulunan çarpma direnci, ilk çatlaktaki ve en son durumdaki değerleri sırasıyla 58.6% ve 50.2% olup değişim katsayısının büyük olduğunu ortaya koymuştur.

Diğer test grubu ile yeni önerilen yönteme göre deney yapıldığında değişim katsayısı 39.4% ve 35.2% ye inmiştir. Bu da güvenilir sonuçları önemli şekilde geliştirmiştir.
Bu çalışmanın sonucunda; deney elemanı sayısının çok fazla olması ekonomik ve pratik sebeplerden dolayı yeterince iyi değildir. Çarpma test standardını geliştirmek için mevcut eleman sayısını azaltmak iyi bir adımdır.

Zineddin M. ve Krauthammer T.'nin Çalışması;

Zineddin M. ve Krauthammer T. çalışmasında betonarme plakların farklı şekillerde güçlendirerek çarpma yükleri altında dinamik tepkilerini ve davranışlarını incelemişlerdir[23]. Betonarme döşemeler üzerinde yapılan deneylerde düşme yüksekliği artıkça sünek kırılmadan gevrek kırılmaya doğru mod değiştirmektedir.

Çalışmada 3 farklı tip için 90×1524×3353 mm boyutlarında döşemeler hazırlanmıştır. 1. tipteki döşemeler 152×152 mm boyutlarında ve betonun her iki yüzeyin 25 mm altına yerleştirilmiş kaynaklı çelik hasırla, 2. tip teki döşemeler 152×152 mm boyutlarında ve plağın tam ortasına yerleştirilen No.3 çelik bardan yapılmış hasırla ve 3'üncü tipte ise 152×152 mm boyutlarında betonun her iki yüzeyinin 25 mm altına yerleştirilmiş No.3 çelik bardan yapılmış hasırla güçlendirilmiştir. Çarpan kütle sırasıyla 152, 305 ve 610 mm düşme yüksekliklerinden düşürülmüştür. Çarpan kütlenin ağırlığı 2608 kg dır. Çeliklere deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir.

Bu çalışmada, hem numune üzerine hem de çekicin hareketini sağlayan bölgelere ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Üç ayrı güçlendirme için, üç farklı düşme yüksekliği seçilerek deneyler yapılmış ve yük-zaman grafikleri çıkartılmıştır.

Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Düşük yükleme oranlarında sünek olarak tasarlanan döşemeler, lokalize edilmiş çarpma yükünde gevrek olarak göçmektedirler.
- Döşemeler, çarpma etkisinde zımbalama kesmesiyle göçmektedirler.
- Yüksek düşmelerde daha küçük göçme deliği oluşmaktadır.
- Yükseklik arttıkça zımbalama ve direk kesme tehlikeli olmaktadır.
- Daha çok çelik donatı lokalize olmuş bir göçmeye götürmektedir.
- Donatı yerleşimi döşemenin göçme modunu etkilemektedir.

Erki M.A. ve Meier U.'nun Çalışması;

Erki M.A. ve Meier U. çalışmasında CFRP ve çelik levha ile dıştan güçlendirilmiş betonarme elemanların çarpma etkisi karşısındaki davranışlarını incelemiştir[10]. Deneylerde kullanılmak üzere 8 m'lik 4 adet kiriş elemanı hazırlamış ve bu elemanlardan ikisi CFRP tabakalarıyla, diğer ikisi de çelik levhalarla dıştan güçlendirilmiştir. Çarpma kuvveti, bir ucundan kaldırılan basit bir kirişin belli bir yükseklikten bırakılması sonucunda oluşturulmuştur.

Deneyler için, kirişin bir ucu kaldırılmış ve sonrasında belirlenmiş yükseklikten bırakılmıştır. Çarpma etkisi kuvveti, kirişin bırakılan ucunun şok emici sönümleyicinin bulunduğu mesnetle temas ettiği anda oluşmuştur. CFRP tabaka ile güçlendirilmiş donatılı kirişler için dört tane deney yapılmıştır. 1 no'lu kiriş, 0,5 m, 1,0 m ve 1,5 m olmak üzere üç farklı yükseklikten bırakılmıştır. 2 no'lu kiriş ise sadece 2,0 m yükseklikten bırakılmıştır. Çelikle güçlendirilmiş olan kirişlerden 1 no'lu kiriş 1,7 m ve 2,0 m'den 2 no'lu kiriş ise 2,2 m yükseklikten bırakılmıştır. Yükseklikler, en üst limit durumlarına ve bir öncekine göre orta seviye koşulları oluşturacak şekilde seçilmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda, CFRP tabakası ile güçlendirilmiş betonarme kiriş çelik tabakalarla dışarıdan güçlendirilmiş kirişlerin yutabildiği enerji kapasitesine kadar ulaşamasa da, çarpma etkisi kuvveti altında iyi bir dayanım göstermiştir. Bu deneylerde CFRP tabakaları, beton yüzey ile tabaka arasındaki bağlantı kaybı ve çekme gerilmeleri esnasında hasar oluştuğu görülmüştür. Bu tabakalardan birinde kopma yaşandığında aşırı yüklemeye maruz kalan diğer tabaka da, kirişte genişleyerek büyüyen bir çatlakla kesiştiği yerde çekme gerilmesi sebebiyle hasara uğramıştır.

3. DENEY ve ÖLÇÜM DÜZENEĞİ

Deney düzeneği ve deneylerde kullanılacak ölçüm araçları literatür araştırması sonucu belirlenmiştir. Bu araştırmanın sonucunda deney ve ölçüm düzeneği tasarlanırken, yapılması planlanan deney koşullarına göre tasarlanmıştır. Bunun sebebi ise halen çarpma testlerinde kullanılacak olan deney düzeneği için standart olmamasından kaynaklanmaktadır. Daha önce yapılan çalışmaların sonuçları yapılarda meydana gelen kesme ve eğilme hasarlarını ve deformasyonları en iyi modelleyebilen çarpma deney düzeneğinin ağırlık düşürücü deney düzeneği olduğunu göstermiştir.

3.1. Ağırlık Düşürücü Deney Düzeneği

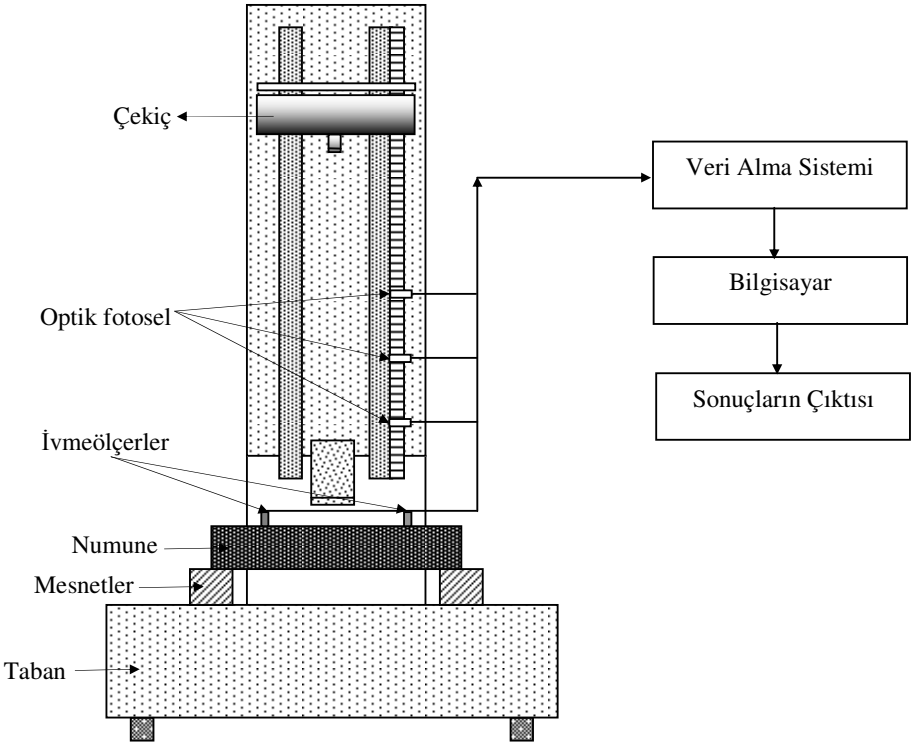
Çalışmada kullanılacak olan deney düzeneği serbest ağırlık düşürücü olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.1). Deneylerde kullanılacak eleman boyutlarına ve elemanlarda kullanılan malzeme cinslerine göre deney düzeneğinin boyutları belirlenmiştir.

Ağırlık düşürücü deney düzeneğinde, potansiyel enerjinin çarpma anında kinetik enerjiye dönüşmesi yaklaşımı uygulamada kullanılan temel yaklaşımdır. Buradaki enerji dönüşümü eleman üzerinde çok çok hızlı bir şekilde gerçekleşen gerilme yığılımına neden olmaktadır.

Aşağıda sıralananlar göz ardı edilmemek kaydıyla ağırlık düşürücü bir test düzeneği darbe etkisinin gözlenmesi için kullanılabilir;

- Çekiç ve numune arasındaki etkileşim yükü numunenin içsel etkilerinden dolayı etken eğilme yükü değildir.
- İçsel kuvvetlerin tam olarak ortaya çıkarılması ile numune boyunca meydana gelen ivme dağılımı belirlenebilir.
- Numune boyunca bazı yaklaşımlar yapılarak içsel kuvvetlerin elde edilmesinde matematiksel formülasyonlar geliştirilebilir.

- Enerjinin korunumu kanununa göre düşme sırasında kaybedilen enerji kiriş numunesi tarafından kazanılan enerjiye eşittir[5].



Şekil 3.1. Ağırlık düşürücü deney düzeneğinin tasarım şeması

Deneylerde kullanılan deney düzeneği tasarlanırken ilk önceliğimiz laboratuarımızda bu deney düzeneği ile çok çeşitli deneyler yapılabilmesi ve ihtiyaçlara cevap verebilir olması göz önüne alınmıştır. Tasarlanan deney düzeneği, farklı yükseklikler ve farklı ağırlıklar seçme imkânı sağlamaktadır (Resim 3.1). Tasarlanan deney düzeneğinin geometrik boyutları belirlenirken birinci sırada deneylerde kullanılacak numune boyutları dikkate alınmıştır. Numunenin yerleştirileceği taban kaidesi 1000×1000×70 mm ebatlarında kare şeklinde çelik levhadan yapılmış ve bir kaide üzerine yerleştirilmiştir. Çelik levhanın kalın seçilmesinin sebebi ise deney elemanına çekicin çarpması anında ortaya çıkan hareketin sönümlenmesi ve çarpma noktasının ekzantirisitesinin kaymamasıdır. Böylelikle deney düzeneğinin yaklaşık 500 kg ağırlığındaki tabanı sönümleyici görevi görmektedir.



Resim 3.1. Deney düzeneği

Deney düzeneğinde bulunan çekiç olarak adlandırılan düşen kütle farklı deneyler yapabilmek için ağırlığı arttırılabilir şekilde tasarlanmıştır(Resim 3.2). Çekiç alüminyum malzemeden yapılmıştır. Çekicin kendi kütlesi 5,250 kg dır. Çekiç

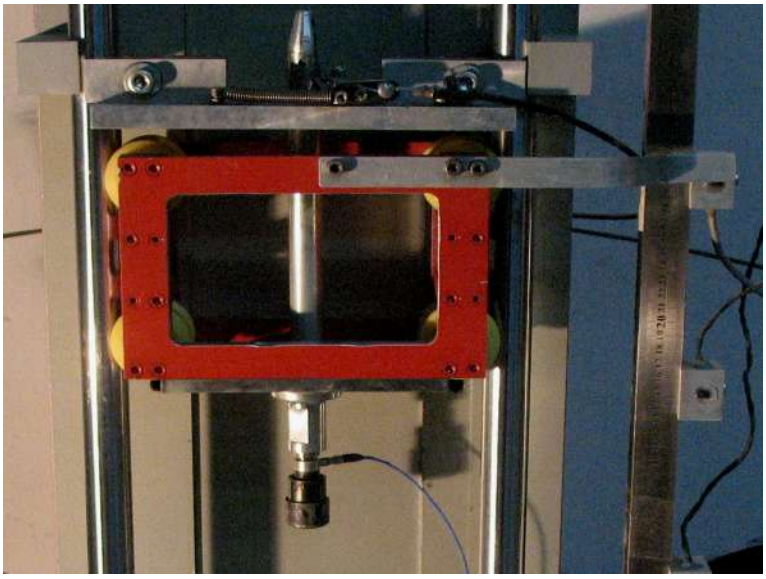
kütlesini değiştirmek için iç kısmına ağırlık takılmasını sağlayan ve çarpma anında eklenen ağırlıkların hareket etmesini engelleyen vidalama sistemi yerleştirilmiştir. Çekicin sürtünmesini en aza indirebilmek için yatakların sürtünen yüzeyleri azaltılmış ve dört köşesinde bulunan iç yüzeyleri yuvarlatılmış kestamit malzemesinden yapılmış tekerleklerle yatağına oturtulmuştur.

Kestamit, polyamit grubundan bir malzemedir, döküm yoluyla imal edilir, sıkı bir dokuya ve sertliğe sahiptir. Dişli yapımında özellikle büyük çapta dişlilerde tercih edilir. Dişlilerin yataklanmasını düzgün yapılması koşulu ile uzun süreli dayanım elde edilir. Bir diğer üstünlüğü de aşınma mukavemetinin çok yüksek olmasıdır. Metallerle sürtünerek çalışma durumunda dahi çok yüksek aşınma mukavemetine sahiptir. Özellikle darbelere, yüke, yorulmalara karşı yüksek dirençlidir. Isı dayanımı yüksek, sürtünme katsayısı düşüktür. Kestamit malzemesinin temel özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kestamit malzemesinin temel özellikleri

Sembolü	PA 6
Yoğunluk(g/cm^3)	1,12-1,14
Kopma Mukavemeti(MPa)	39-78
Kopma Uzaması	30-300
Eğilme Mukavemeti(MPa)	49-127
Basma Mukavemeti(MPa)	58-107
Darbe Mukavemeti(MPa)	0,29-1,47
Sertlik Shore(D)	M80-85, R115-120, D85-90
Sürtünme Katsayısı	0,15-0,42
Havadan Aldığı Nem(%)	2,5-3
Sudaki Doygunluk(%)	8,5-10
Max. Çalışma Sıcaklığı(°C) Uzun-Kısa Süre	90-150

Çekicin ucu değiştirilebilir olarak yapılmıştır. Bunun nedeni düşme noktasında bölgesel çarpmanın boyutlarını ve etkilerini değiştirebilmektir. Çekicin düşürme mekanizması mekanik olarak imal edilmiştir. Böylelikle deney yapılacak yüksekliğe çekiç ve tutma mekanizması birlikte pratik ve hızlı bir şekilde çıkarılabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Resim 3.2. Çekiç

Çekicin aynı eksende kalarak serbest düşme yapması için iki tarafında millerle kızaklanmıştır. Mil boyu 2500 mm olup deney yüksekliğini belirlemektedir. Çekicin oturduğu miller 30 mm çapında kromdan yapılmıştır. Sürtünmeyi en aza indirmek için yüzeyi pürüzsüz olacak şekilde özel olarak taşlanmıştır. Miller, deney düzeneğinin kulesine belirli noktalardan sabitlenmiştir. Ayrıca üst kısmı özel olarak dizayn edilmiş olup yüksekliği arttırmaya imkân vermektedir. Kızaklar arası mesafe 200 mm dir. Kızak bağlantı kulesi 300×300 mm kesitindedir.

Çekiç düşme yüksekliğini ayarlayabilmek için üst tespit çenesi kayar şekilde tasarlanmıştır. Serbest düşme esnasında çekicin kızaktan kurtularak tabana çarpmasını engellemek için bir sistem ve sisteme de yaylı/kauçuklu darbe sönümleyici yerleştirilmiştir.

Kızak milleriyle paralel olarak yataklanmış bir profil kızak bağlantı kulesine monte edilmiştir. Bu profil üzerine optik fotoseller yerleştirilerek çekicin harekete başladığı andan çarpma anına kadar geçen sürenin ölçülmesi sağlanmıştır. Ölçümlerin alındığı ve işlendiği elektronik aksam da bağlantı kulesi üzerine okumalar görülecek şekilde yerleştirilmiştir.

3.2. İvmeölçerler

3.2.1. Genel bilgi

İvmeölçerler, genel amaçlı mutlak hareket ölçümlerinde, şok ve titreşim ölçümlerinde kullanılırlar. Bir yapının ya da bir makinenin ömrü, çalışma sırasında maruz kaldığı ivmenin şiddeti ile orantılıdır. Bir yapının çeşitli noktalarındaki titreşimin genliği ve fazı, bir modal analiz yapılabilmesine izin vermektedir. Yapılacak olan bu analiz sonucunda dinamik olarak çalışacak parçaların çalışma modları belirlenerek tüm sistemin dinamik karakteri ortaya konabilmektedir.

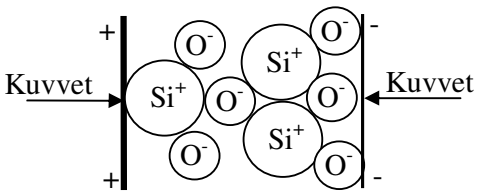
Sismik ivmeölçerler ile yer, bina, köprü üzerinde deprem, inşaat, madencilik çalışmaları, büyük nakliye vasıtaların yol açtığı titreşimler ölçülebilir. Yüksek frekanslı ivmeölçerler ile çarpma testleri, çok yüksek devirli motorların testleri yapılabilir. İvmeölçerler ölçme tekniğine göre de farklı sınıflara ayrılırlar. Bunlar:

- Piezoelektrik İvmeölçerler,
- Kapasitif İvmeölçerler.

Piezo kelimesi Yunanca sıkmak anlamına gelmektedir. Piezoelektrik elemanlar bir dış kuvvet altında kaldıkları zaman, karşılıklı yüzeyleri üzerinde bir elektrik yükü oluşur.

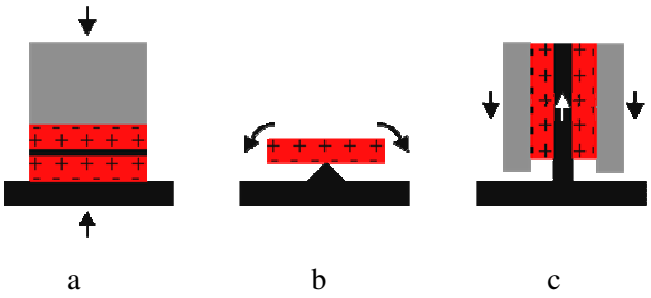
Şekil 3.2'de gösterilen büyük daireler silikon atomlarını, küçük olanlar ise oksijen atomlarını belirtmektedir. Doğal ya da işlenmiş kuvartz kristali en hassas ve kararlı piezoelektrik malzemelerden biridir. Doğal malzemelerin yanı sıra yüksek

teknolojilerle üretilen polikristalin ve piezoseramik gibi malzemeler de yüksek elektrik alana maruz bırakıldıklarında piezoelektrik özellik kazanmaları sağlanabilmektedir. Bu kristaller çok yüksek değerde yük çıkışı üretirler. Bu özellikleri sayesinde de özellikle düşük genlikli sinyallerin ölçülmesinde kullanılırlar.



Şekil 3.2. Piezo yapı

Şekil 3.3'de gözüktüğü gibi piezoelektrik algılayıcılarda farklı boyut ve şekillerde piezoelektrik malzemeler kullanılabilir. Şekil 3.3.a'da basma kuvvetini temel alan tasarım, yüksek bir rijitlik göstermektedir. Bu özelliği sayesinde yüksek frekanslı basınç ve kuvvet ölçümlerinde kullanılmaktadır. Olumsuz bir özelliği sıcaklık değişimlerine gösterdiği hassasiyettir. Şekil 3.3.b'de basit bir tasarım olan eğilmeli tasarım, düşük frekans aralığı ve düşük darbe dayanımı nedeni ile dar bir kullanım sahasına sahiptir. Şekil 3.3.c'de kayma gerilmesi tasarımı geniş frekans aralığı, düşük eksen kaçıklığı hassasiyeti, ısıl değişimlerden az etkilenmesi gibi olumlu özellikleri sayesinde ivmeölçerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Piezoelektrik algılayıcılarda piezo malzeme şekilleri
a. Basınç b. Eğilme c. Kayma

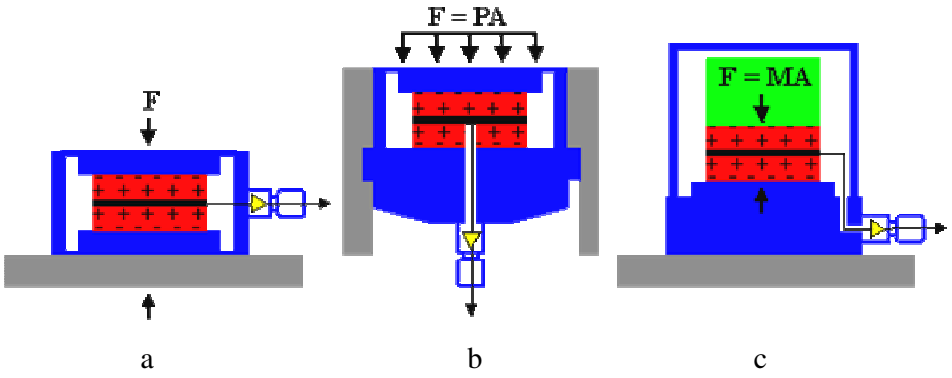
104×10^9 N/m^2 gibi birçok metale yakın bir sertlik derecesine sahip olan piezoelektrik malzemeler, çok küçük bir yer değişimi altında bile büyük bir çıkış verirler. Bir diğer deyişle piezoelektrik malzemeler fiziksel olarak kalıcı bir değişime uğramazlar. Bu sebeple piezoelektrik algılayıcılar çok sağlam bir kılıfta korunur ve geniş bir genlik aralığında mükemmel bir doğrusallık gösterirler. Doğru seçilmiş bir sinyal koşullama sistemi ile birlikte kullanıldığında, bu tip algılayıcılar 120 dB gibi çok geniş bir genlik aralığına sahip olmaktadırlar. Uygulama açısından bu özellik, aynı piezoelektrik ivmeölçer ile 0,0001 g'den 100 g'e kadar geniş bir aralıkta ölçüm yapılabilir anlamına gelmektedir.

Piezoelektrik malzemelerden bahsederken üzerinde önemle durulması gereken diğer bir nokta da bunların sadece dinamik ya da diğer bir değişle değişen durumları ölçebildiğidir. Piezoelektrik algılayıcılar, yerçekimi ivmesi, barometrik basınç, ağırlık kuvveti gibi statik, yani zamanla değişmeyen büyüklükleri ölçemezler. Bu sabit olaylar ilk anda bir çıkış doğururlar. Fakat bu sinyal, piezoelektrik malzemenin ve algılayıcının bağlı olduğu elektronik devrenin zaman sabitine bağlı olarak, zamanla yok olacaktır. Bu zaman sabiti, cihazın üzerindeki kapasitans ve direncin oluşturduğu, birinci dereceden yüksek frekans geçiren filtreden kaynaklanmaktadır. Bu filtre cihazın ölçebileceği en düşük frekansı belirlemektedir. Kuvvet, basınç ve ivme algılayıcılarında piezoelektrik malzeme kullanılmaktadır.

Kuvvet, basınç ve ivme algılayıcılarının yapıları Şekil 3.4'de görülmektedir. Bu şekil üzerinde gösterilen gri renkli kısımlar test edilen cismi, mavi renkli kısımlar algılayıcı muhafazasını, kırmızı kısımlar piezoelektrik malzemeyi, siyah kısımlar şekil değişimi gösteren kristalin üzerinde oluşan yükün toplandığı elektrodları ve sarı renkli kısım da elektrik yükü şeklindeki sinyalin voltaj sinyaline çevrildiği mikro-devreyi belirtmektedir. İvmeölçerde ayrıca yeşil renkle gösterilen sismik kütle vardır. Görüldüğü gibi, bu üç tip algılayıcının iç yapıları birbirinden çok farklı değildir. Hareket ölçen ivmeölçerlerdeki kristallerin üzerine oturan sismik kütle, algılayıcının üzerine takıldığı cismin hareketini izlemek zorundadır. Kristallerin üzerine etkiyen kuvvet Newton'un İkinci Hareket Kanunu uyarınca,

$$F=m\times a \tag{3.1}$$

eşitliğinden hesaplanır. Kuvvet ve basınç algılayıcıları neredeyse aynı özellikleri taşırlar. Aralarındaki temel fark basınç algılayıcılarının basıncı toplamak için bir diyafram kullanmasıdır.



Şekil 3.4. Piezoelektrik algılayıcılar
a. Kuvvet b. Basınç c. İvme algılayıcıları

3.2.2. Piezoelektrik ivmeölçerler

Piezoelektrik ivmeölçerler çok düşük frekanslı sismik uygulamalardan, çok yüksek frekansta doğrusal çalışma aralığı gerektiren çarpma testlerine kadar birçok ölçme uygulamasında kullanılan, küçük boyutlu, yüksek sıcaklık aralığında çalışabilen, endüstriyel standartlarda kılıf içinde yapılandırılmış transdüserlerdir. Kuvars ya da seramik kristaller bir kuvvet altında kaldığında picocoulomb seviyesinde elektrik yükü üretirler. Bu elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi yer çekimi ivmesinin değişimi ile doğru orantılıdır. İvmeölçerlerdeki sismik kütlenin ivme altında maruz kaldığı atalet kuvveti piezoelektrik kristale etkir ve ivme ile doğru orantılı bir elektrik sinyali çıkışı verir. Mikro elektronik devreye sahip piezoelektrik ivmeölçerlerin içinde sinyali taşınabilir voltaj sinyaline çeviren bir sinyal koşullayıcı devre vardır. Bu tip algılayıcılar gürültüden minimum etkilenirler. Üzerinde çevirici mikro elektronik devre olmayan algılayıcılar harici bir çevirici ile kullanılırlar. Bu tip algılayıcılar yüksek sıcaklıktaki uygulamalarda kullanılmak için idealdirler.

3.2.3. Kapasitif ivmeölçerler

Kapasitif ivmeölçerler düşük seviyeli ve düşük frekanslı titreşimleri, statik ivmeleri ölçmede kullanılırlar. Karşılıklı yerleştirilmiş kapasitör şeklinde çalışan iki plaka arasındaki kapasitansın değişmesi prensibi ile ölçüm yaparlar. Bu plakalar arasındaki mesafe ve dolayısı ile kapasitans ivme altında değişir ve ivme ile doğrusal bir sinyal doğururlar. Bu tip Algılayıcılar özel bir sinyal koşullama gerektirmezler. 12VDC ya da 24 VDC ile beslenmek sureti ile çalışırlar. Özellikle robotik, otomotiv sürüş kalite testleri, bina dinamiği ölçümü gibi yerlerde kullanılırlar.

3.2.4. Deneylerde kullanılan ivmeölçer: Model 353B02

Deneylerimiz için piezoelektrik ivmeölçerleri tercih edildi. PCB Group firmasına ait piezoelektrik ICP tipi ivmeölçerlerden 2 adet Model 353B02 kullanıldı(Resim 3.3).

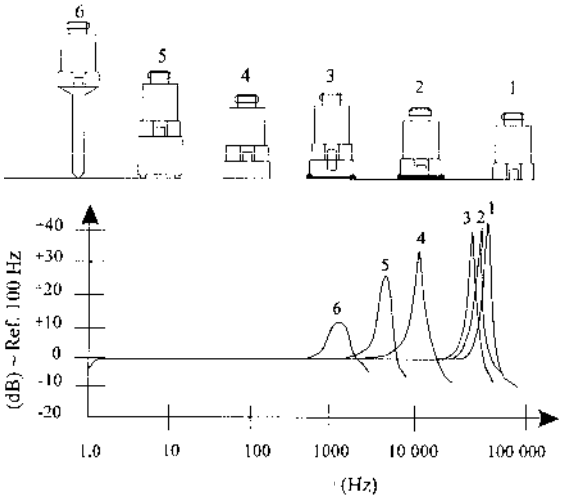


Resim 3.3. Model 353B02

ICP tipi ivmeölçerlerin üstünlükleri;

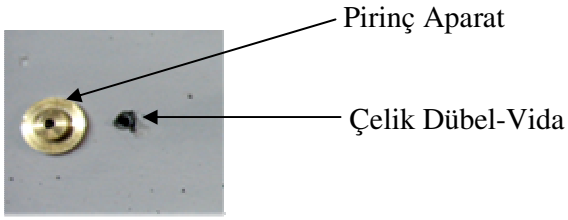
- Uygun tip ve uzunlukta kabloya bakmaksızın sabit voltaj hassasiyeti,
- Düşük empedanslı çıkış sinyali, oldukça uzun kablolarda bile çevre etkilerine rağmen sinyal kalitesini kaybetmeme,
- Düşük gürültü aralığı, veri toplama donanımları, kaydedici, sinyal çözümleme, standart okuyucu ile voltaj-çıkış sinyali uyuşması olarak sayılabilir.

Bu tip ivmeölçerlerle ölçümleri almak için montaj şekilleri vardır. Bu montaj şekillerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Montaj yapılan yerin karakteristik özellikleri, pürüzsüzlük, sıcaklık değişim büyüklüğü, erişilebilirlik ve taşınabilirlik son derece önem teşkil etmektedir. Firmanın kendi laboratuarlarında yaptığı testlerle montaj şeklinin hassasiyetleri yüksek frekans altında test edilip grafik halinde Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. İvmeölçerlerin montaj şekilleri ve yüksek frekansa etkileri
1. Vida ile 2. Yapıştırıcı ile 3. Montaj pedi ile 4. Düz mıknatıs ile
5. Çift taraflı mıknatıs ile 6. El çubuğu ile(Manual)

Çarpma anında yüksek frekanslar oluştuğu için ayrıca beton üzerine tutturabilmek için vida ile montaj şekli tercih edilmiştir. Optimum bağlama düzenlemeleri önemli ölçüde ölçümün doğruluk payını arttırmaktadır. En iyi performans için, özellikle yüksek frekanslarda, ivmeölçerin tabanı ve test edilecek nesnenin yüzeylerinin temiz, düz, pürüzsüz, çiziksiz olmasına dikkat edilmelidir. Vidalı montaj için beton üzerine delik açılmış ve bu deliklere çelik dübel yardımı ile vidalar yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerin ölçüm değerlerini hassas bir şekilde okuyabilmesi için iletkenliği iyi olan pirinç malzemeden montaj aparatı yapılmış ve bu aparat ile ivmeölçerler beton numune üzerine monte edilmiştir(Resim 3.4).



Resim 3.4. Montaj yeri ve aparatı

Kullandığımız ivmeölçerlerin teknik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Model 353B02 İvmeölçerin teknik özellikleri

Özellik	**Değer**
Hassasiyet(±5 %)	2,04 mV/(m/s^2)
Ölçüm Aralığı	± 2453 m/s^2
Frekans Aralığı (±5 %)	1-7000 Hz
Frekans Aralığı (±10 %)	0,7-10 000 Hz
Frekans Aralığı (±3 dB)	0,35-18 000 Hz
Rezonans Frekansı	≥38 kHz
Genişbant Hassasiyeti(1-10 000 Hz)	0,05 m/s^2
Düzensizlik	≤1 %
Çaprazlama Hassasiyeti	≤5 %
Aşırı Yük Sınırı	98 100 m/s^2
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +121 °C
Uyarma Voltajı	18-30 VDC
Sabit Akım Uyarma	2-20 mA
Çıkış Empedansı	≤100 ohms
Çıkış Öngerilim Voltajı	8-12 VDC
Boşaltım Zamanı	0,5-2,0 s
Hazır Hale Gelme Zamanı	< 5 s
Algılama Elemanı	Quartz
Elektrik Bağlantısı	10-32 Koaksiyal Jak
Elektrik Bağlantı Yeri	Üst
Ağırlık	10 gr

3.3. Kuvvet Algılayıcısı

3.3.1. Genel bilgi

Kuvarz kuvvet algılayıcıları, sıkışma, çekme gerilmeleri, darbe, tepki ve etki kuvvetlerini ölçen sağlam, uzun ömürlü, dinamik hissedici elemanlardır. Kullanım alanlarının başında, darbe kuvvetlerinin izlenmesi, çarpma testleri, baskı kuvvetlerinin izlenmesi, kuvvet kontrollü zorlanmış titreşimlerin izlenmesi, mekanik empedans, talaşlı imalat, düşürme testleri, titreşim uyaranları, nüfuz etme(penetrasyon) testleri, mukavemet testleri, kopma noktası testleri, tüm soğuk ve sıcak plastik şekil verme işlemleri, kaynak işlemleri ve test işlemleri gelmektedir.

Kuvvet algılayıcılarını seçerken test edilen ortamın özellikleri mutlaka göz önünde tutulmalıdır.

Kuvarz kuvvet algılayıcılarının bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çelikle kıyaslanabilecek kadar yüksek rijitlik,
- Yüksek voltaj-düşük empedanslı çıkış(ICP tip algılayıcılar için)
- Hızlı yüksek frekans cevabı
- Küçük boyutlarda büyük kuvvet sinyallerini algılama özelliği
- Büyük statik yükler üzerindeki küçük kuvvet dalgalanmalarını ölçme yeteneği
- Rijid yapısı sayesinde dayanıklı ve uzun ömürlüdür
- Çok iyi doğrusallık, sabitlik ve tekrarlanabilirlik
- Statik etkilere gösterdiği etki sayesinde statik kalibrasyon yapılabilir ve sabit ısıl şartlar altında statik ölçümler yapılabilir.

3.3.2. Halka kuvvet algılayıcıları

Halka kuvvet algılayıcıları dinamik basınç ölçümleri için tasarlanmışlardır. Bu tip kuvvet algılayıcıları, soğuk şekil verme, talaşlı imalat işlemleri sırasında ortaya çıkan

dinamik basma, çekme gerilme ölçmeleri için uygundur. Çeliğe yakın rijitliğe sahiptirler. Hava sızdırmazlık sağlayan kaynak sayesinde elverişsiz ortamlarda güvenle kullanılabilirler. Statik kalibrasyon ve kısa süreli statik ölçme özellikleri vardır. Yüksek doğrusallık ve tekrar edilebilirlik özellikleri oldukça iyidir. Presleme izlenmesinde, kuvvet kontrollü zorlanmış titreşimlerin oluştuğu yerlerde, mekanik empedans testlerinde de kullanılmaktadırlar.

3.3.3. Deneylerde kullanılan halka kuvvet algılayıcı: 201B03 Model ICP®

Deneylerimizde PCB Group firmasının üretimi olan kuvars halka kuvvet algılayıcılarından 201B03 Model ICP türü kullanıldı(Resim 3.5).

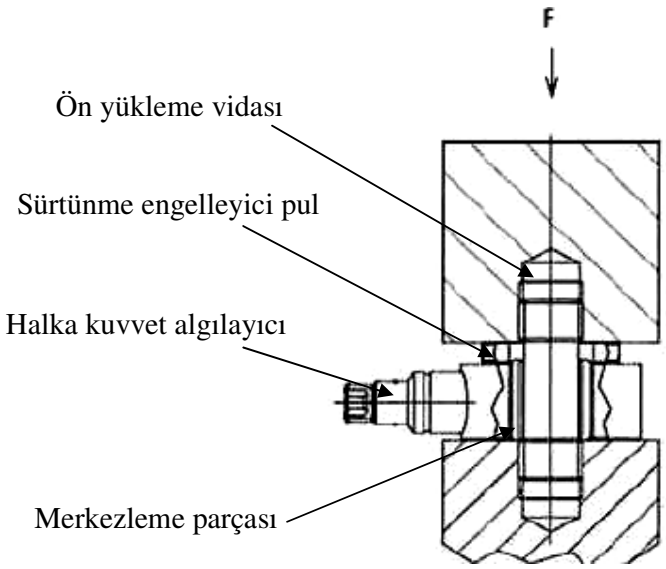


Resim 3.5. 201B03 Model ICP kuvars halka kuvvet algılayıcısı

Bu tip algılayıcıların kullanımında en önemli adım algılayıcının montajıdır. Montaj yapılırken yapılan hatalar ölçümleri tamamen yanlış alınmasına sebep olur. Halka kuvvet algılayıcıların montajı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi algılayıcı, iki yapı arasına özel bir vida ile monte edilmiştir. Bu vida berilyum-bakır karışımı özel bir malzemeden yapılmış olup ön yükleme yapılmasına imkân vermekte, kalibrasyonu düzgün bir şekilde sağlanmakta ve algılayıcıdan okunan ölçme değerleri lineer olmaktadır. Algılayıcıyı merkezlemek için vida ile halka arasına plastik bir parça yerleştirilir. Kuvvetin geldiği taraf ile algılayıcı arasına sürtünmeyi engelleyici pul konmuştur.

Laboratuarımızda mevcut olan halka kuvvet algılayıcısı, yapılan pilot deneylerde kullandığımız çekiç kütlesi ile çarpma anında oluşan kuvvetin maksimum değerinin, algılayıcının maksimum ölçme değerini aştığı görülmüştür. Fakat kuvvetteki değişim

değerlerini görmek için deneylerde kullanılmıştır. Kullandığımız halka kuvvet algılayıcının teknik özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Halka kuvvet algılayıcısı montaj şekli

Çizelge 3.3. 201B03 Model ICP halka kuvvet algılayıcısı teknik özellikleri

Özellik	**Değer**
Hassasiyet(±15%)	2248 mV/kN
Ölçüm Aralığı(Basınç Kuvveti)	2,224 kN
Maksimum Statik Kuvvet(Basınç Kuvveti)	13,34 kN
Genişbant Çözünürlüğü(1-10 000 Hz)	0,04448 N-rms
Düşük Frekansa Yanıtı(-5%)	0,0003 Hz
En Üst Frekans Sınırı	90 kHz
Düzensizlik	≤1% FS
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +121 °C
Sıcaklık Hassasiyet Katsayısı	≤0,054 °C
Boşaltma Zaman Sabiti(Oda Sıcaklığı)	≥2000 saniye
Uyarma Voltajı	20 ile 30 VDC
Uyarma Akım Sabiti	2 ile 20 mA
Çıkış Empedansı	≤100 ohms
Çıkış Öngerilim Voltajı	8 ile 14 VDC
Önyükleme	0,89 kN
Dış Gövde	Paslanmaz Çelik
Elektrik Bağlantısı	10-32 Koaksiyel Jak

3.4. Veri Toplayıcı

3.4.1. Genel bilgi

Veri toplayıcıları, deneylerde kullanılan ölçüm aygıtlarından elde edilen ölçümleri toplayıp bilgisayar ortamında değerlendirilmesi için bilgisayar datalarına çeviren aygıtlardır. Veri toplayıcıları, çok çeşitlidir. Yapılacak çalışmalara göre özel olarak dizayn edilenlerinden standart olarak üretilenlere kadar birçok çeşidi vardır.

3.4.2. Deneylerde kullanılan veri toplayıcı: NI 9233-USB-9162

Deneylerde kullanılacak olan veri toplayıcı seçilirken kuvvetin etki şekline ve kullanılan ölçme aygıtlarının türü dikkate alınmıştır. Bu şartlar dikkate alınarak National Instruments firmasının ürettiği NI 9233-USB-9162 modeli kullanılmıştır (Resim 3.6). Bu veri toplayıcı, dört kanallı dinamik sinyal yakalayıcısı olup, yüksek doğrulukta ölçüm alabilen IEPE algılayıcılarından yapılmıştır.



Resim 3.6. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı

Kullanılan veri toplayıcı aygıt iki modülden oluşmaktadır. Birinci modül veri toplayıcısıdır. Bu modüle ölçüm aygıtları bağlanmaktadır. İkinci bölüm ise sinyal taşıyıcı modülüdür. Bu modül de birinci modülden gelen sinyalleri bilgisayara aktarmaktadır. Her iki modül birbirinden bağısızdır. Veri toplayıcıdan bilgisayar

ortamına aktarılan veriler veri toplayıcı için yazılmış olan bilgisayar programı yardımıyla almak istediğimiz veri türüne çevrilerek kaydedilir. Ayrıca bu program yardımıyla deney düzeneğine bağladığımız ölçüm aygıtlarının kalibrasyon ayarları yapılmaktadır. Çizelge 3.4'de veri toplayıcısının teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı teknik özellikleri

Özellik	**Değer**
Kanal Sayısı	4 Adet Analog Giriş
Çözünürlük	24-bit
Dinamik Aralık	102 dB
Minimum Data Oranı	2 kS/s
Maksimum Data Oranı	50 kS/s
Frekans	12,8 MHz
Hassasiyet	±100 ppm max.
Giriş Akımı	AC
Minimum AC Voltajı	5 V
Maksimum AC Voltajı	5,8 V
IEPE Minimum Uyarma Akımı	2.0 mA
Giriş Voltajı Aralığı	±5 V
Bilgisayar Bağlantısı	HI-Speed USB 2.0

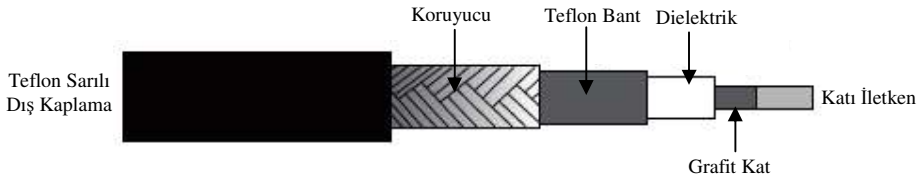
3.5. Ölçüm Aygıtları Bağlantı Kabloları

Ölçüm aygıtlarından alınan ölçme değerlerinin değer kaybına uğramadan deney alanından veri toplayıcısına iletilmesi için özel kablolar tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneylerimizde PCB Group firmasının imal ettiği 003A20 Model numaralı kablo kullanılmıştır (Resim 3.7). Bu kablo düşük gürültülü koaksiyal kablodur.



Resim 3.7. 003A20 Model düşük gürültülü koaksiyal kablo

Bu tip kablolar yüksek sıcaklıklarda kullanılan algılayıcılarda, yüksek empedanslı sinyallerde, ICP® algılayıcılarda ve düşük empedanslı voltaj sinyallerinin iletilmesinde kullanılmaktadır. Kablo çapı 2 mm olup çalışma sıcaklık aralığı -90 ile 260 °C'dir. Kablo empedansı 50 ohm dur. Kablo uzunluğu 6 m dir. Şekil 3.7'de kablonun iç yapısı görülmektedir.



Şekil 3.7. 003A20 Model kablo iç yapısı

3.6 Optik Fotosel

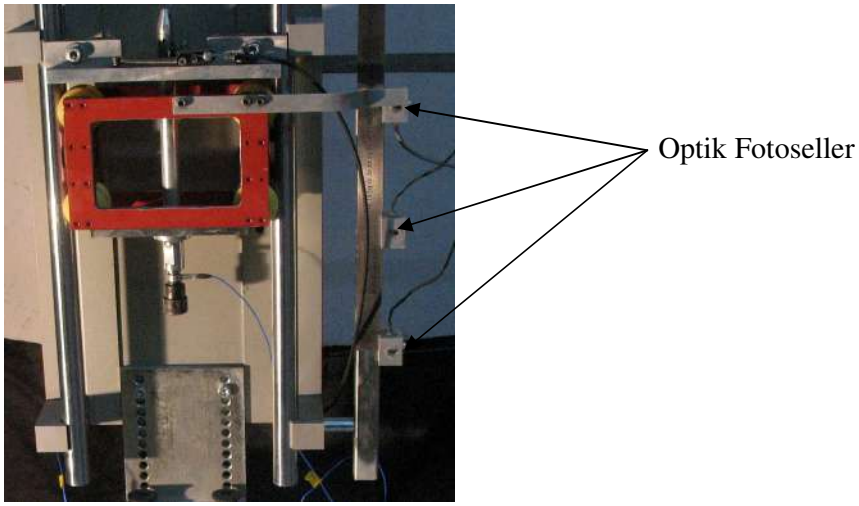
Fotoseller, dokunmasız bir şekilde hareketleri algılama olanağı sağlar. Optik fotoseller yüksek performansları ve gittikçe küçülen tasarımları ile kullanım alanları yaygınlaşmaktadır. Büyük indüktif ve kapasitif fotosellerde, fotosel ile hedef cisim arasındaki en uzun mesafe 60-100 mm dolaylarındadır. Fakat optik fotosellerin en küçük boyutlarda olanları dahi birkaç metrelik alanı kontrol edebilmektedir. Bu fotoseller üç farklı algılama ilkesine göre sınıflandırılabilir:

- Karşılıklı fotoseller,
- Yansıtıcılı fotoseller,
- Cisimden yansımalı fotoseller

Deney düzeneğinde kullandığımız fotoseller cisimden yansımalı fotosellerdir. Cisimden yansımalı fotosellerin önemli avantajları şunlardır:

- Monte edilecek sadece bir fotosel vardır.
- Yanlış ayarlama ve yansıtıcı kirlenmesi yoktur.
- Şeffaf cisimler karşılıklı ve yansıtıcılı fotosellerden daha iyi algılanabilir.

Kullandığımız fotoseller, deneylerde düşen ağırlığın harekete başladığı andan deney elemanına çarptığı ana kadar geçen süreyi ölçebilmek için kullanılmaktadır. Çekiç üzerine monte edilen bir parça yardımıyla çekiç fotoselin önünden geçtiği anda fotoseli harekete geçirir ve elektronik bir devreye bağlı olan fotosel ölçüm alınmasını sağlar. Üç adet optik fotosel deney düzeneği üzerine yerleştirilen özel bir kızak üzerine monte edilmiş ve istenilen yüksekliklere ayarlanarak kullanım imkanı sağlanmıştır(Resim 3.8).



Resim 3.8. Optik fotoseller ve yerleşimi

Üç adet fotoselden en üstte bulunan fotosel çekicin harekete geçtiği anda zaman ölçüm devresini açmaktadır. Ortada bulunan fotosel önünden çekiç geçtiği anda ilk zaman ölçümünü alır. En altta bulunan fotosel ise çekicin harekete başladığı andan deney elemanına çarptığı ana kadar geçen toplam zamanı ölçer. Böylelikle çekicin zamana bağlı hız değişimi belirlenmiş olmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Genel Bilgi

Yürütülen deneysel çalışmada, CFRP ile güçlendirilmiş donatısız beton kiriş elemanların çarpma yükleri etkisi altında davranışları incelenmiştir. Değişken olarak betonun basınç dayanımı ve düşme yüksekliği araştırılmıştır. Deney elemanlarında çarpma etkisi göçme meydana gelene kadar uygulanmış ve davranışlar gözlenmiştir.

Deneylerde kullanılan elemanlar betondan imal edildiği için çarpma kuvvetinin uygulanması için serbest ağırlık düşürme deney düzeneği seçilmiştir. Bu test metodunda deney elemanının geometrik şekli, çekicin yapıldığı malzeme ve çekiç ucunun şekli, deney elemanının yapıldığı malzemelerin mekanik özellikleri ve güçlendirme için kullanılan malzemenin mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmuştur.

Literatürler incelenerek çarpma yükleri altında CFRP ile güçlendirilmiş beton kirişlerin davranışını etkileyen faktörlerin aşağıda gibi olabileceği düşünülmüştür [20].

- Çarpma enerjisi ve çekicin başlangıçtaki hızı.
- Çarpma yükü tarafından ortaya çıkan şekil değiştirme.
- Kompozit malzeme tipi ve ağırlığı.
- Kompozit malzeme yapışma alanı büyüklüğü.
- Beton basınç dayanımı.
- Beton kirişin açıklığı.
- CFRP ile beton bütünlüğü.

Yukarıda ifade edilen bütün değişkenlerin tek bir çalışma kapsamında incelenmesinin mümkün olmadığı düşünülerek çalışma kapsamındaki deneysel çalışmada değişkenlerden bazıları sabit tutulmuştur. Düzenlenen deneysel çalışmada 2 farklı tip beton basınç dayanımı incelenmiştir. Çarpma etkisi altında oluşan enerji

sadece çekiç düşürme yüksekliği değiştirilerek farklılaşması sağlanmış, çekiç kütlesi ve vurucu başlık şekli sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmada 5 farklı çekiç düşürme yüksekliği incelenmiştir. Kompozit malzeme olarak inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan karbon takviyeli elyaf kumaşlar (CFRP) seçilmiştir. Seçilen deney elemanı boyutlarına uygun olarak tek bir CFRP şerit yapıştırma boyu ve alanı belirlenmiş tüm deney elemanları özdeş şekilde güçlendirilerek bu değişkenler sabit tutulmuştur.

4.2. Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan başlıca malzemeler, beton, CFRP, epoksi, kauçuk ve çeliktir. Bu malzemelerin özellikleri tek tek incelenmiştir. Deneysel çalışmalardaki sonuçların karşılaştırılabilmesi ve tutarlı olması için kullanılan malzemeler aynı yerlerden ve tek seferde temin edilmiştir.

4.2.1. Agrega

Agregalar İç Anadolu bölgesinde bulunan Kızılırmak havzasındaki dere yataklarında kurulu olan ocaklardan temin edilmektedir. Agregalar yıkanıp elendikten sonra bildirilen karışım oranlarına göre karıştırılır ve nakliye edilir. Beton karışımında kullandığımız agregaların maksimum dane çapı 15 mm'dir. Agregalar laboratuara iki grup halinde gelmektedir. Bu gruplar da 0-7 mm ve 7-15 mm aralarında dane çapına sahip olup standartlarda belirtilmiş olan granülometriye uygun olarak karıştırılmıştır.

4.2.2. Su

Beton karışımına katılacak olan su, kullanıma uygun içilebilir niteliklerde olmalıdır. Ayrıca su içerisinde tuz bulunmamalıdır. Bu nedenle şehir şebekesinde mevcut olan su şartlara uygundur Beton hazırlanmasında şebekeden alınan su kullanılmıştır.

4.2.3. Çimento

Portland çimento; kalker, marn, kil, demir cevheri, pirit külü, boksit, vb. hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp, öğütülerek, pişirilmesi sonucu elde edilen klinkerin, bir miktar priz düzenleyici (genellikle alçıtaşı) ile birlikte öğütülmesinden oluşan; suyla karıştırıldıktan belirli bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür.

Beton karışımında kullandığımız çimento SET Çimento fabrikasının üretimi olan TS EN 197-1:2002 standardında üretilen PÇ 42,5 CEM I 42,5 R Portland çimentosudur.

Kullandığımız portland çimentosu genel olarak yüksek dayanım gerektiren yapılarda, soğuk havada dökülen betonlarda, prefabrik yapılarda, tünel-kalıp uygulamalarında, yapı kimyasalları üretiminde ve temel betonları uygulamalarında kullanılır. Kullandığımız çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PÇ 42,5 CEM I 42,5 R Portland çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel Özellikler			
	Birim	**Standart**	**Çimento**
Priz Başlangıcı	Dakika	Min. 60	170
Priz Sonu	Dakika	-	220
Özgül Ağırlık	gr/cm^3	-	3,13
Hacim Genleşmesi	cm	Maks. 10	1
Özgül Yüzey(Blaine)	cm^2/gr	-	3640
Litre Ağırlığı	gr/l	-	975
2 Günlük Dayanım	MPa	Min. 20	27
28 Günlük Dayanım	MPa	42,5/-2,5	58
Kimyasal Özellikler			
SO_3	%	Maks. 4	2,7
MgO	%	-	1,1
Kızdırma Kaybı	%	Maks. 5	2,4

Çizelge 4.1. PÇ 42,5 CEM I 42,5 R Portland çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri(Devam)

Çözünmeyen Kalıntı	%	Maks. 5	0,6
Cl	%	Maks. 0,1	0,01>
Toplam Alkali $Na_2O + 0.658\ K_2O$	%	-	0,51
Serbest Kireç	%	-	1,0

4.2.4. Kimyasal katkı

Betonun basınç dayanımını değiştiren en büyük etken su/çimento oranıdır. Bu oranda, çimento miktarını azaltma durumuna gidildiğinde minimum dozajın altına inilme riski ortaya çıkmaktadır. İnildiği takdirde, beton yaşlandıkça dayanımını kaybetmeye başlamaktadır. Bu nedenle betonun dayanımını arttırmak için karışıma giren su miktarı azaltılmalıdır. Fakat bu da betonun işlenebilirlik özelliğini etkilemektedir. Bu nedenle beton kolay yerleştirilmesi ve işlenmesi için ayrıca betonun dayanımını artırmak için yüksek basınç dayanımlı betonun karışımında kimyasal katkı kullanılmıştır. Kullandığımız kimyasal katkı, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 36 yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcı beton katkısıdır. Özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 36 yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcının özellikleri

Kullanım Alanları	Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 36, yüksek oranda su azaltması ve uzun işlenebilirlik sağlaması sebebiyle aşağıdaki yerlerde kullanılır. - Hazır beton üretimi - Yüksek performanslı beton üretimi - Sıcak ve rüzgârlı ortamlarda bile kıvam korumalı beton dökümü - Geçirimsiz, yoğun ve düzgün yüzeyli beton üretimi - Döşeme, kolon, kiriş, köprü, perde beton gibi sık donatılı betonarme imalatlarında - Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretiminde

Çizelge 4.2. Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 36 yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcının özellikleri(Devam)

Özellikleri / Avantajları	Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 36, çift etkili bir katkı olup, çimento tanecikleri üzerinde elektriksel etkileşim ve saçaklanma yöntemleri ile hidratasyon sürecine paralel olarak aşağıdaki avantajları sağlar; - Betonun karışım suyunu oldukça yüksek oranda azaltması ile yüksek birim ağırlık ve dayanım olanağı sağlar. - Betona mükemmel derecede kendiliğinden yerleşme özelliği kazandırır - Betonun kıvamını uzun süre koruyarak yaz şartlarında bile pompalanabilmeye uygun beton üretimine imkân verir - Dona karşı dayanıklılığı arttırır - Klorür içermez, betonda donatıya zarar vermez. - Betonun karbonatlaşma hızını düşürür - Betonda büzülmeyi oldukça azaltır - Vibrasyonu ortadan kaldırabildiği için "gürültü kirliliği“ ne sebep olmaz
Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1,03–1,07 g/cm³, 20°C
pH Değeri	3 – 7
Viskozite	26 cp, 20°C
Katı Madde Yüzdesi	% 23–27
Donma Noktası	-4 °C
Suda çözünebilir Klorür Yüzdesi	Max. 0,1%
Sarfiyat / Dozaj	Betondan istenilen performansa bağlı olarak; - Plâstik ve akıcı kıvamlı betonlar için kullanılan bağlayıcının ağırlıkça % 0,4 -1,0'i (100 kg bağlayıcı için 400–1000 g) oranında. - Kendiliğinden Yerleşen Beton için kullanılan bağlayıcının ağırlıkça % 1,0–2,0'si (100 kg bağlayıcı için 1000–2000 g) oranında. Kıvamın ayarlanması sırasında katkının çok yüksek oranda su kesme özelliği dikkate alınmalı, karışıma fazla su katılması engellenmelidir
Eklenmesi	Sika®ViscoCrete® Hi-Tech 36 santralde karışım suyuna katılmalıdır. Şantiyede beton mikserine katılması tavsiye edilmez.
Uygulama Metodu / Ekipmanlar	Kaliteli beton üretiminde ve yerleştirilmesinde ilgili standartlar çerçevesinde kabul görmüş kurallar izlenmelidir. Taze betonun bakımı (kür edilmesi) doğru şekilde yapılmalıdır.

Çizelge 4.2. Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 36 yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcının özellikleri(Devam)

Uygulama Notları / Sınırlamalar	- Sika®ViscoCrete® Hi-Tech 36 kullanımında, yerel malzemeler denenmeli ve uygun beton karışımı dikkate alınmalıdır. - Sika®ViscoCrete® Hi-Tech 36 kuru çimentoya eklenmemelidir. - Sika®ViscoCrete® Hi-Tech 36 karışım suyu ile birlikte kullanılmalıdır. - Sika®ViscoCrete® Hi-Tech 36 ile kendiliğinden yerleşen beton üretimi yapılırken uygun beton karışım dizaynı kullanılmalıdır. - Kullanımdan önce, uygunluk deneyleri yapılmalıdır.

4.2.5. Silis dumanı

Yüksek basınç dayanımına sahip beton üretiminde kullanılan bir katkı maddesidir. Dayanımı arttırdığı birçok deneysel çalışma ile kanıtlanmış ve pratikte kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Silis dumanı çok ince bir malzeme olduğu için beton üretiminde arayüz olarak tanımlanan agrega ve sertleşmiş çimento matrisi arasındaki boşluğu doldurarak dayanımı artırmak için kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı beton üretiminde, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen SikaFume®-HR Silis dumanı (Silica Fume) içeren toz beton katkısı kullanılmıştır. Özellikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. SikaFume®-HR Silis dumanı (Silica Fume) içeren toz beton katkısının özellikleri

Kullanım Alanları	SikaFume®-HR, yüksek performanslı beton ve harç istenildiğinde aşağıdaki uygulamalarda kullanılır. - Yapısal betonlar - Prefabrike betonlar - Püskürtme betonlar - Kimyasal etkilere maruz inşaatlar (deniz yapıları, arıtma tesisleri vb.) - Sertleşmiş ve taze beton kalitesinden beklentilerin yüksek olması

Çizelge 4.3. SikaFume®-HR Silis dumanı (Silica Fume) içeren toz beton katkısının özellikleri(Devam)

Özellikleri / Avantajları	SikaFume® -HR, oldukça ince (0,1 mikron) ve yavaş reaksiyon yapan silikondioksit içerir. Silikondioksit'in bulunması, betondaki iç kohezyonun ve su tutuculuğun artmasını sağlar. Bu durumda taze betonun işlenebilirliği oldukça yumuşak olup, pompalanabilme özelliği de önemli ölçüde artar. Sertleşmiş betonda sonradan aktif hale geçen silis dumanı serbest kireç ile kimyasal bağ yapar. Bu ilave kristal oluşumu, çok daha yoğun sertleşmiş çimento matriksi oluşturur. SikaFume®-HR ile Sikament ve ViscoCrete® serisi süper akışkanlaştırıcılar birlikte kullanılarak üretilen beton aşağıdaki özellikleri kazanacaktır. - Mükemmel işlenebilirlik - Dayanıklılıkta (Dürabilite) artış - Yüksek erken/son dayanım - Aşınma direncini yükseltir - Su/gaz geçirimsizliğini oldukça arttırır - Klorür difüzyonunu oldukça azaltır - Klorür içermez ve donatıya zarar vermez
Kimyasal Yapı	Silis dumanı içeren toz.
Yoğunluk	0,65±0,10 kg/l (kuru dökme)
Sarfiyat / Dozaj	Çimento ağırlığının %2-10'u arasında. Betonda en uygun sonuçları sağlamak için Sikament veya ViscoCrete serisi uygun süper akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanınız.
Kullanımı	SikaFume®-HR, beton içerisine karışım suyu verilmeden önce çimentoyla birlikte eklenir. Optimum karışım süresi 90 saniyedir. Karışım için gereken su miktarı, SikaFume®-HR ve Sikament veya ViscoCrete dozuna bağlı olarak istenilen işlenebilirliği ve proje dayanımını sağlayacak şekilde ayarlanabilir.
Uygulama Notları / Sınırlamalar	- SikaFume®-HR içeren beton, normal beton karışımlarındaki gibi işlenir, yerleştirilir. Standart betonlama teknikleri aynen kullanılarak betonun yerleştirilmesinden hemen sonra ve normal beton karışımlarına göre daha dikkatli kürleme yapılmalıdır. Maske ve eldiven kullanılması önerilir. - Kullanımdan önce, uygunluk deneyleri yapılmalıdır.

4.2.6. Epoksi

Kompozit malzemelerin yapılarında kullanılan ana malzemelerden biridir. Karbon lifle güçlendirme yapılacak olan yapılarda kullanılması öncelikli olan bir malzemedir. Karbon liflerle uygulanan yüklerin oluşturduğu gerilmeler transferinin sağlanmasında önemli rol oynar. Çevresel etkilere karşı lifleri korur. Liflerin yüzeylerini mekanik aşınmalara karşı korur[20]. Deney elemanlarının hazırlanmasında Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesi kullanılmıştır. Sikadur®-330 iki bileşenli, solventsiz, tiksotropik özellikli epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcıdır. Özellikleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesinin özellikleri

Kullanım Alanları	- SikaWrap® elyaflarının kuru uygulama yöntemiyle uygulanmasında kullanılır. - Islak uygulama sistemi için astar olarak kullanılır. - Düzgün yüzeylere Sika® CarboDur® plakalarının yapıştırılmasında kullanılır
Özellikleri / Avantajları	- Kolay karıştırılır, mala ve doyurma rulosu ile uygulaması kolaydır. - Elle empregnasyon (doyurma) işlemi içindir. - Düşey ve baş üstü yüzeylerde uygulanır. - Birçok yüzeye iyi aderans sağlar. - Yüksek mekanik özelliklere sahiptir - Altına ayrı bir astar uygulaması gerekmez - Solventsizdir
Görünüm/ renk	Reçine A Bileşeni: macun kıvamlı Sertleştirici B Bil.: macun kıvamlı Renk: A Bileşeni: beyaz B Bileşeni: gri A+B bileşenleri: açık gri
Kimyasal Yapı	Epoksi reçine
Birim Ağırlık	Reçine karışımı: 1.31 kg/l (+23°C'de)
Viskozite	Kayma hızı: 50 /s Sıcaklık Viskozite +10°C ~ 10 000 mPas +23°C ~ 6 000 mPas +35°C ~ 5 000 mPas

Çizelge 4.4. Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesinin özellikleri(Devam)

Termal Genleşme Katsayısı	45 x 10^{-6}/ °C (-10°C ile +40°C arasında)
Termal Stabilite	Isıl Deformasyon Sıcaklığı (HDT) (ASTM D648) Kür süresi Sıcaklık HDT 7 gün +10°C +36°C 7 gün +23°C +47°C 7 gün +35°C +53°C 7 gün, ardından +10°C'de 7 gün, +23°C +43°C
Servis Sıcaklığı	-40°C ile +50°C arası
Çekme Dayanımı	30 N/mm2 (+23°C'de 7 günlük)
Yapışma Dayanımı	Kumlanmış yüzeyde beton kırılması: > 1 day
E-Modülü	Eğilme: 3800 N/mm2 (+23°C'de 7 günlük) Çekme: 4500 N/mm2 (+23°C'de 7 günlük)
Kopma Uzaması	%0,9 (+23°C'de 7 günlük)
Kimyasal Dayanım	Ürün kimyasal dayanım amaçlı değildir.
Termal Dayanım	+50°C sürekli etkiye dayanır
Sistem Yapısı	- Yüzey astarı - Sikadur®-330. - Empregnasyon/ doyurma reçinesi - Sikadur®-330. - Yapısal güçlendirme için dokuma/elyaf – ihtiyacı karşılayan uygun SikaWrap® ürünü
Uygulama Detayları	
Sarfiyat	Yüzey pürüzlülüğüne ve kullanılan emprenye edilecek SikaWrap® tipine bağlıdır. Genel olarak: 0,7 – 1,5 kg/m2
Yüzey Kalitesi	- Beton yüzey temiz, sağlam olamlı ve en az 1.0 N/mm^2 veya tasarımın gerektirdiği minimum yüzey çekme dayanımını sağlamalıdır. - Yüzey temiz, kuru ve kir, yağ, kaplama, yüzey kür malzemeleri gibi yabancı maddelerden arındırılmış olmalıdır. - Yapıştırma yapılacak yüzey düzgün olmalıdır (her 0,3m uzunlukta maksimum farklılık 2mm), yüzeydeki kalıp izleri 0,5mm.den daha büyük olmamalıdır. - Yüzeydeki çıkıntılar aşındırılarak uzaklaştırılmalıdır.

Çizelge 4.4. Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesinin özellikleri(Devam)

	- Sarılacak köşeler en az 20 mm çapında yuvarlatılmalıdır (kullanılacak SikaWrap® tipine veya yapılan tasarıma, proje spesifikasyonuna bağlı olarak). Bu işlem köşelerin aşındırılmasıyla veya Sikadur® harçlar kullanılarak yapılabilir.
Yüzey Hazırlığı	- Beton ve doğal taş, tuğla gibi yığma yüzeyler aşındırıcı veya pürüzlendirici mekanik ekipmanlar kullanılarak çimento şerbetini, gevşek ve oynak parçacıkları kaldırarak açık gözenekli bir yüzey elde edecek şekilde hazırlanmalıdır. - Ahşap yüzeyler rendelenmeli veya kumlanmalıdır. Sikadur®-330 uygulamasından önce yüzeydeki tüm toz, gevşek ve oynak parçacıklar fırça ve endüstriyel tip elektrikli süpürge kullanılarak temizlenmelidir. - Gevşek beton/yığma yüzeyler uzaklaştırılmalı ve segregasyona uğramış yerler, kuş gözü boşluklar ve delikler gibi yüzey hasarları tamamen açık hale getirilmelidir - Yüzey tamirleri, kuşgözü boşlukların/deliklerin doldurulması ve yüzeyin düzeltilmesi Sikadur®-41 veya Sikadur®-30 + Sikadur®-501 kuvars kumu karışımıyla (karışım oranı ağırlıkça maksimum1 : 1) yapılmalıdır. - Yüzey hazırlığının yeterliliği yapışma testleriyle belirlenmelidir. 0,25 mm'den daha geniş olan çatlaklara Sikadur®-52 veya başka uygun Sikadur® enjeksiyon reçinesi ile enjeksiyon yapınız.
Uygulama Koşulları/Sınırlamalar	
Yüzey Sıcaklığı	min +10°C. / en fazla +35°C
Ortam Sıcaklığı	min +10°C. / en fazla +35°C
Yüzey Rutubeti	rutubet içeriği < %4. Test yöntemi: Sika-Tramex meter.
Çiğ Noktası	Yoğuşmaya dikkat edin! Kaplama yüzeyinde yoğuşma veya kabarcık riskini azaltmak için yüzey ve kür almamış kaplamanın sıcaklığı, yoğuşma noktasının en az 3°C üzerinde olmalıdır.
Uygulama Talimatları	
Karışım	A Bileşeni : B Bileşeni = 4 : 1 ağırlıkça Her bileşenin doğru karışım miktarı tartılarak kesin olarak belirlenmelidir.

Çizelge 4.4. Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesinin özellikleri(Devam)

Karıştırma Süresi	Karışım oranında paketlenmiş ambalaj: - A+B bileşenlerini en az 3 dakika boyunca düşük hızlı (maks. 600 dev/dak) elektrikli matkap ucuna takılmış spiral tipli karıştırıcı vasıtasıyla malzeme düzgün kıvamlı ve homojen gri renkli olana kadar karıştırınız. - Karıştırma işlemi sırasında hava sürüklenmemesine dikkat ediniz. Ardından tüm karışımı temiz bir kaba boşaltıp yaklaşık 1 dakika boyunca hava sürüklenmesini en azda tutabilmek için düşük hızda tekrar karıştırınız. Sadece kullanım süresi (potlife) içerisinde kullanılabilecek kadar malzemeyi karıştırınız. Endüstriyel tip, karışım oranında paketlenmemiş ambalajda: - İlk başta her bileşeni kendi içerisinde karıştırınız. Doğru karışım oranında malzemeyi uygun bir karıştırma kabına koyup düşük hızlı elektrikli bir karıştırıcı ile yukarıda tariflenen şekilde karıştırınız.
Uygulama yöntemi/ Ekipmanlar	Hazırlık: - Uygulamadan önce yüzey rutubetini, rölatif rutubeti ve çiğ noktasını kontrol ediniz. - Kullanılacak SikaWrap® 'i istenilen boyutlarda kesiniz. Reçine Uygulaması: - Yüzey hazırlığı tamamlanmış yüzeye Sikadur®-330 'u mala, rulo veya fırça kullanarak uygulayınız. Dokumanın Yerleştirilmesi ve Doyurulması (Laminasyonu): - Sikadur®-330 üzerine SikaWrap®'i istenilen doğrultuda yerleştiriniz. Dokuma üzerinden Sika plastik doyurma rulosu ile lif doğrultusuna paralel yönde hareket ederek dikkatlice geçerek reçinenin lif demetleri arasından dışarı çıkması ve tüm dokuma yüzeyi boyunca yayılmasını sağlayınız. SikaWrap® 'in katlanması veya buruşmasına sebep olmamak için doyurma işlemi sırasında fazla kuvvet uygulamasından kaçınınız. Birden fazla kat uygulama: - SikaWrap® dokumasının ilave kat uygulamaları için Sikadur®-330'u bir önceki kat üzerine 60 dakika içerisinde (+23°C'de), henüz alttaki

Çizelge 4.4. Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesinin özellikleri(Devam)

	- Sikadur-330 katı ıslak durumdayken uygulayınız ve laminasyon işlemini tekrarlayınız. - Eğer 60 dakika içerisinde uygulamak mümkün değilse takip eden katın uygulanmasından önce en az 12 saatlik bir bekleme süresine uyulmalıdır. Üst Kaplamalar: - Eğer en son üzerine çimentolu bir harç yapılacaksa SikaWrap® dokuması üzerine en fazla 0,5 kg/m2 sarfiyatla ilave Sikadur-330 reçinesi uygulanır. Bu uygulamanın hemen ardından kurumadan üzerine kuvars kumu serpilerek yüzey üst tabaka için pürüzlü ve tutucu hale getirilir - Eğer direkt olarak renkli bir kaplama uygulanacaksa kurumamış Sikadur®-330 yüzeyi bir fırça ile düzgün hale getirilir. Üst iste bindirmeler Lif Doğrultusunda: - SikaWrap® dokumasının bindirme boyu güçlendirme projesinde belirtildiği şekilde veya en az 100 mm (kullanılan SikaWrap® tipine bağlı olarak) olmalıdır. Yan yana Uygulamada: - Tek doğrultulu dokumalar: Güçlendirme projesinde aksi belirtilmediği sürece birkaç tek doğrultulu SikaWrap® dokumasının yan yana uygulamasında bindirme gerekmemektedir. - Çok doğrultulu dokumalar: Güçlendirme projesinde aksi belirtilmediği sürece atkı doğrultusunda bindirme boyu en az 100 mm olmalıdır (SikaWrap tipine bağlı olarak).
Aletlerin Temizliği	Kullanımdan hemen sonra tüm alt ve ekipmanları Tiner C ile temizleyiniz. Sertleşmiş ve/veya kür almış malzeme sadece mekanik olarak uzaklaştırılabilir.
Kullanma Süresi (Potlife)	Potlife: Sıcaklık Süre +10°C 90 dakika (5 kg) +35°C 30 dakika (5 kg) Potlife reçine ve sertleştirici karıştırıldığı anda başlar. Yüksek sıcaklıklarda kısayken, düşük sıcaklıklarda daha uzundur. Karıştırılan malzeme miktarı arttıkça kullanım süresi kısalır. Yüksek sıcaklıklarda daha uzun işlenebilirlik süresi elde edebilmek için

Çizelge 4.4. Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesinin özellikleri(Devam)

	karıştırılmış malzeme parçalara ayrılabilir. Diğer bir yöntem de A+B bileşenlerini karıştırmadan önce soğutmaktır. Çalışabilirlik süresi: Sıcaklık Süre +10°C 60 dakika +35°C 30 dakika
Bekleme/ Üzeri Tekrar Kaplanabilme Süreleri	Önceden kürünü almış reçine üzerine: Ürünler Yüzey Sıcaklığı Minimum Sikadur®-330 +10°C 24 saat Sikadur®-330 +23°C 12 saat +35°C 6 saat 7 günlükten daha eski kür almış reçine Sika® Colma Cleaner (Sika Temizleyici) ile temizlenmeli ve ardından kaplama işleminden önce bir zımpara ile hafifçe zımparalanmalıdır. Ürünler Yüzey Sıcaklığı Minimum Sikadur®-330 +10°C 5 gün Sikagard®-renkli kaplamaları +23°C 3 gün +35°C 1 gün 7 günlükten daha eski kür almış reçine Sika® Colma Cleaner (Sika Temizleyici) ile temizlenmeli ve ardından kaplama işleminden önce bir zımpara ile hafifçe zımparalanmalıdır. Verilen süreler yaklaşıktır ve değişen ortam koşullarından etkilenecektir.
Uygulama Notları/ Sınırlamalar	- Bu ürün sadece tecrübeli profesyonel uygulayıcılar tarafından uygulanmalıdır. Uygulamadan sonra en az 24 saat boyunca Sikadur®-330 yağmurdan korunmalıdır. - Dokumanın yerleştirilmesi ve rulo ile laminasyon işleminin malzemenin çalışabilirlik süresi içerisinde yapılmasına dikkat ediniz. - SikaWrap® dokuması çimentolu bir son kat veya kaplama malzemesi ile estetik açıdan ve/veya koruma amaçlı olarak kaplanmalıdır. Malzeme seçimi mevcut kalacağı etkiye göre seçilmelidir. UV ışınlarına karşı koruyucu olarak Sikagard®-550W Elastic, Sikagard® ElastoColor-675W veya Sikagard®-680S kullanınız - Düşük sıcaklıklarda ve/veya yüksek rölatif

Çizelge 4.4. Sikadur®-330 2-bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçinesinin özellikleri(Devam)

	- rutubetli ortamda, kürünü almış Sikadur-330 yüzeyinde yapışkan bir tabaka oluşabilir. Bu kürünü almış epoksi üzerine ilave bir kat SikaWrap veya kaplama malzemesi uygulanacaksa, oluşmuş yapışkan tabaka uzaklaştırılarak iyi aderans sağlanması garantilenmelidir. Bu yapışkan tabaka suyla yıkanarak temizlenebilir. Takip edecek katı uygulamanda önce yüzey bir bezle kurulanmalıdır - Soğuk veya sıcak ortamlarda uygulama yapılacağı durumlarda karıştırma, uygulama ve kullanma süresi limitleri özelliklerini iyileştirmek için, malzemeyi uygulamadan önce 24 saat boyunca sıcaklığı kontrollü depolama yerinde tutunuz. - Sikadur®-330'un kür süresi boyunca birbiri üzerine ıslak halde uygulanan katlar dokumanın buruşmasından, kaymasından kaçınmak açısından yakından takip edilmelidir. - Uygulanacak kat sayısı kullanılan SikaWrap® dokuma tipi ve ortam iklim koşullarına bağlıdır.
Kür Detayları	
Uygulanan ürünün kullanıma hazır olma süresi	Sıcaklık Tam Kürünü Alma +10°C 7 gün +23°C 5 gün +35°C 2 gün Not: Yukarıdaki süreler yaklaşıktır ve değişen ortam koşullarından etkilenebilir.

4.2.7. Karbon takviyeli elyaf kumaş: CFRP

Karbon lifleri dünyada bilinen en sağlam malzemelerden biridir. Kumaş görünüş ve inceliğinde olan karbon lifleri gerilmeye karşı çelikten 14 kat daha yüksek mukavemetli olmasına rağmen ağırlığı çeliğin beşte biri civarındadır. Bu olağanüstü sağlamlığı nedeni ile karbon lifleri ve karbon liflerinden dokunmuş kumaşlar endüstrinin çeşitli kademelerinde kullanılmaktadır. Normalde iplik yumuşaklığında olan lifler kolayca istenilen şekle getirilmekte ve özel epoksi reçinesi ile muamele edilince setleşmektedir.

Karbon lif takviyeli elyaf kumaşlar, son zamanlarda inşaat mühendisliği alanında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Her ne kadar inşaat sektörünün yüksek miktarlarda ve ekonomik maliyetli malzeme gereksinimi var ise de, karbon liflerin kullanımının yaygınlaşmasıyla maliyetler azalmış ve inşaat sektöründe kullanılabilecek hale gelmiştir. Özellikle deprem ve korozyon hasarlı binaların ekonomik ve hızlı onarımlarında iyi sonuçlar vermiştir. Kullanımındaki pratiklik, binaya ekstra yük getirmemesi ve çelikten daha güçlü olmasının verdiği olağanüstü sağlamlık bu malzemenin en belirgin üstünlükleridir.

Bugün inşaat sektöründe karbon liflerin belli başlı kullanım alanlarını şöyle sıralayabilir;

- Orta ve hafif deprem hasarlı binaların tamiratı
- Hasarsız binaların güçlendirilmesi
- Korozyon hasarlı köprü, viyadük, apartman kolon-kiriş ve duvarların tamiratı
- Ahşap yapıların restorasyonu ve güçlendirilmesi
- Tarihi eser, camii kubbe ve minarelerinin tamiratı

Karbon lifleri ile güçlendirme ve onarım metodunun en önemli avantajı yapının içerisinde ancak birkaç milimetrelik bir kalınlık eklemesine rağmen klasik metotlarla elde dilecek sağlamlığın kat kat fazlasını elde edebilmesidir.

Deneylerde kullanılacak olan test kirişleri, alt yüzlerinden tek doğrultulu karbon lifli polimer tarafından güçlendirilmiştir. Güçlendirme için kullanılan malzeme Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen SikaWrap®-230 C Yapısal güçlendirme için örgülü karbon lifli elyaftır(Resim 4.1).



Resim 4.1. SikaWrap®-230 C

CFRP malzemesi epoksi ile birlikte yüzeye uygulanır. SikaWrap®-230 C Yapısal güçlendirme için örgülü karbon lifli elyafın özellikleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. SikaWrap®-230 C Yapısal güçlendirme için örgülü karbon lifli elyafın özellikleri

Kullanım Alanları	Betonarme, tuğla ve ahşap yapı elemanlarının eğilmede ve kesmede yük taşıma kapasitelerini arttırmak için kullanılır. Kullanım amaçları: - Yığma duvarların sismik performansının arttırılması - Eksik donatıların takviyesi - Kolonların güçlendirilmesi ve düktilitesinin arttırılması - Yapısal elemanların yük taşıma kapasitesinin arttırılması - Yapı kullanım amacının değişmesi - Tasarım veya imalat kusurları - Sismik hareket - Servis özelliği ve süresinin arttırılması - Mevcut standartlara uyum için yapısal güçlendirme
Özellikleri / Avantajları	- Dokumayı dengeli olarak bir arada tutabilmek amacıyla atkı lifleri ile üretilmiştir(ısıl proses) - Tüm güçlendirme ihtiyaçlarını karşılayabilmek için çok amaçlı kullanım imkânı - Yüzey geometrisinden bağımsız uygulama imkânı (kirişler, kolonlar, bacalar, kazıklar, duvarlar, silolar) - Kullanımın optimum olabilmesi için farklı rulo genişliklerindedir. - En az ilave yük yaratacak şekilde düşük birim ağırlığa - Geleneksel yöntemlere göre ekonomik bir sistemdir
Lif Tipi	Orta dayanımlı karbon fiber
Elyafın Yapısı	Lif doğrultusu: 0° (tek doğrultulu). Çözgü dokuması: siyah karbon fiberler (toplam ağırlığın %99'u). Atkı dokuması: beyaz termoplastik ısıl işleme tabi tutulmuş fiberler (toplam ağırlığın %1'i).

Çizelge 4.5. SikaWrap®-230 C Yapısal güçlendirme için örgülü karbon lifli elyafın özellikleri(Devam)

Teknik Bilgi	
Birim kütle	230 g/m^2 + 10 g/m^2
Dokuma tasarım kalınlığı	0,131 mm (karbon fiberlerin toplam alanına göre).
Lif yoğunluğu	1,76 g/cm^3
Mekanik/ Fiziksel Özelikler	
Kuru Lif Özellikleri	Çekme dayanımı: 4300 N/mm^2 (nominal). Çekme E-modülü: 238000 N/mm^2 (nominal). Kopma uzaması: %1,8 (nominal).
Laminat Özellikleri (epoksiyle emprenye edilmiş)	Laminat kalınlığı: 1,0 mm kat başına (Sikadur®-330 ile emprenye edilmiş). Nihai Yük Taşıma: 350 kN/m kat başına (1,0 mm tipik laminat kalınlığı için). E-modülü: 28 kN/mm2 (1,0 mm tipik laminat kalınlığı için). Çekme deneyi sonucunda elde edilecek laminat özellikleri kullanılan empregnasyon/doyurma reçinesi miktarına ve çekme testi yapım şekline bağlıdır.
Sistem Bilgileri	
Sistem Yapısı	Sistem yapısına tamamen uyulmalıdır ve değiştirilmemelidir. Beton yüzeyler için astar - Sikadur®-330. Empregnasyon/ doyurma reçinesi - Sikadur®-330. Yapısal güçlendirme için elyaf - SikaWrap®-230 C.
Uygulama Detayları	
Sarfiyat	Yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı olarak. - Astar dahil ilk katın uygulanması için: ~ 0.7 - 1.2 kg/m^2 (Sikadur®-330). - Takip eden katların uygulaması için: ~ 0.5 kg/m^2 (Sikadur®-330).
Yüzey Kalitesi	Aranan belirli özellikler: Minimum yüzey çekme dayanımı: 1,0 N/mm2 veya güçlendirme projesinde belirtildiği gibi.
Uygulama Talimatları	
Uygulama Yöntemi/ ekipmanları	Dokuma özel makasla veya keskin maket bıçağıyla kesilebilir. Dokumayı asla katlamayınız!

Çizelge 4.5. SikaWrap®-230 C Yapısal güçlendirme için örgülü karbon lifli elyafın özellikleri(Devam)

Uygulama Notları/ Sınırlamalar	- Köşelerde uygulamada köşeler en az >20mm olacak şekilde yuvarlatılmalıdır. - Köşelerin öğütülmesi veya Sikadur® harçlarla düzeltilmesi gerekebilir. - Lif doğrultusunda dokuma, kullanılan SikaWrap® tipine veya güçlendirme projesine bağlı olarak en az 100mm üst üste bindirilmelidir. - Yan yana uygulamada atkı doğrultusunda (taşıyıcı liflere dik doğrultuda) üst üste bindirme gerekmemektedir. Birden fazla kat uygulamada üst üste bindirmeler şaşırtmacalı olarak yapılmalı, aynı yerde yapılmamalıdır. - Güçlendirme uygulamaları yapısal işlerdir ve uygun tecrübeli müteahhitlerin seçimine özen gösterilmelidir. - SikaWrap®-230 C maksimum yapışma ve dayanıklılığı sağlayacak şekilde uygun Sikadur® empregnasyon/doyurma reçineleriyle birlikte kullanılır. Sistemin birbiriyle uygunluğunu sağlamak için sistemin bileşenlerini değiştirmeyiniz. - SikaWrap®-230 C) estetik ve/veya koruma amaçlı çimentolu harçlar veya kaplama malzemeleriyle kaplanabilir. Seçim maruz kalacağı etkiye göre yapılır.

4.2.8. Kauçuk

Çekiç yükü noktasal bir yük olmasına karşın içsel reaksiyon eleman boyunca dağılmış bir yük biçimindedir.

İçsel yükü ortadan kaldırmak için önerilen yöntemlerden biri kauçuk tabaka kullanılmasıdır. Kauçuk tabaka pik dış yükün ortaya çıkışını ötelemektedir. Bu da kirişe, çekicin yükünü tam olarak alması için zaman kazandırır. Bu nedenle pik yükün ortaya çıkışında ivme ve içsel yük kaybolmaktadır. Fakat deneysel çalışma kapsamında yürütülen tarz deneylerde içsel kuvvetin tamamıyla ortadan kaldırılması pratik olarak pek mümkün gözükmemektedir.

Deneylerde, kauçuk çekicin düştüğü noktada bulunan çelik levha ile deney elemanı arasına yerleştirilmiştir. Seçilen kauçuk malzeme özellikle darbelere karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Bu nedenle Neopren tip kauçuk malzeme kullanılmıştır. Neopren -35 ºC ile +95 ºC arasında kopma, yırtılma ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Aleve karşı dirençlidir. Yüksek anilin noktalı mineral yağlarda, silikon yağı, gres ve alkole karşı direnci iyidir. Ayni anda yağa ve atmosferik şartlara dayanıklılık istenilen yerlerde kullanılır. Bu malzemenin özellikleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Neopren tipi kauçuk malzemenin özellikleri

Sertlik (Shore A)	40-90
Özgül ağırlık [g/cm^3]	1,23
En yüksek sıcaklık [ºC]	95
En düşük sıcaklık [ºC]	-35
Kopma direnci (saf malzeme) [Mpa]	21
Kopma direnci (dolgulu malzeme) [Mpa]	21
Isıl genleşme[10^{-8}mm/mmºC]	135
Dinamik sürtünme katsayısı	0,9
Sürekli kalıcılık	D-E
Elastikiyet	B
Düşük sıcaklıkta elastikiyet	C
İzolasyon özelliği	D
Alev direnci	B
Ozon ve açık hava direnci	B
Gaz geçirgenliği direnci	B
Yırtılma direnci	C
Aşınma direnci	B
Metallere yapışma	B-A
Tekstillere yapışma	B-A

A = Mükemmel B = Çok İyi C = İyi D = Orta E = Zayıf

4.2.9. Beton

Deneysel çalışmada beton basınç dayanımı ana değişken olarak belirlenmiştir. Bu nedenle normal basınç dayanımlı ve yüksek basınç dayanımlı olmak üzere iki farklı beton sınıfı kullanılmıştır. Normal basınç dayanımlı beton için basınç dayanımı minimum 20 MPa maksimum 30 MPa, yüksek basınç dayanımlı beton için ise minimum 40 MPa olarak alınmış ve beton karışım hesapları buna göre yapılmıştır.

Beton karışımında, normal basınç dayanımlı beton için agrega, çimento, su, yüksek basınçlı dayanımlı beton içinse bunlara ilave olarak süper akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı, silis dumanı kullanılmıştır. Karışım oranları, malzeme laboratuarında hazırlanan ve sonuçları test edilen karışımlardan alınmıştır. Karışım işlemi Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuarında bulunan 250 dm^3 hacimli beton mikseri ile yapılmıştır(Resim 4.2).



Resim 4.2. 250 dm^3 hacimli beton mikseri

Normal dayanımlı deney elemanlarındaki karışım oranları Çizelge 4.7'de, yüksek dayanımlı beton karışım oranları da Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Normal dayanımlı deney elemanlarındaki karışım oranları

Malzeme	**Miktar(kg)**	**Ağırlıkça Oran(%)**
Çimento	22,5	20,9
Çakıl(7-15 mm)	40	37,2
Kum(0-7 mm)	30	27,9
Su	15	13,9

Çizelge 4.8. Yüksek dayanımlı beton karışım oranları

Malzeme	**Miktar(kg)**	**Ağırlıkça Oran(%)**
Çimento	42,3	18
Silica Fume	4,23	1,8
Çakıl	44,65	19
Kum	122,20	52
Hiper akışkanlaştırıcı	0,4	0,20
Su	21,15	9

Beton karışımından basınç dayanımı testi için 150×300 mm boyutlarında normal basınç dayanımlı ve yüksek basınç dayanımlı beton karışımlarından beşer adet silindir numune alınmıştır. Alınan bu numuneler deneylere başlamadan önce test makinesinde eksenel basınç altında test edilmiştir. Test sonuçları Çizelge 4.9'de verilmiştir.

Eksenel basınç uygulanan silindir numunelerin kırılma yükleri ölçüldükten sonra ortalamaları alınıp hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hazırlanan deney elemanlarının test için kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.9. Beton silindir numunelerin test sonuçları

Dayanım Sınıfı	**Numune Boyutu (mm)**	**Basınç dayanımı (MPa)**	**Ortalama (MPa)**
Normal basınç dayanımlı silindir numuneler	150×300	28,4	27,3
	150×300	24,8	
	150×300	30,3	
	150×300	27,6	
	150×300	25,3	
Yüksek basınç dayanımlı silindir numuneler	150×300	41,2	42,4
	150×300	42,3	
	150×300	41,6	
	150×300	44,2	
	150×300	42,8	

4.3. Deney Elemanları

Deneylerde kullanılacak eleman boyutlarına karar verebilmek için pilot deney elemanları ile bir ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışma ile hazırlanacak elemanların deneylerde elde edilmek istenen amaca uygunlukları araştırılmıştır. Pilot deney elemanları 710x150x150, 710x150x120, 710x150x100 ve 710x150x80 mm olarak 4 adet eleman hazırlanmıştır. 28 günlük dayanımlarını kazanan elemanlar üzerinde yapılan deneyler ile 710x150x150 mm boyutlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Diğer elemanları göçmeye götüren düşme sayısı 1'i geçmemiş ve ölçüm alınamamıştır.

Deneylerde kullanılmak üzere 5 adet normal dayanımlı ve 5 adet yüksek dayanımlı beton kiriş eleman hazırlanmıştır. Boyutlar tüm kirişler için sabit tutulmuştur. Beton kirişlerin boyutları 710×150×150 mm ölçülerindedir. Kirişler için döküm metal kalıplar kullanılmıştır(Resim 4.3). Beton dökme işi her dayanım sınıfı için tek seferde yapılmıştır. Metal kalıplar beton dökümü yapılmadan önce temizlenmiş ve

yapışmayı engellemek için kalıp yağı ile çok ince bir tabaka oluşturacak şekilde yağlanmıştır. Hazırlanan taze betonla kalıplar tek seferde doldurulmuştur. Daha sonra vibratör yardımıyla beton sıkıştırılmış ve yüzeyler mala yardımıyla düzeltilmiştir. Deney elemanları hazırlanırken aynı zamanda dökülen betondan silindir numunelerde doldurulmuş ve basınç dayanım testi için ayrılmıştır.



Resim 4.3. Deney elemanlarının hazırlandığı döküm metal kalıplar

Hazırlanan elemanlar 4 gün metal kalıplarında tutulmuştur. Bu 4 gün içersinde beton yüzeyi sürekli ıslak tutulmuştur. 4. gün sonunda kalıplardan dikkatli bir şekilde çıkarılan elemanlar boyutları uygun olduğu için laboratuarımızda bulunan kür havuzuna yerleştirilmiştir. Deney elemanları kür havuzunda 20-25 °C sıcaklıkta 28 günü tamamlayıncaya kadar su içerisinde bekletilmiştir. 28 gün dolduktan sonra kür havuzundan çıkarılan elemanlar direk ısıya ve güneş ışığına maruz kalmayacak şekilde gölge bir yerde kurumaya bırakılmıştır. 1 hafta kurumada kaldıktan sonra deney için hazırlanmıştır. Bu işlem devam ederken silindir numunelerde aynı kür şartlarına tabi tutulmuştur. 28 günü doldurduktan sonra basınç deneyleri yapılmıştır. Normal dayanımlı beton elemanlar için yapılan bu işlemler yüksek dayanımlı betonlar içinde aynen uygulanmıştır.

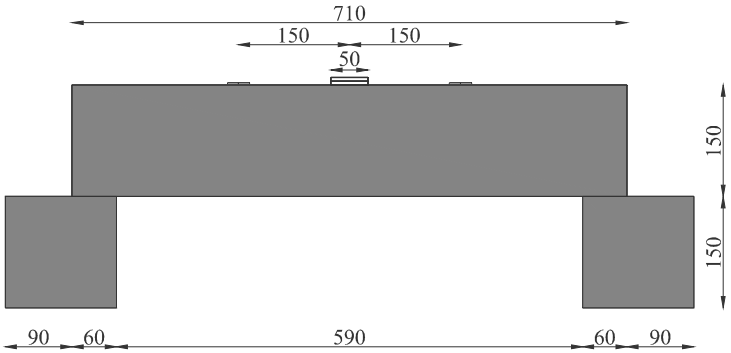
Deney elemanlarının boyutları, adları ve dayanım sınıfları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Deney elemanlarının boyutları, adları ve dayanım sınıfları

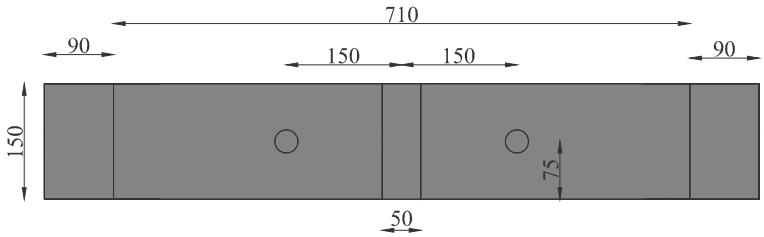
Numune	**Boyutu(mm)**			**Dayanım sınıfı**
	Boy (mm)	**Yükseklik (mm)**	**Genişlik (mm)**	
SC1	710	150	150	Normal
SC2	710	150	150	Normal
SC3	710	150	150	Normal
SC4	710	150	150	Normal
SC5	710	150	150	Normal
SC6	710	150	150	Yüksek
SC7	710	150	150	Yüksek
SC8	710	150	150	Yüksek
SC9	710	150	150	Yüksek
SC10	710	150	150	Yüksek

4.4. Deney Elemanlarının Deneye Hazırlanması

Deney yapılmadan önce dayanımlarını kazanmış olan elemanların deney için ön hazırlıklarının yapılması gerekmektedir. Eleman öncelikle beyaz plastik boya ile boyanmıştır. Böylelikle deney esnasında eleman üzerinde oluşan çatlakların gözle görülebilmesi ve kamera ile görüntü elde edilmesi kolaylaşacaktır. Elemanların üzerinde ölçüm aletlerinin yerleştirilmesi için delikler açılması gerekmektedir. Şekil 4.1'de mesnetlerin, çelik plaka ve kauçuğun ve ivmeölçerlerin geometrik yerleşimleri detaylı olarak verilmiştir.



(a)



(b)

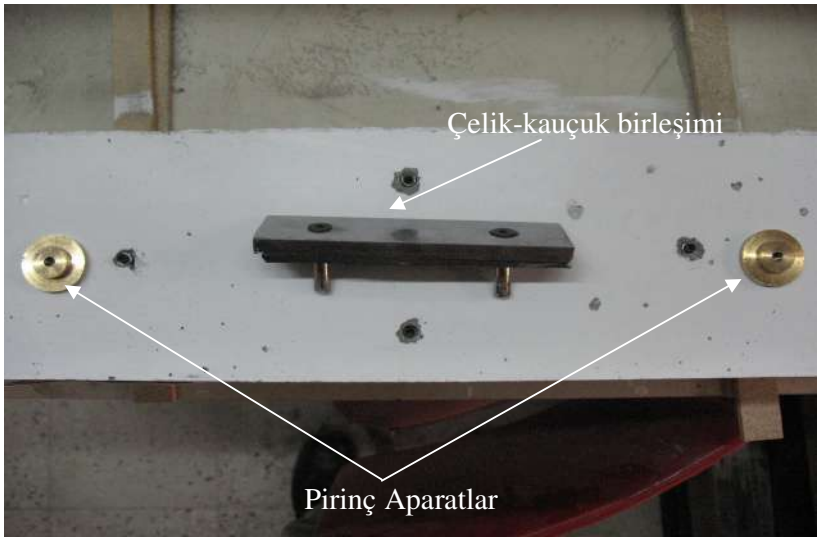
Şekil 4.1. Deney numuneleri ve ölçüm aleti yerleşimleri, a) Ön görünüş, b) Üst görünüş

Karar verilen yerleştirme şekline göre çıkarılan bir şablon yardımıyla açılacak deliklerin yerleri işaretlenerek belirlenmiştir. Aynı şablon tüm numuneler için kullanılmış ve bütün deney elemanlarında ölçümlerin aynı noktadan alınması sağlanmıştır. Daha sonra numuneye hasar vermeyecek şekilde düşük hızlı bir matkap yardımıyla delikler açılmıştır. Açılan deliklere Ø6 lık çelik dübeller yerleştirilmiştir(Resim 4.4).



Resim 4.4. Deney elemanı üzerine açılan delikler

Yerleştirilen dübeller yardımıyla deney elemanı üzerine ivmeölçerler ve çekicin çarptığı yere çelik levha ve kauçuk levha tutturuldu. Özellikle ivmeölçerlerin numuneler üzerine yerleştirilmesinde gösterilecek hassasiyet sonuçların sağlıklı alınması bakımından son derece önemlidir. Bu nedenle yerleştirme sırasındaki hassasiyeti sağlamak amacıyla, ivmeölçerler de numuneler üzerine çelik dübellere monte edilen pirinç aparatlar yardımıyla monte edilmişlerdir. Pirinç malzeme seçilmesindeki ana sebep, bu malzemenin üzerine gelen her türlü etkiyi çok düşük bir kayıpla iletmesidir. Bu şekilde, ivmeölçerlerin çarpma sırasındaki hareket etmesi engellenmiştir (Resim 4.5). İvmeölçerlerin simetrik olarak yerleştirilmesine karar verilmiştir. Böylelikle ölçülen değerler karşılaştırılabilecek ve malzemenin içyapısı ile ilgili özellikleri yorumlamamıza imkân verecektir.



Resim 4.5. Pirinç sabitleme aparatları ve çelik-kauçuk birleşimi

Numuneler 150×150×150 mm boyutlarında küp mesnetler üzerine oturtulmuştur. Çarpma etkisiyle numunenin yanal ötelenmesini ve dönmesini önlemek amacıyla numune mesnetlere sıkıca birleştirilmiştir.

Çekiç direkt olarak numune üzerine düşürülmemektedir. Çekiç çarpma anında numune ile değil çelik bir plaka ile etkileşime geçmektedir. Düşen ağırlık deney aleti ile beton üzerinde yapılan pilot deneylerde çekiç direk beton üzerine düşürüldüğünde yükü noktasal olarak elemana aktarmaktadır. Bu da eleman üzerinde delme etkisi ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca eleman üzerinden ölçüm alamadan elemanı göçmeye götürmektedir. Bu nedenle çekiç ile numune arasına çelik plaka yerleştirilmiştir.

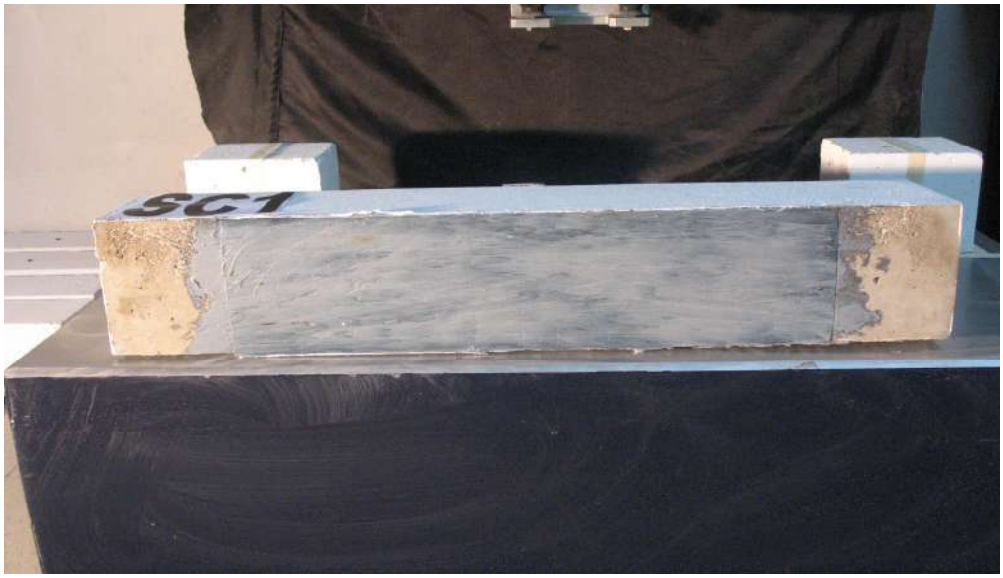
Çelik plakanın amacı yükün eleman üzerine uniform olarak yayılmasını sağlamaktır. Ayrıca çapma anında eleman üzerinde meydana gelen içsel etkileri azaltmak için bu çelik plaka altında sert kauçuk malzeme yerleştirilmiştir. Çelik plaka ve sert kauçuk 50x150x20 mm boyutlarındadır. Eleman üzerine dübeller yardımı ile sabitlenmişlerdir. Çekicin her düşürülüşünde aynı noktaya çarpmasını sağlamak için çelik plaka ve kauçuk malzemenin elemana sabitlenmesi önem gösterilmesi gereken bir noktadır. Çekicin her düşüşünde çelik plakanın yerinden oynamaması deney sonuna kadar çekicin aynı noktaya düşmesini sağlayacak şekilde sabitlenmiştir.

Deneylerimizin temelini oluşturan CFRP'nin deney elemanı üzerine yapıştırılması özenli ve dikkatli bir şekilde yapılmıştır. Öncelikli olarak CFRP uygulanacak ölçülerde kesilmiştir. 500×150 mm boyutlarında 10 adet parça CFRP rulosundan makas ile kesilmiştir. Kesim, liflere zarar vermeden lifleri birbirine bağlayan ipler kesilerek yapılmıştır. Kesilen CFRP parçaları uygulama yapılıncaya kadar, malzemenin hassaslığından dolayı düz bir zemin üzerine yayılarak ve dış etkilerden korunarak muhafaza edilmiştir.

Numune üzerinde CFRP'nin yapıştırılacağı yüzey hazırlığı yapılmıştır. Öncelikle el taşlama aletine takılan zımpara taşı yardımıyla elemanın üzerindeki yapıştırma yüzeyi pürüzsüz bir hale getirilmiş ve çimento şerbeti yüzeyden kaldırılmıştır. Yüzeye komprasör yardımıyla basınçlı hava püskürtülerek yüzeyde bulunan küçük gözeneklere dolmuş olan tozlar ve gevşek partiküller uzaklaştırılmıştır. Bundan sonra hafif nemli bir bezle yüzey silinmiş ve yüzeye yapışan tozlarda temizlenmiştir.

CFRP'yi yüzeye yapıştırmada kullanılacak olan ve iki bileşenden oluşan epoksi temiz bir kap içerisinde karıştırma talimatına uygun şekilde karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım ıspatula vasıtası ile hazırlanmış yüzeye uygulanmıştır. Daha önce kesip hazırladığımız CFRP parçaları uygulama doğrultusunda yüzeye yerleştirilmiştir. Bundan sonra ıspatula, yüzeyde lif doğrultusuna paralel olarak ileri geri hareket ettirilerek epoksinin lifler arasından çıkması sağlanmıştır. Ayrıca yüzeyde kalan hava kabarcıkları da uzaklaştırılmış sağlanmıştır. CFRP'nin tüm üst yüzeyine epoksi çıktıktan sonra ince tesviye yapılarak yüzey düzlenmiştir. Böylelikle beton ile CFRP arasında iyi bir bağ oluşturulması sağlanmıştır. Tüm deney elemanları aynı şekilde hazırlanmıştır. Yapıştırma işlemi tamamlanan elemanlar oda sıcaklığında temiz bir ortamda kurumaya bırakılmıştır. Deney elemanları yapıştırma işlemi tamamlandıktan 5 ila 7 gün sonra deney yapılmaya hazır hale gelecektir.

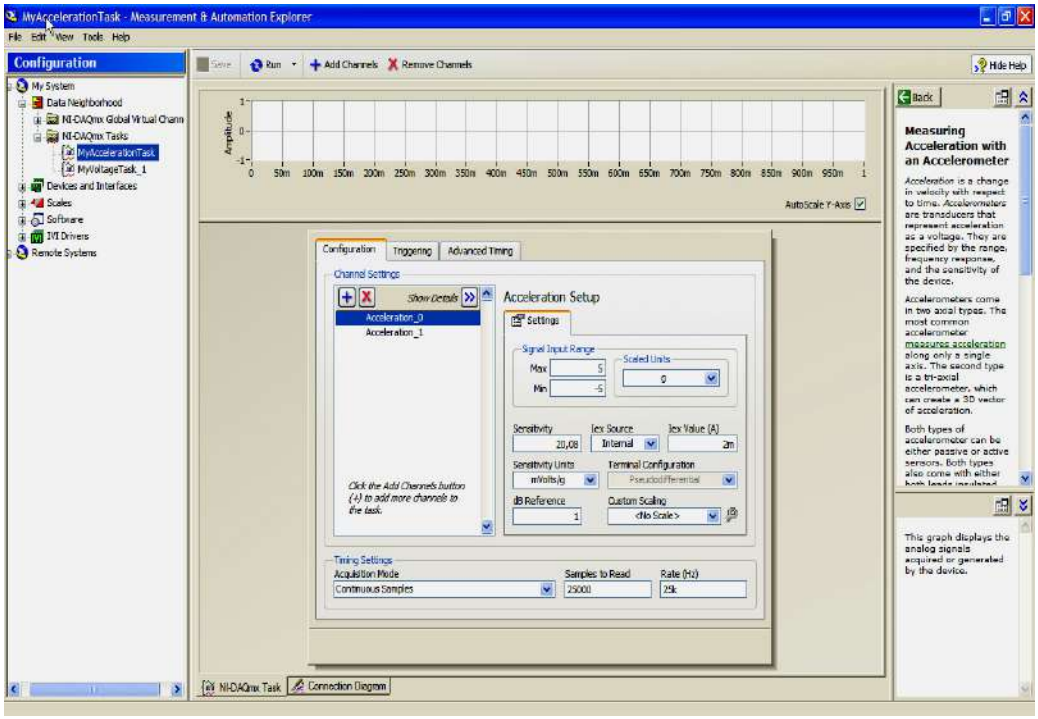
Deney elemanlarına epoksi ile yapıştırılmış CFRP malzemesi Resim 4.6'da görülmektedir.



Resim 4.6. CFRP yapıştırılmış deney elemanı

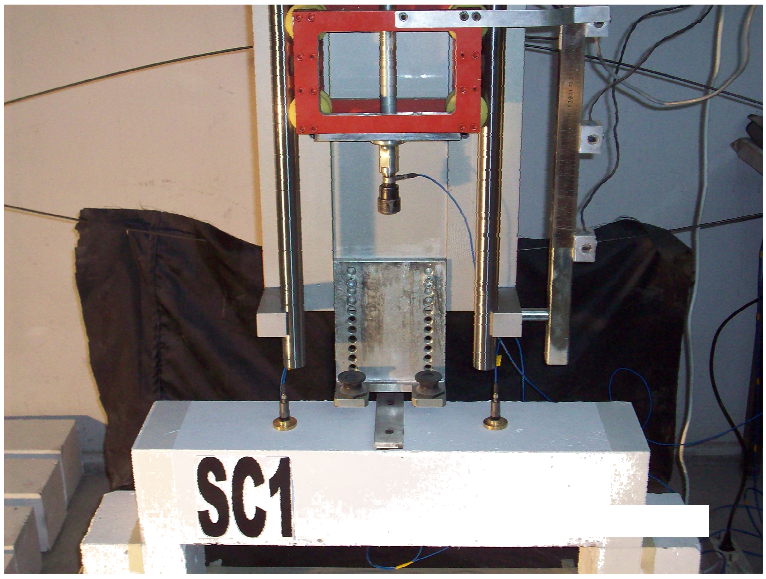
Deney elemanları isimlendirilirken özel karakterler kullanılmamıştır. Etiketteki S; specimen, C; CFRP, numara ise sırayla verilmiştir.

Deney düzeneğinin tablası üzerinde bulunan mesnetler üzerine eleman yerleştirildikten sonra ivmeölçerler ve kuvvetölçer yerlerine yerleştirilmiştir. Ölçüm aletlerine bağlanan özel kablolar yardımıyla bütün ölçüm aletleri veri toplayıcıya bağlanmıştır. Ayrıca kablolar zarar görmeyecek şekilde muhafaza edilmiştir. Veri toplayıcı ise bilgisayara bağlanarak kayıt işlemi için hazır hale getirilmiştir. Bilgisayarda bulunan National Instruments firması tarafından hazırlanan Measurement & Automation programı (Resim 4.7) yardımı ile ivmeölçerlerin ve kuvvet ölçerin kalibrasyonu yapılıp veriler kaydedilmiştir.



Resim 4.7. National Instruments firması tarafından hazırlanan Measurement & Automation programı

Deneye hazır hale gelen eleman Resim 4.8'de görülmektedir.



Resim 4.8. Deney elemanı

5. DENEYLER

5.1. Genel Bilgi

Beton kiriş deney elemanlarının priz süreleri tamamlandıktan sonra CFRP ile güçlendirme işlemleri yapılarak deneye hazır hale gelebilmeleri için 7 gün süre ile epoksinin tam dayanımına ulaşması için beklenmiştir. Deney programında ilk olarak normal beton basınç dayanımına sahip güçlendirilmiş deney elemanları serisi test edilmiştir. Her deney elemanı seçilen belirli bir yükseklikten düşürülen sabit ağırlıklı çekiç ile göçme meydana gelene kadar çarpma yüklemesi altında test edilmiştir. Seçilen yükseklikler sırası ile Deney elemanı 1'de 750 mm'den başlanarak her deney elemanında 50 mm azaltılarak sırası ile 700, 650, 600 ve Deney elemanı 5'de 550 mm'ye ulaşmıştır. Benzer yaklaşım tarzı yüksek dayanımlı beton basınç dayanımına sahip deney elemanları serisinde de uygulanmıştır.

İlk olarak deney elemanı deney düzeneğine kütlesi 500 kg olan ve 1000 mm boyutlarında üretilen çelik tablanın üzerine yerleştirilmiştir. Deney elemanının merkezinin değişmemesi, çarpma anında devrilmemesi ve deney elemanı üzerine düşen çekicin hep aynı noktaya düşmesini sağlamak için eleman mesnetlere bağlanmıştır. Ölçme düzeneğinin hazırlanmasında ve ivmeölçerlerin yerleştirme konumlarının yerlerinin belirlenmesi için çalışmaya başlamadan önce çeşitli boyutlarda yapmış olduğumuz pilot elemanlar üzerinde yapılan deneylerde alınan ölçümlerden faydalanılmıştır. Bu ölçümlere göre ivmeölçerler kapasite aşımını engellemek için çarpma noktasından 150 mm sağ ve sol tarafa simetrik olarak yerleştirilmiştir. İvmeölçerler deney elemanının içyapısı hakkında yorum yapmak ve ölçüm değerlerinin nasıl değişim gösterdiğini görmek için simetrik olarak yerleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan çekiç kütlesi 5,25 kg olup bütün testlerde sabit tutulmuştur.

Deney elemanlarına belirlenmiş olan 5 ayrı yükseklikten serbest olarak düşürülen sabit ağırlıklı çekiç ile göçmeye ulaşıncaya kadar çarpma yüklemesi uygulanmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar genel olarak Çizelge 5.1'de verilmiştir. Her bir deneye, elemanlar göçmeye ulaşıncaya kadar devam edilmiştir.

Çizelge 5.1. Deney sonuçları

Eleman Adı	Beton Dayanımı	Düşme Yüksekliği (mm)	Toplam Düşme zamanı(ms)	Toplam Çekiç Düşme Sayısı	İlk Çatlak Başlangıç Düşme Sayısı
SC1	Normal	750	498,00	21	6
SC2	Normal	700	471,00	25	12
SC3	Normal	650	445,00	36	11
SC4	Normal	600	419,00	31	20
SC5	Normal	550	393,00	44	36
SC6	Yüksek	750	498,00	45	30
SC7	Yüksek	700	471,00	34	19
SC8	Yüksek	650	445,00	72	47
SC9	Yüksek	600	419,00	58	29
SC10	Yüksek	550	393,00	90	79

Deneylerde, çarpma anında deney elemanı ve çekiç üzerinde oluşan değişimlerin ve çatlak gelişiminin görüntülenmesi için el tipi DVD' ye kayıt yapan SONY DCR-DVD505 marka kamera kullanmıştır. Kamerayı normal el tip kameralardan ayıran özelliği düzgün ağırlaştırılmış görüntü çekebilmesidir. Bu özelliği, 3 saniye içinde yakaladığı görüntüyü, görüntü özelliklerini bozmadan 11 saniyeye yayan ve böylelikle çarpma anının gözle görülebilir hale gelmesini sağlamıştır.

Grafikler, deney elemanlarından ölçülen ivme değerleri matematiksel olarak yorumlanarak elde edilmiştir. Ölçülen değerler ivme-zaman grafiğine dönüştürülmüş ve grafiği çizilmiştir. Elde edilen ivme değerleri g olarak ölçülmektedir. İvme değerleri yerçekimi ivmesi sabiti olan 9,81 m/s^2 değeri ile çarpılarak m/s^2 birimine çevrilmiştir. Daha sonra elde edilen değerlerin zamana göre integrali alınarak hız değeri m/s olarak elde edilmiştir. Elde edilen hız değerinin tekrar zamana göre integrali alınarak deplasman değeri metre olarak elde edilmiştir. Deplasman değeri 1000 ile çarpılarak milimetreye çevrilmiştir.

Deneysel çalışmada yapılan gözlemler ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Her bir düşmede ivmeölçerler ve kuvvetölçer kullanılarak elemanda oluşan içsel etkiler belirlenmeye çalışılmıştır. Deney esnasında her bir deney elemanının çatlak oluşumu, ivme-zaman ilişkisi, çekiç düşme sayısı ve elemanların genel davranışı takip edilmiştir.

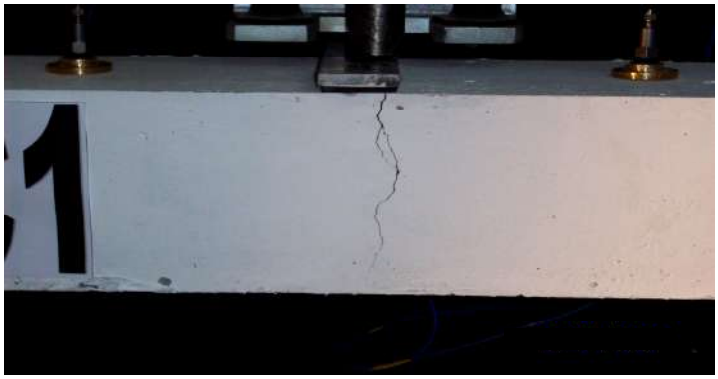
5.2. SC1 Deney Elemanı

Deney elemanı SC1 750 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı normal dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 21 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 498 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 6'ıncı düşmede almıştır (Resim 5.1). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.2). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.3). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.2'de verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 1. düşme, 6. düşme ve 19. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.4'de verilmiştir.

Kuvvetölçerden okuduğumuz değerler, kuvvetölçerin maksimum ölçme değerini aştığı için bir noktada kuvvet değerinin kaydı kesilmiştir. Okunan değerlerden elde edilen değerlerle çizilen grafik Şekil 5.6' da verilmiştir. Diğer elemanlar için yapılan deneylerde kuvvetölçerden kapasitesinin aşılması nedeniyle maksimum kuvvet değerinin okunamaması nedeniyle kuvvetölçer devre dışı bırakılmıştır. Kuvvetölçerin zarar görmemesi için çekicin uç kısmından sökülmüş ve yerine aynı

ağırlıkta diğer uç takılmıştır. Deney boyunca elemanın konumu sabit tutulmuş ve çekicin aynı noktaya düşmesi sağlanmıştır.



Resim 5.1. SC1 Elemanında oluşan ilk hasar



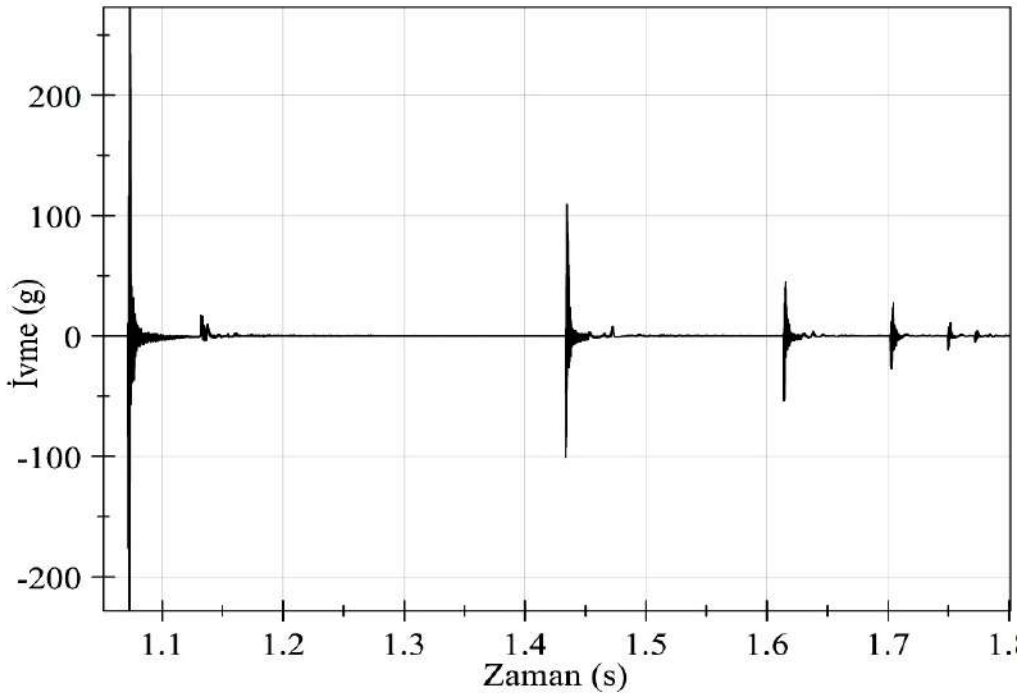
Resim 5.2. SC1 Elemanının göçme durumu



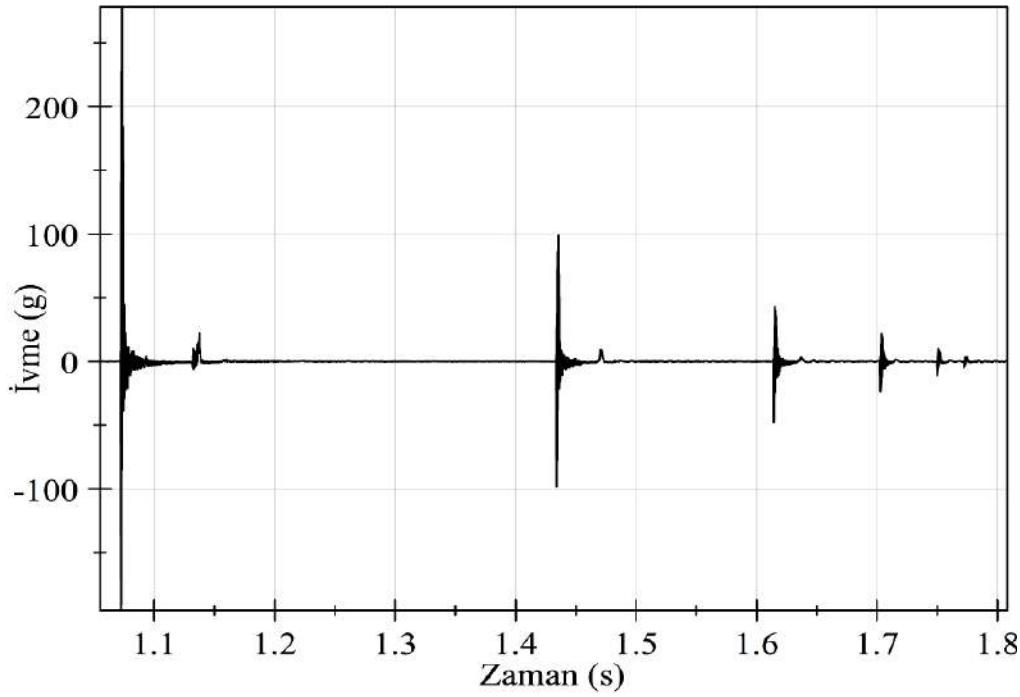
Resim 5.3. SC1 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.2. SC1 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

Deney Elemanı	Düşme No	Sol İvmeölçer		Sağ İvmeölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC1	1	-223,26	271,10	-277,78	277,23
	2	-228,41	273,00	-195,49	278,09
	3	-193,19	229,83	-186,15	271,34
	4	-181,98	272,45	-176,11	271,73
	5	-182,64	270,59	-222,74	233,22
	6	-209,72	243,25	-224,81	273,13
	7	-177,71	230,73	-270,78	272,09
	8	-172,31	268,12	-255,63	265,43
	9	-196,71	202,95	-270,22	277,76
	10	-152,81	178,34	-277,36	278,02
	11	-157,14	233,30	-265,81	271,92
	12	-185,04	231,03	-276,19	276,61
	13	-176,48	273,00	-275,43	274,18
	14	-252,50	273,00	-262,22	261,17
	15	-171,91	263,99	-275,12	277,20
	16	-186,51	272,82	-271,39	270,83
	17	-192,20	231,11	-218,03	235,27
	18	-168,17	271,59	-214,07	243,29
	19	-208,02	202,31	-248,92	278,06
	20	-149,14	215,01	-276,78	254,26
	21	-150,99	270,15	-263,89	270,67

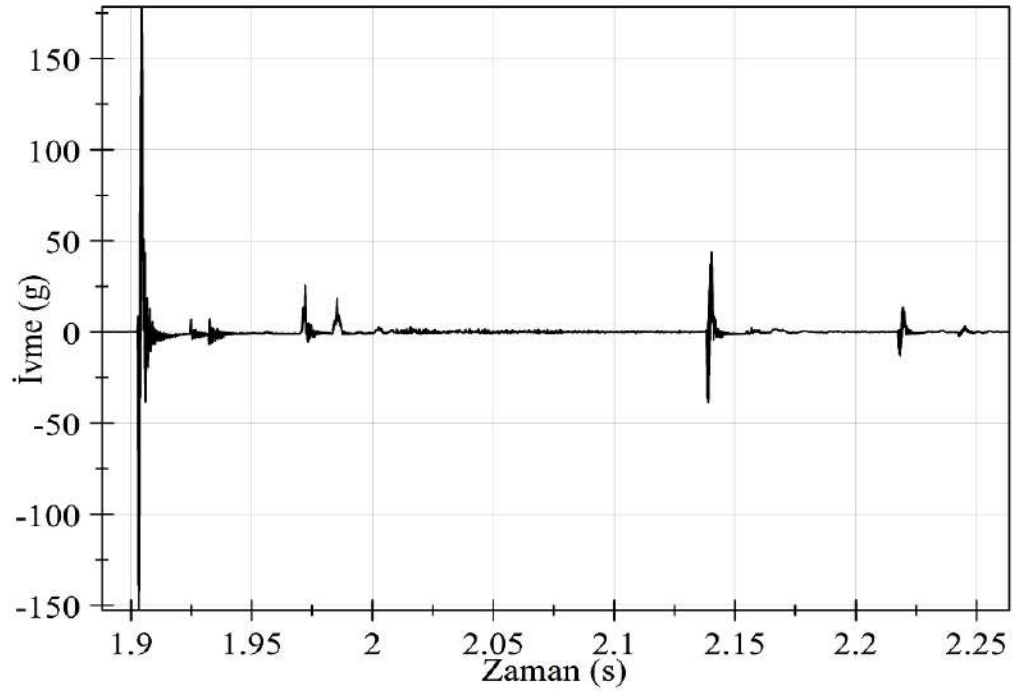


(a)

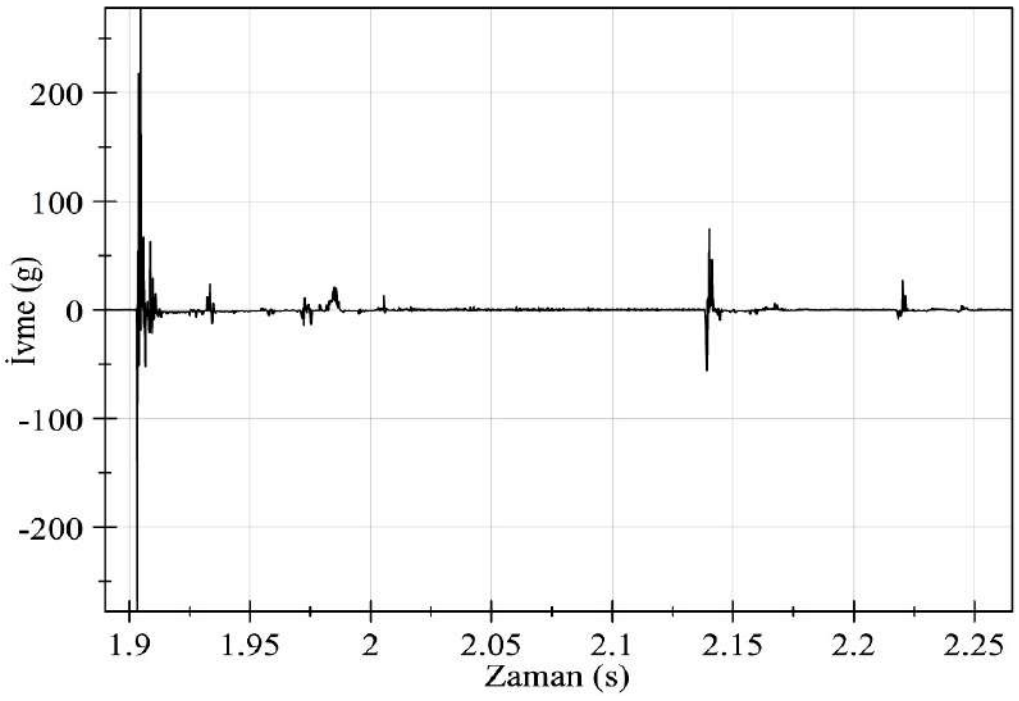


(b)

Şekil 5.1. SC1 Deney elemanının 1. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

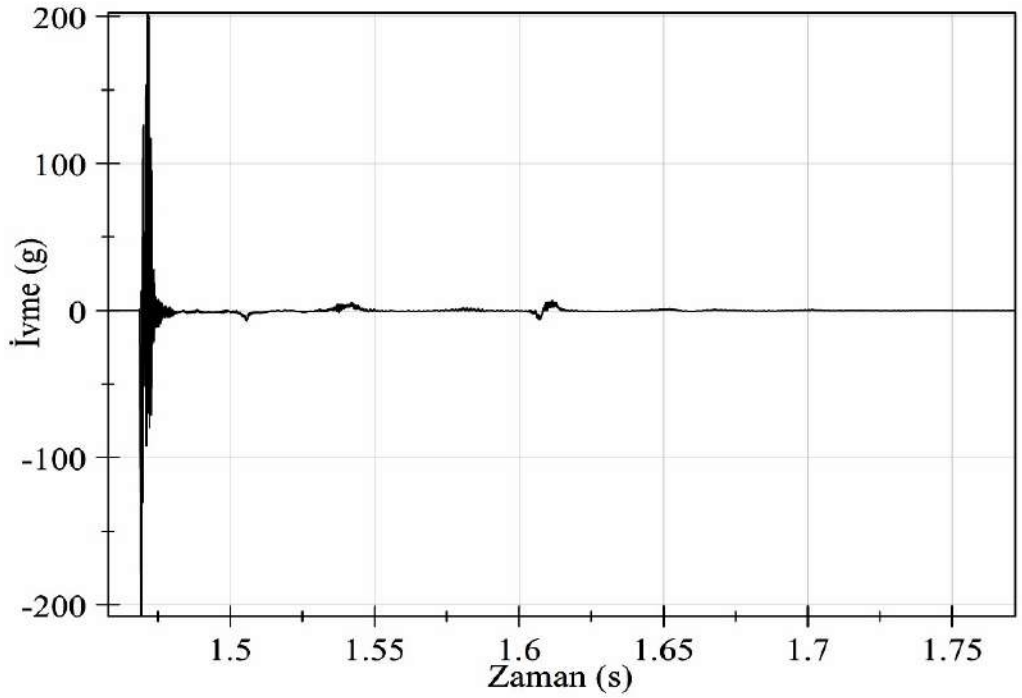


(a)

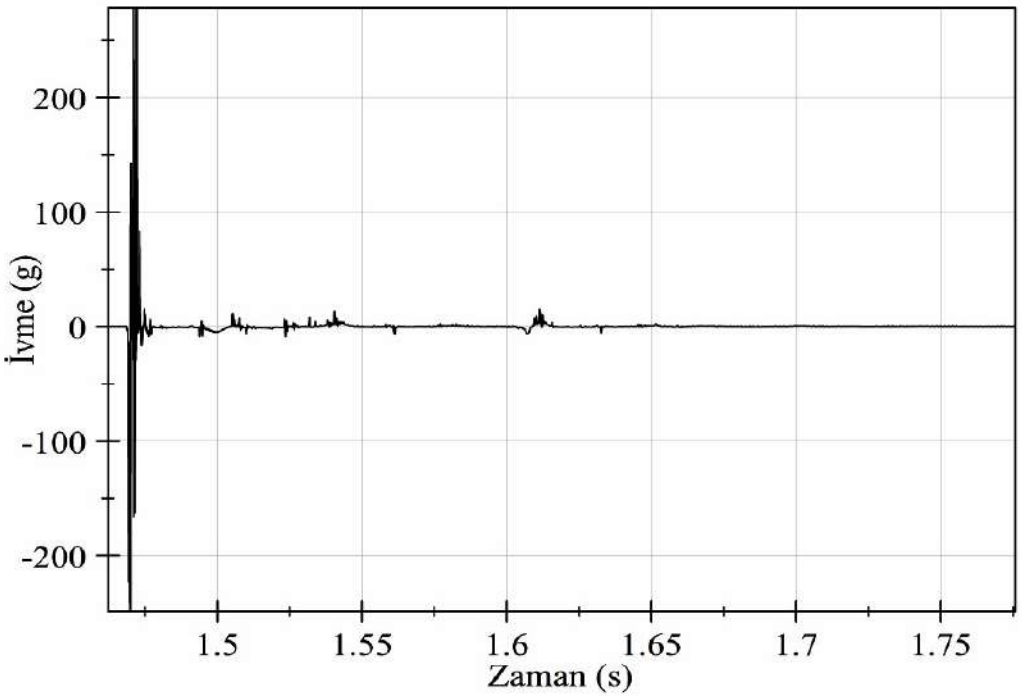


(b)

Şekil 5.2. SC1 Deney elemanın 6. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

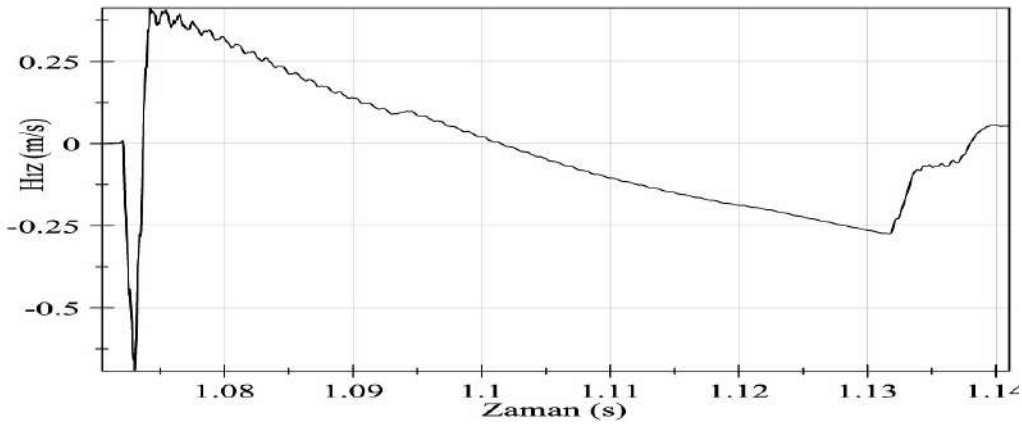


(a)

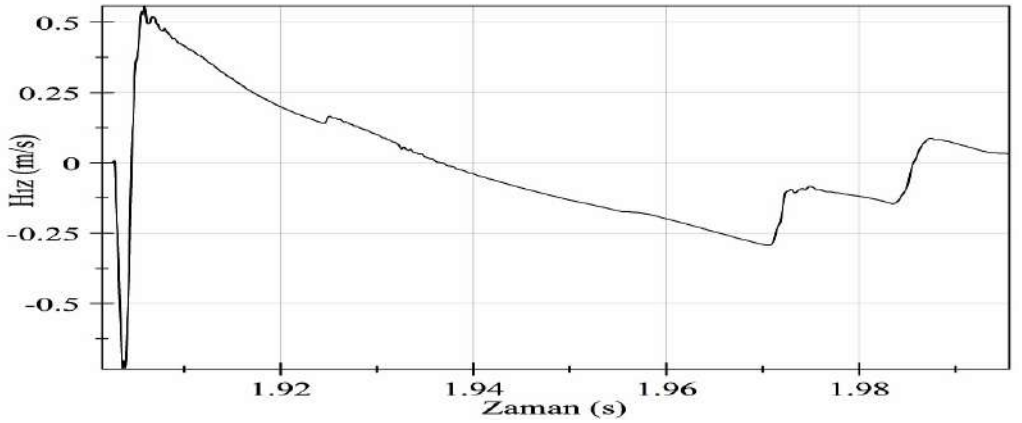


(b)

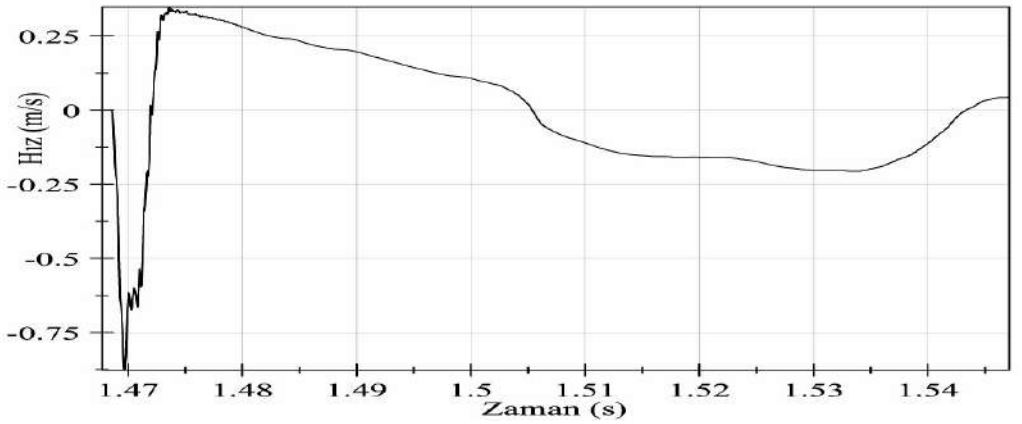
Şekil 5.3. SC1 Deney elemanın 19. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

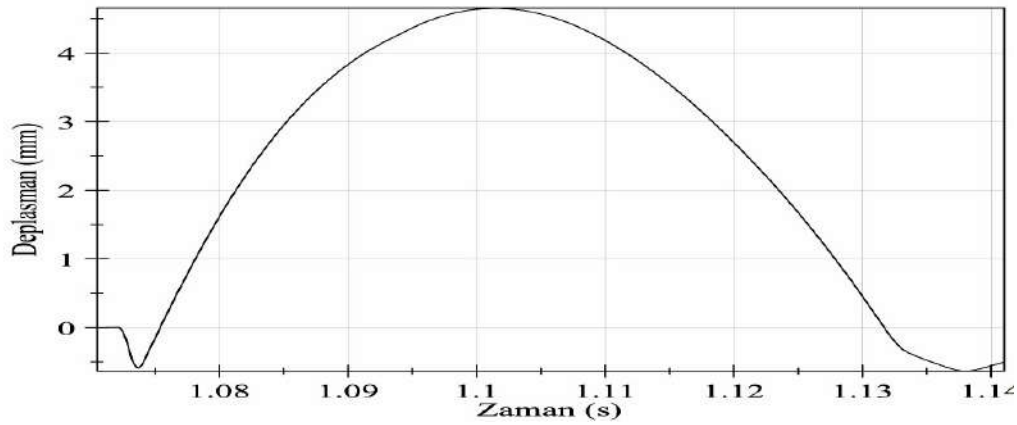


(b)

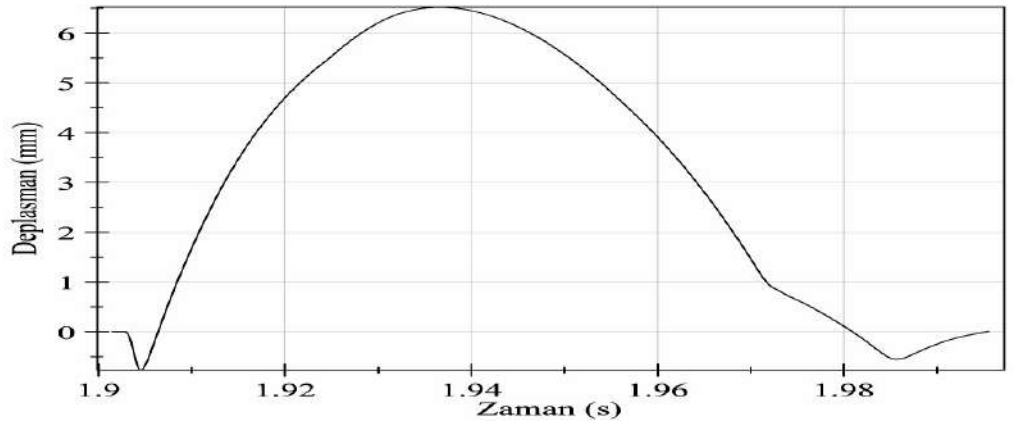


(c)

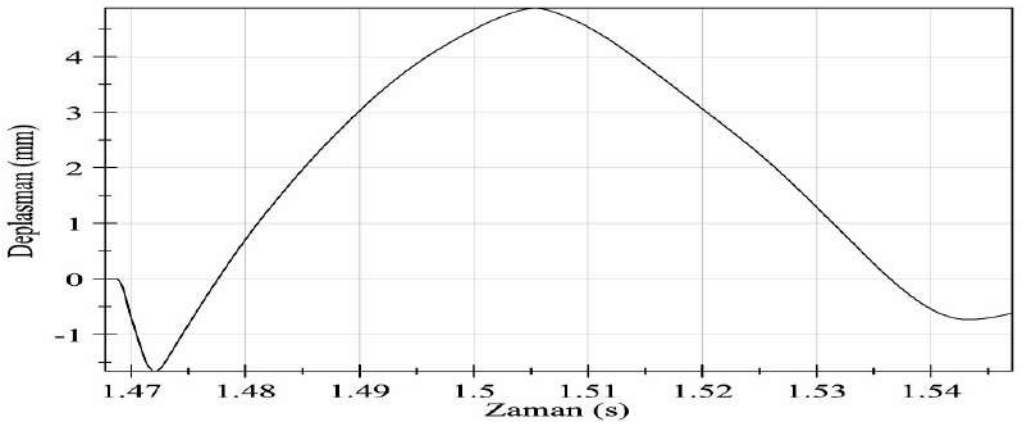
Şekil 5.4. SC1 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a) 1. düşme b) 6. düşme c) 19. düşme



(a)

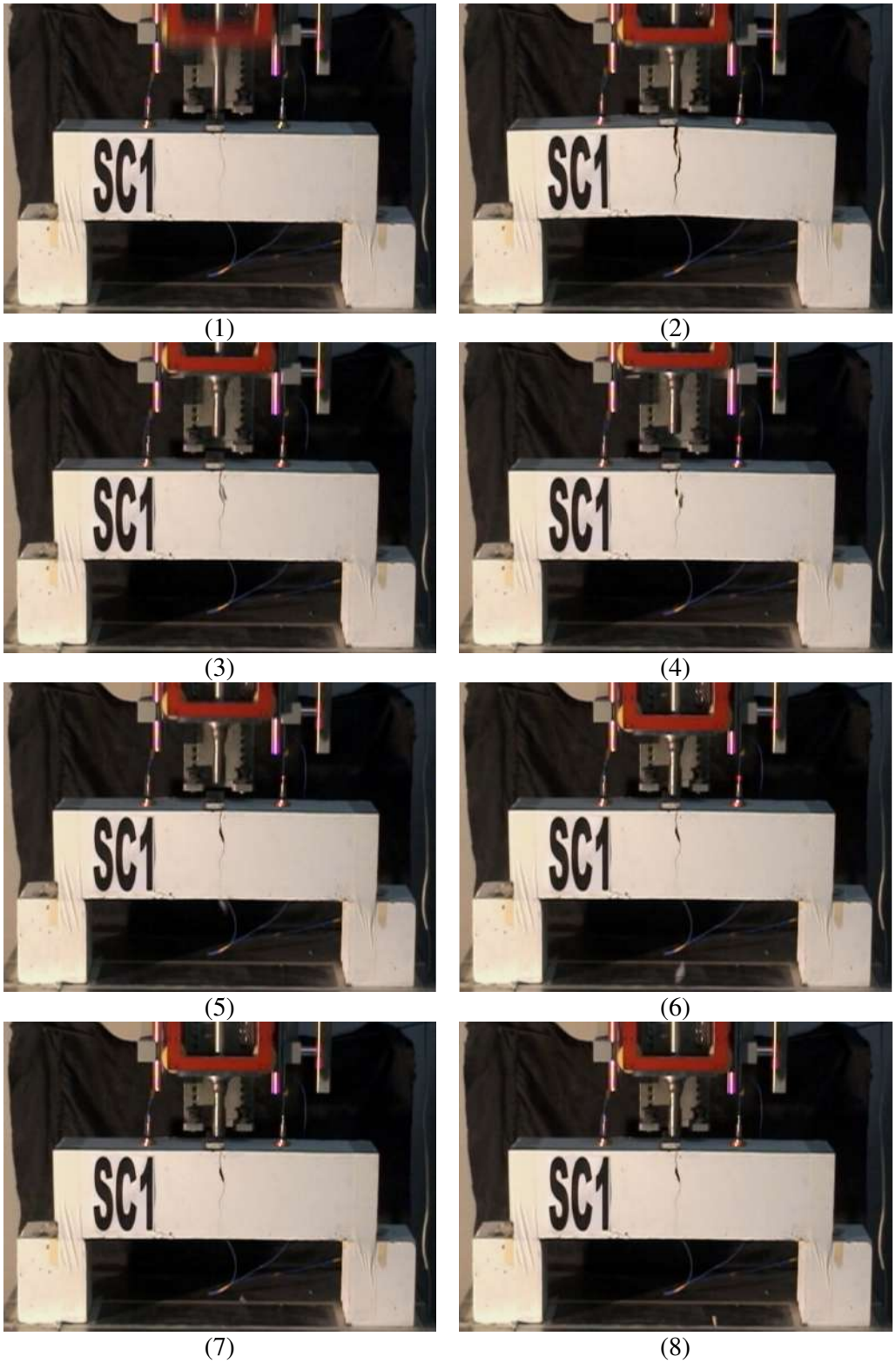


(b)

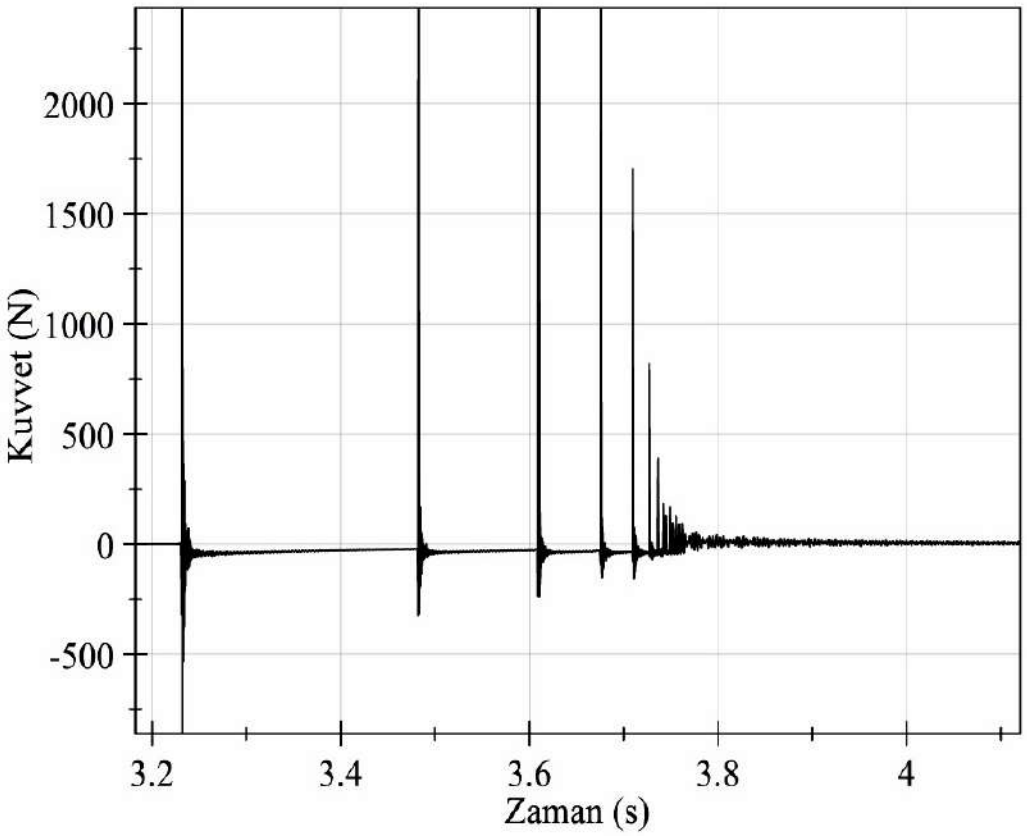


(c)

Şekil 5.5. SC1 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 1. düşme b) 6. düşme c) 19. düşme



Resim 5.4. SC1 Deney elemanı göçme durumu



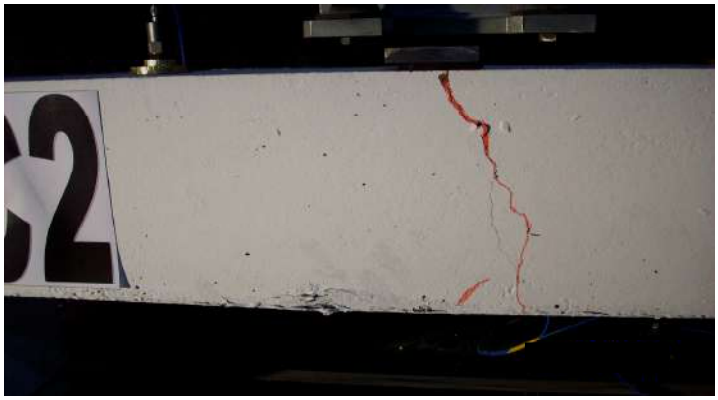
Şekil 5.6. Kuvvetölçerden elde edilen değerler

5.3. SC2 Deney Elemanı

Deney elemanı SC2 700 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı normal dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 25 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 471 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 12'inci düşmede almıştır (Resim 5.5). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.6). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.7). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.3'de

verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 2. düşme, 12. düşme ve 24. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.8'de verilmiştir.



Resim 5.5. SC2 Elemanında oluşan ilk hasar



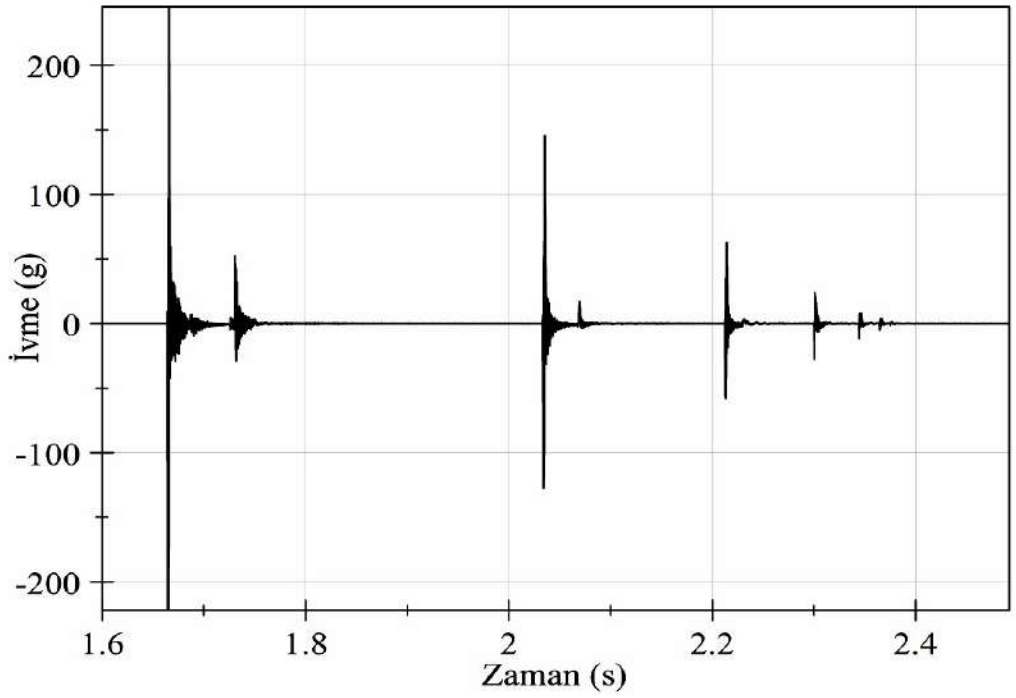
Resim 5.6. SC2 Elemanının göçme durumu



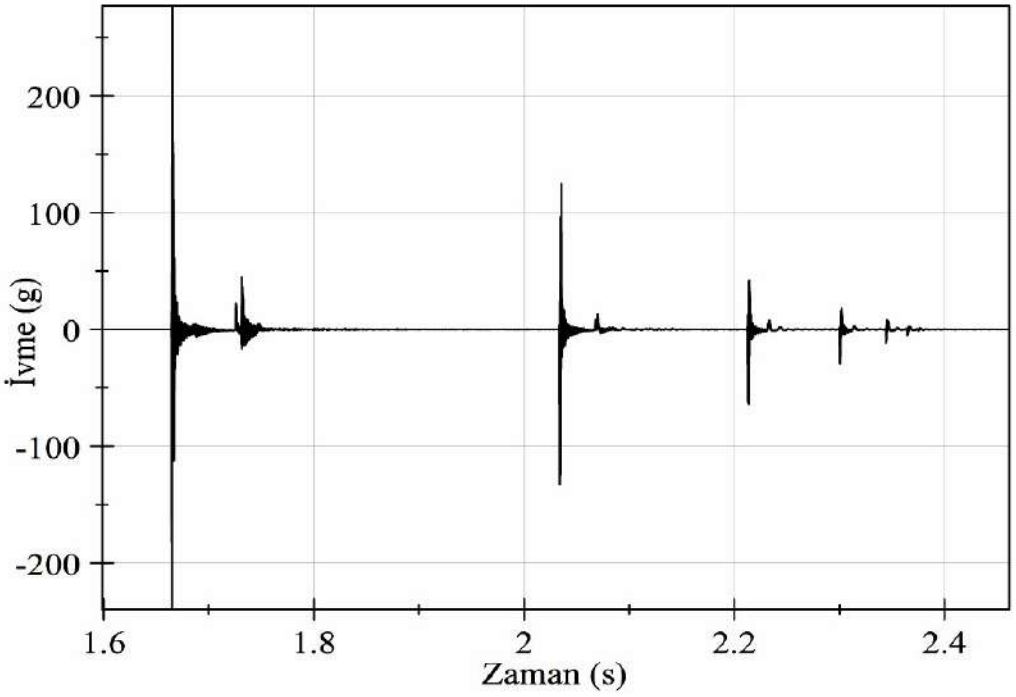
Resim 5.7. SC2 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.3. SC2 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

Eleman	Düşme No	Sol İvmeölçer		Sağ İvmeölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC2	1	-216,00	245,09	-239,33	199,49
	2	-222,11	245,08	-239,81	276,88
	3	-240,36	273,00	-203,00	278,07
	4	-229,77	228,30	-242,10	277,22
	5	-251,33	221,67	-219,79	276,82
	6	-241,81	226,08	-225,76	270,78
	7	-231,90	272,55	-227,14	246,90
	8	-244,48	272,11	-215,39	217,53
	9	-225,11	271,03	-212,70	278,09
	10	-250,02	261,77	-245,62	218,19
	11	-252,21	272,55	-239,77	205,27
	12	-239,10	254,98	-231,66	202,82
	13	-238,80	243,11	-262,60	183,50
	14	-222,04	214,58	-238,96	236,21
	15	-214,77	270,92	-180,87	214,08
	16	-256,24	255,00	-277,78	235,93
	17	-272,92	271,08	-196,47	246,85
	18	-255,35	272,23	-277,78	221,72
	19	-272,92	272,78	-255,45	199,67
	20	-242,02	199,78	-217,75	278,02
	21	-194,33	162,86	-227,51	266,28
	22	-188,12	146,35	-215,66	218,63
	23	-193,79	164,37	-211,47	218,53
	24	-184,93	159,91	-265,12	249,75
	25	-191,60	134,44	-223,85	273,80

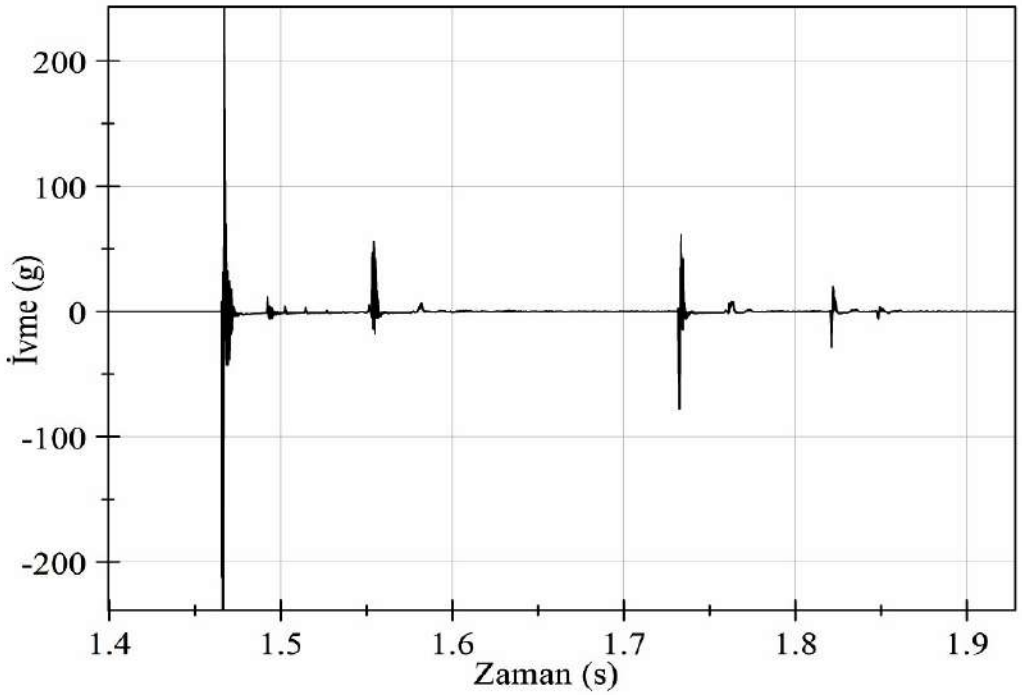


(a)

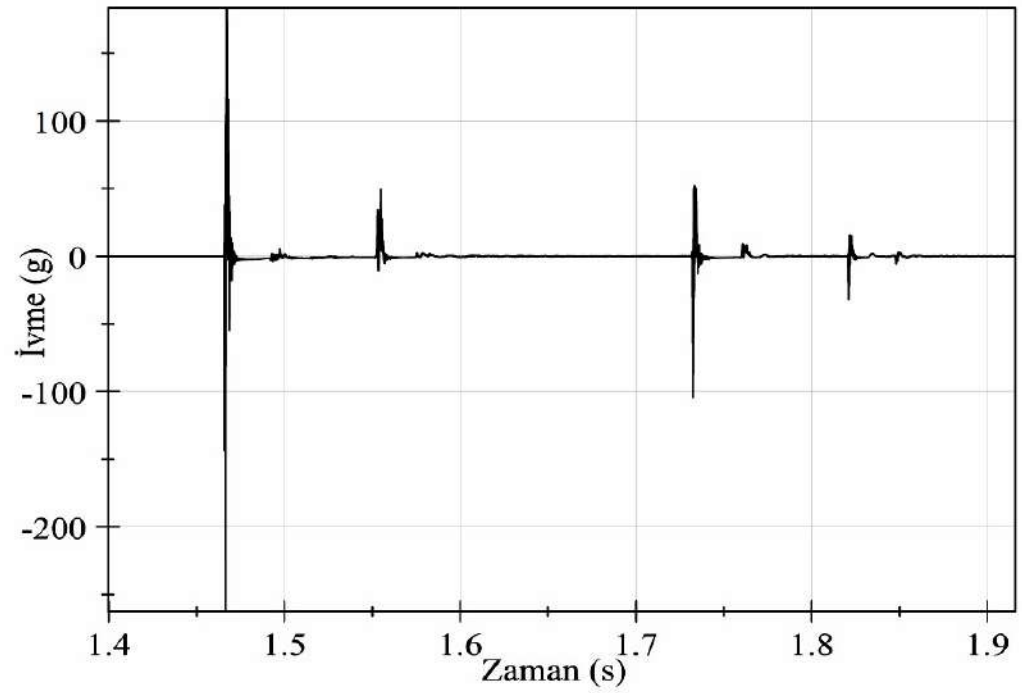


(b)

Şekil 5.7. SC2 Deney elemanının 2. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

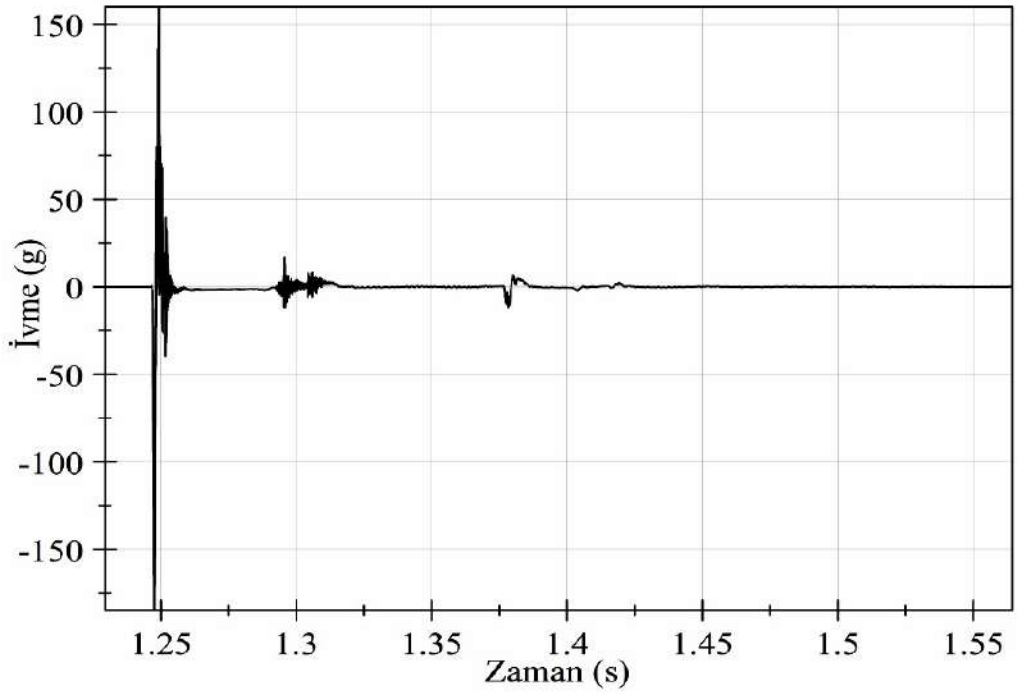


(a)

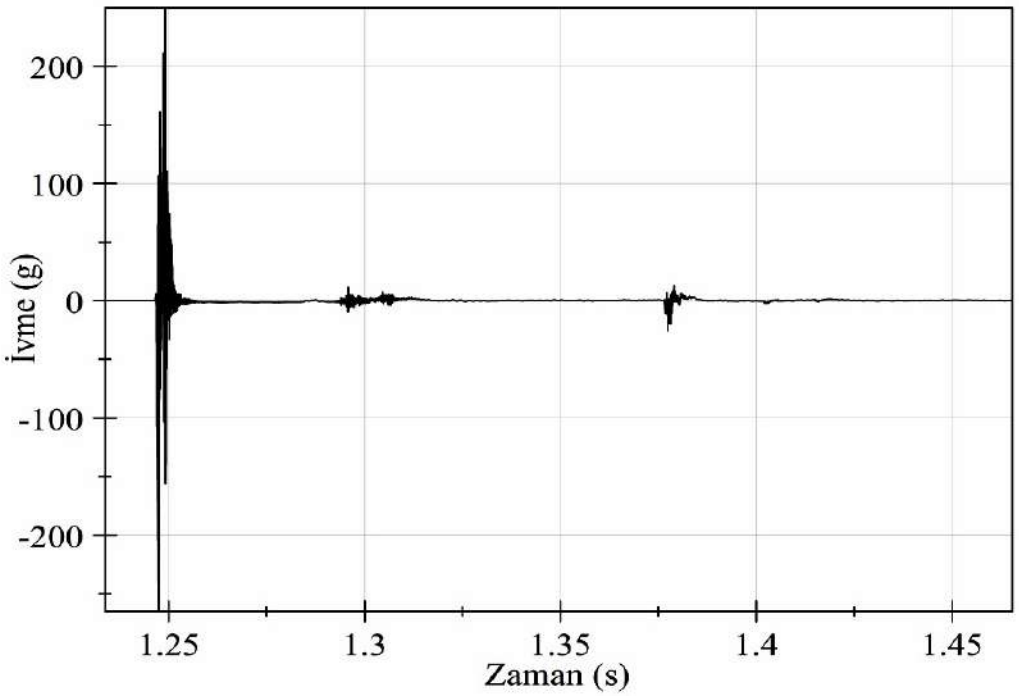


(b)

Şekil 5.8. SC2 Deney elemanın 12. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

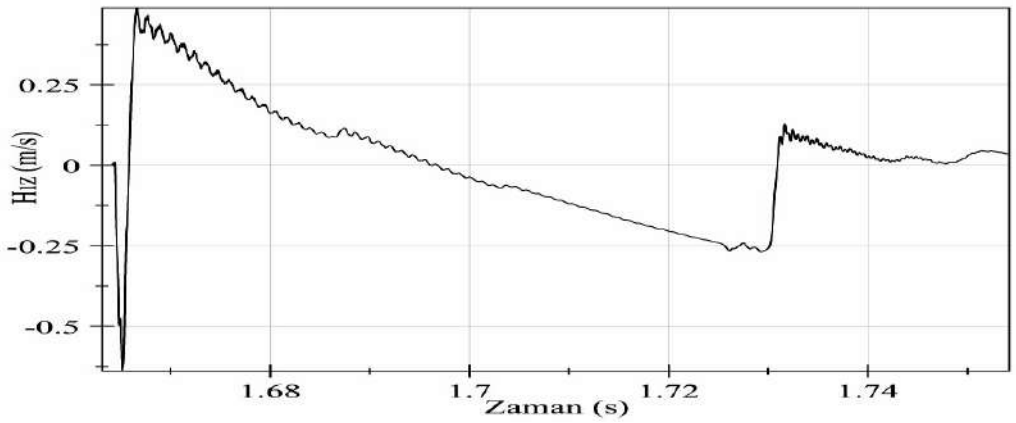


(a)

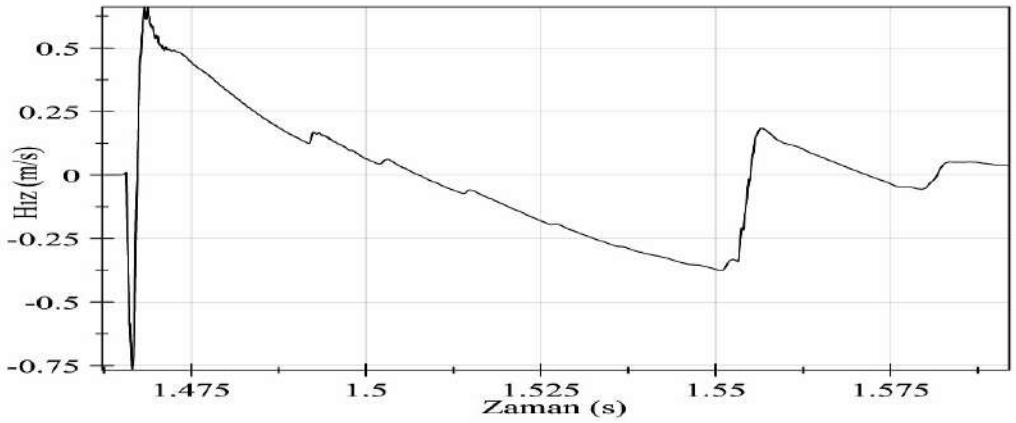


(b)

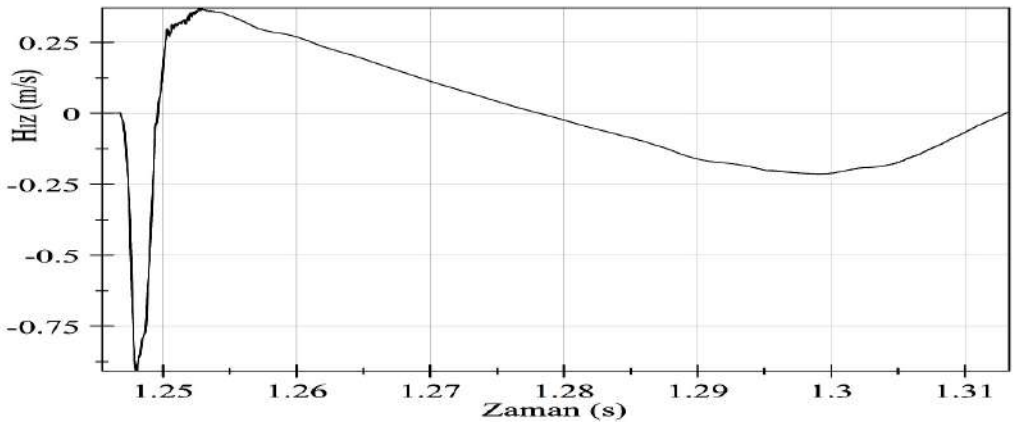
Şekil 5.9. SC2 Deney elemanın 24. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

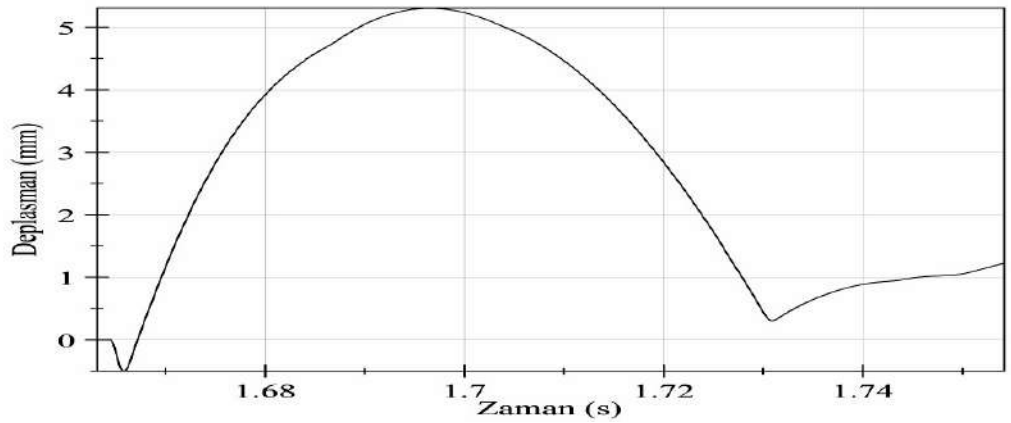


(b)

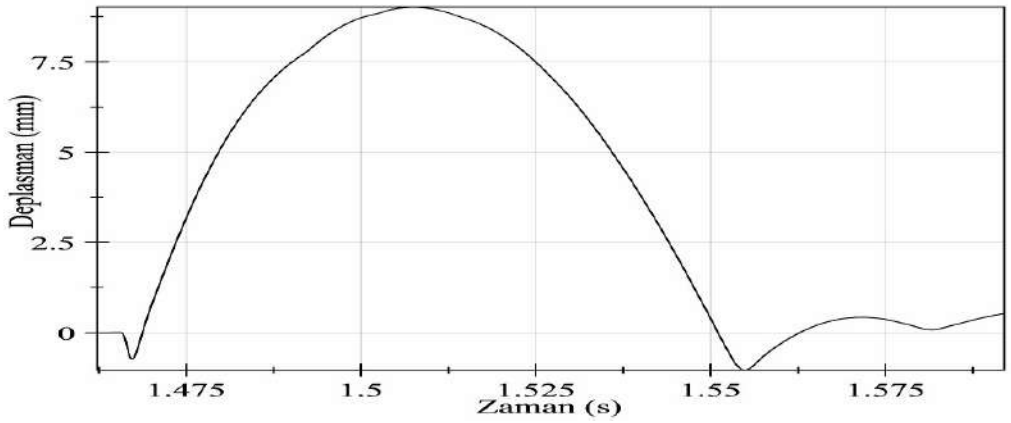


(c)

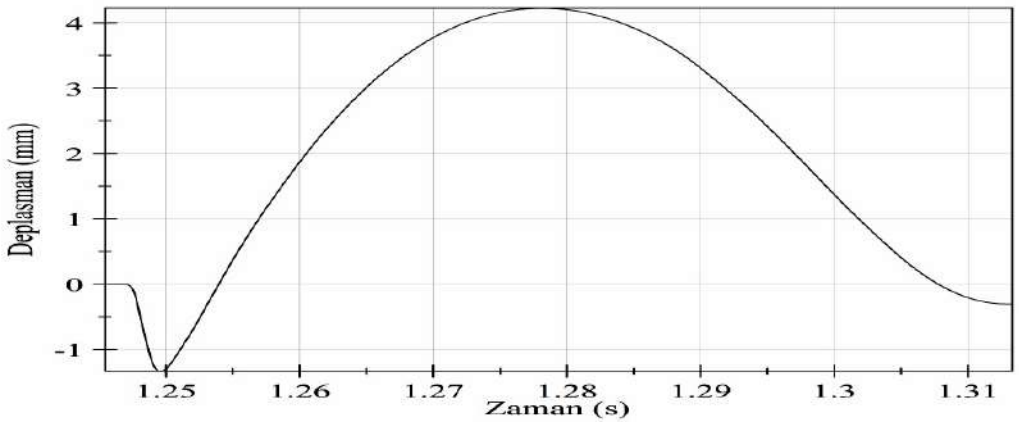
Şekil 5.10. SC2 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 12. düşme c) 24. düşme



(a)

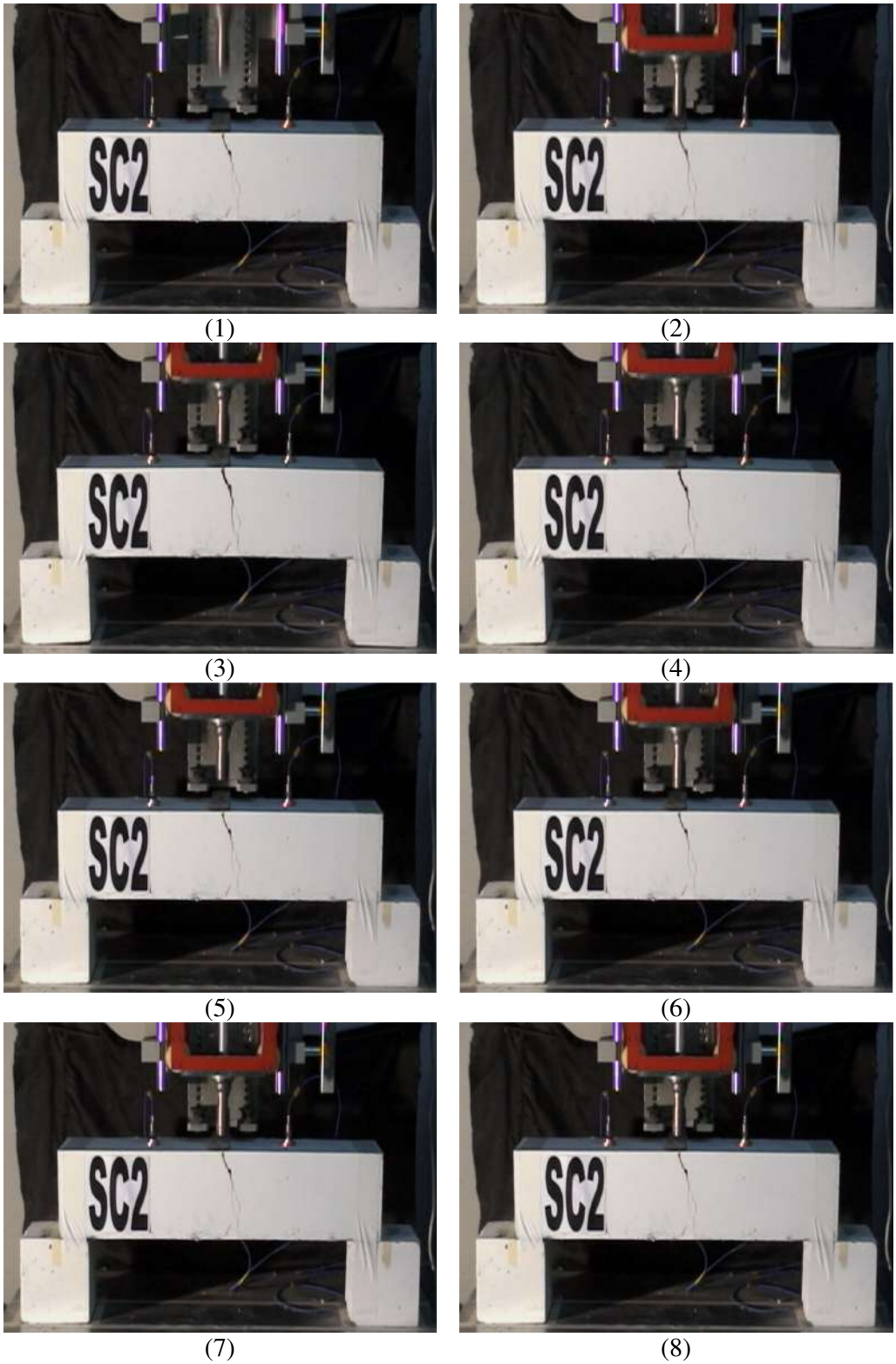


(b)



(c)

Şekil 5.11. SC2 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 12. düşme c) 24. düşme

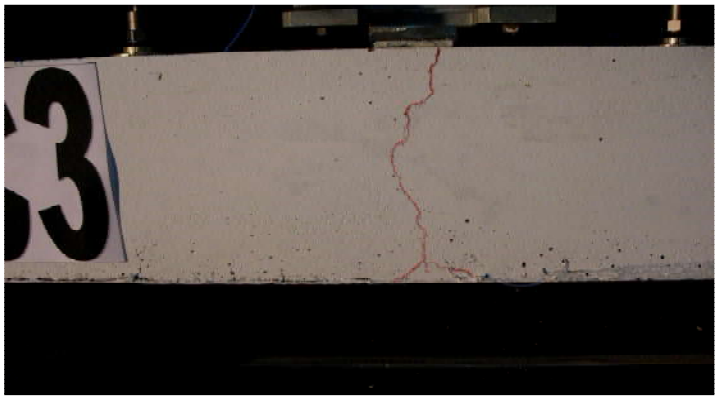


Resim 5.8. SC2 Deney elemanı göçme durumu

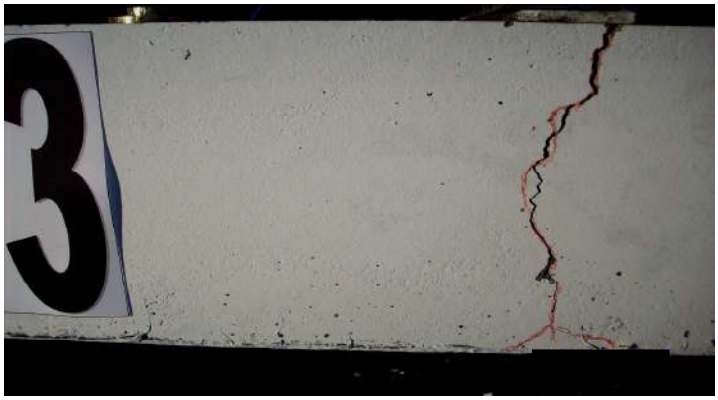
5.4. SC3 Deney Elemanı

Deney elemanı SC3 650 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı normal dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 36 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 445 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 11'inci düşmede almıştır (Resim 5.9). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.10). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.11). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.4'de verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 2. düşme, 11. düşme ve 34. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.12'de verilmiştir.



Resim 5.9. SC3 Elemanında oluşan ilk hasar



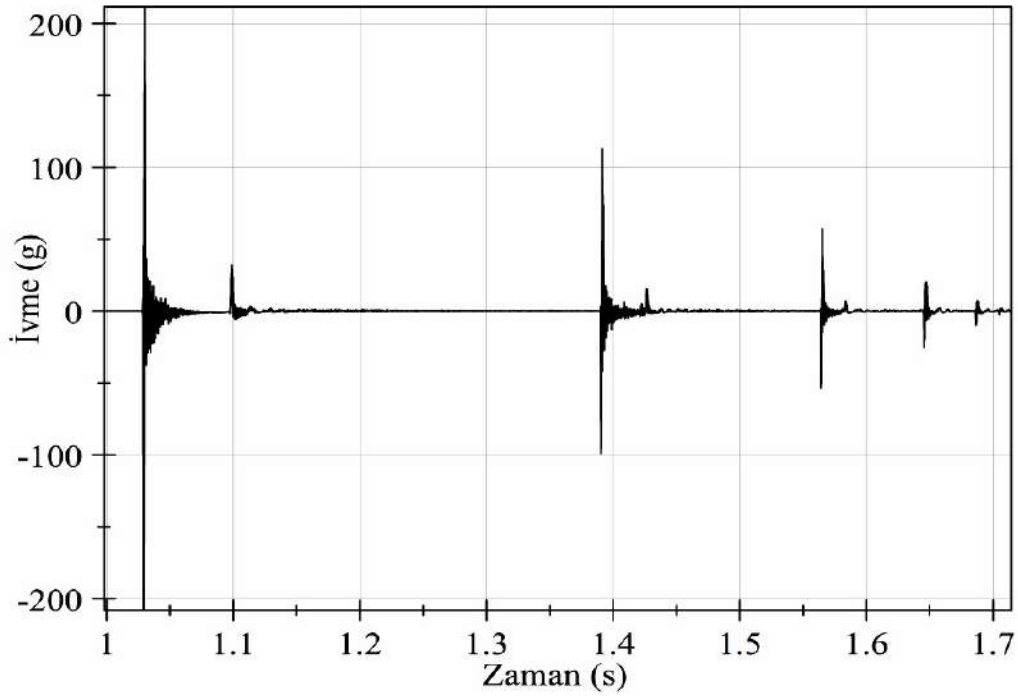
Resim 5.10. SC3 Elemanının göçme durumu



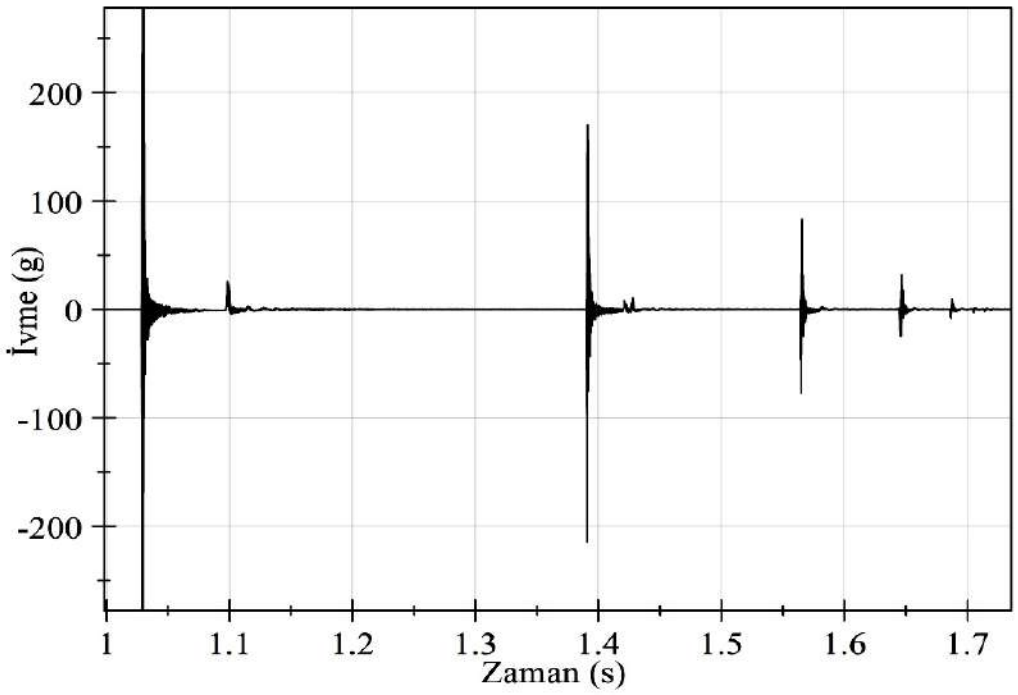
Resim 5.11. SC3 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.4. SC3 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

Eleman	Düşme No	Sol İvme Ölçer		Sağ İvme Ölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC3	1	-192,28	205,37	-235,65	270,19
	2	-212,61	227,95	-275,81	268,23
	3	-208,23	211,53	-276,18	272,76
	4	-194,87	196,04	-245,34	271,63
	5	-197,40	158,15	-253,67	270,92
	6	-176,14	186,71	-251,78	260,87
	7	-160,01	240,28	-276,78	263,27
	8	-162,85	222,17	-270,20	277,01
	9	-171,43	188,83	-274,86	272,74
	10	-172,51	169,55	-224,76	269,75
	11	-170,73	268,45	-245,19	270,07
	12	-181,31	273,00	-270,81	230,88
	13	-168,49	272,08	-264,91	274,17
	14	-167,97	256,13	-218,97	222,23
	15	-190,92	237,02	-196,92	252,98
	16	-180,04	271,15	-233,74	231,35
	17	-167,03	257,08	-211,24	250,00
	18	-184,47	272,43	-194,63	151,95
	19	-183,66	270,85	-221,85	174,41
	20	-192,83	232,93	-228,79	152,89
	21	-190,92	265,12	-277,78	165,65
	22	-197,21	189,49	-222,18	162,23
	23	-176,28	250,18	-221,77	171,56
	24	-213,67	249,76	-250,66	165,73
	25	-183,01	224,07	-225,59	131,58
	26	-179,00	210,83	-232,06	141,17
	27	-219,41	189,84	-222,80	153,12
	28	-221,14	196,92	-223,95	166,76
	29	-184,70	250,84	-202,58	155,47
	30	-193,92	212,17	-265,28	171,79
	31	-220,47	156,22	-189,23	148,50
	32	-197,34	137,14	-219,45	149,89
	33	-179,42	135,30	-210,40	126,61
	34	-215,82	258,47	-232,89	185,75
	35	-171,45	219,57	-200,03	217,20
	36	-155,81	180,76	-139,24	173,63

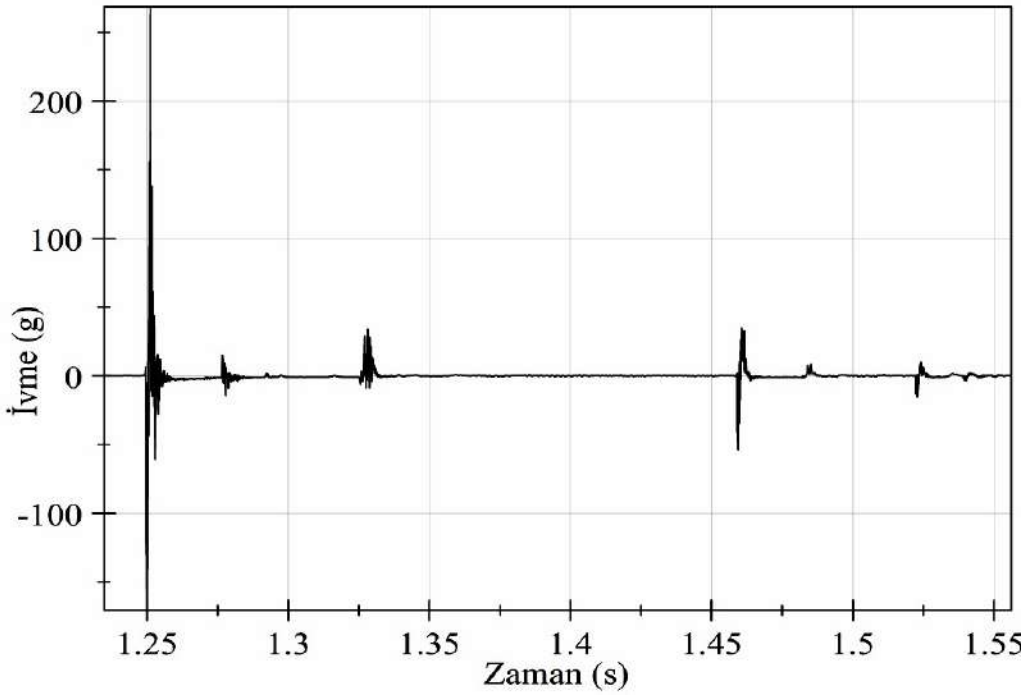


(a)

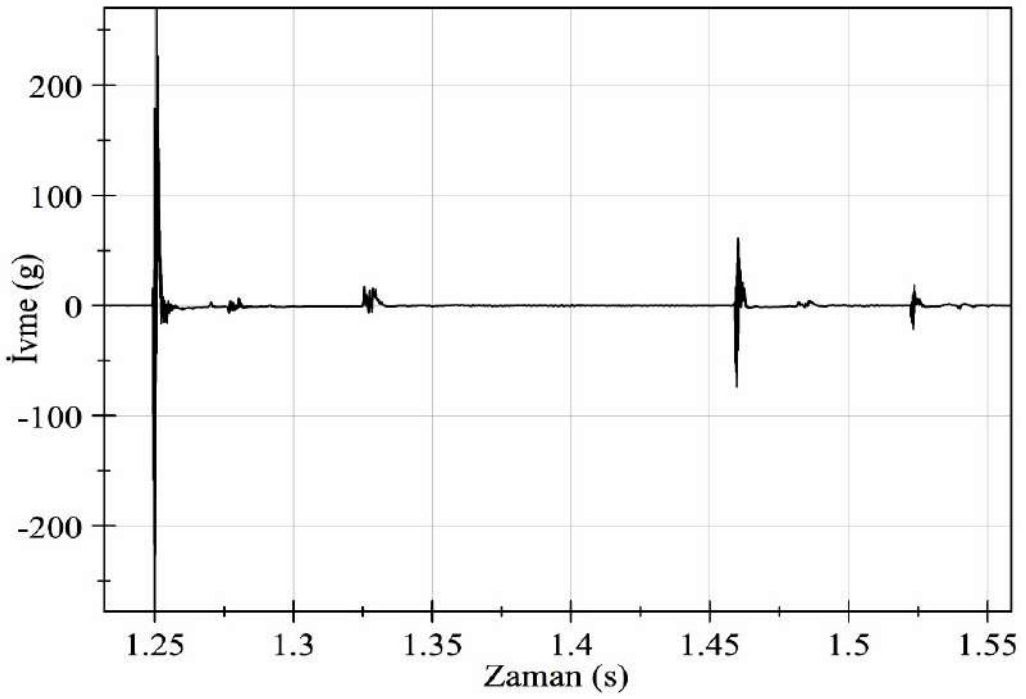


(b)

Şekil 5.12. SC3 Deney elemanının 2. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

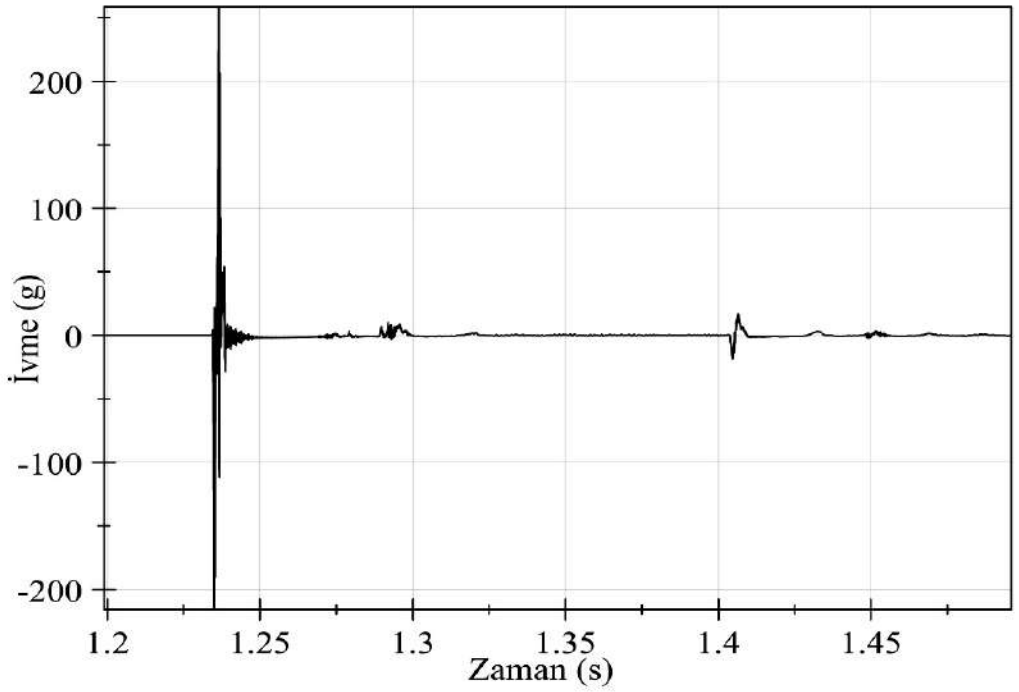


(a)

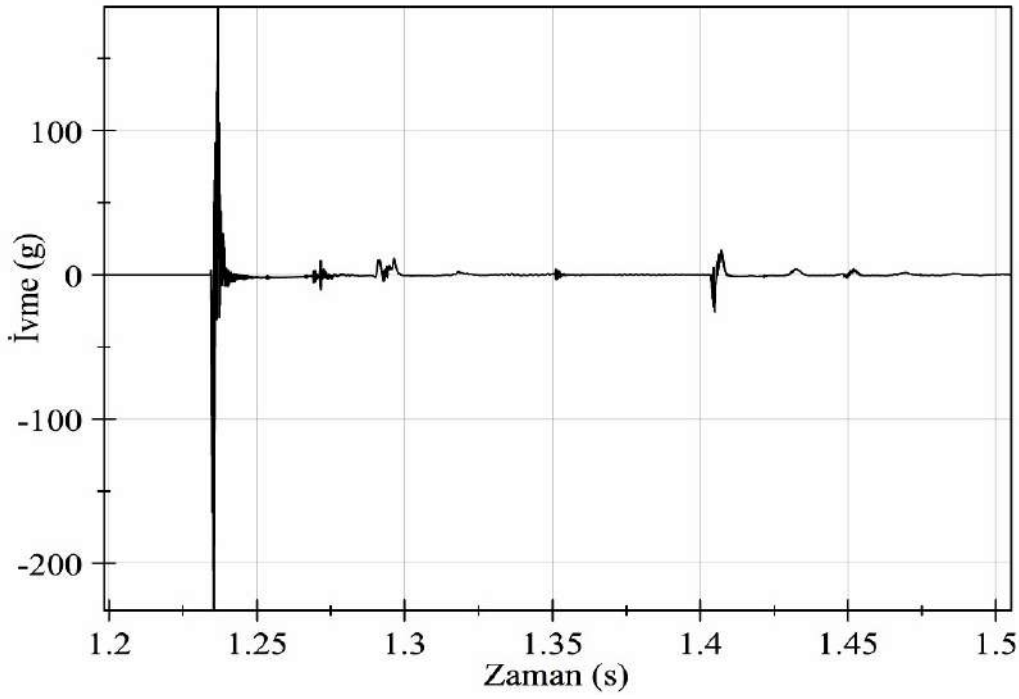


(b)

Şekil 5.13. SC3 Deney elemanın 11. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

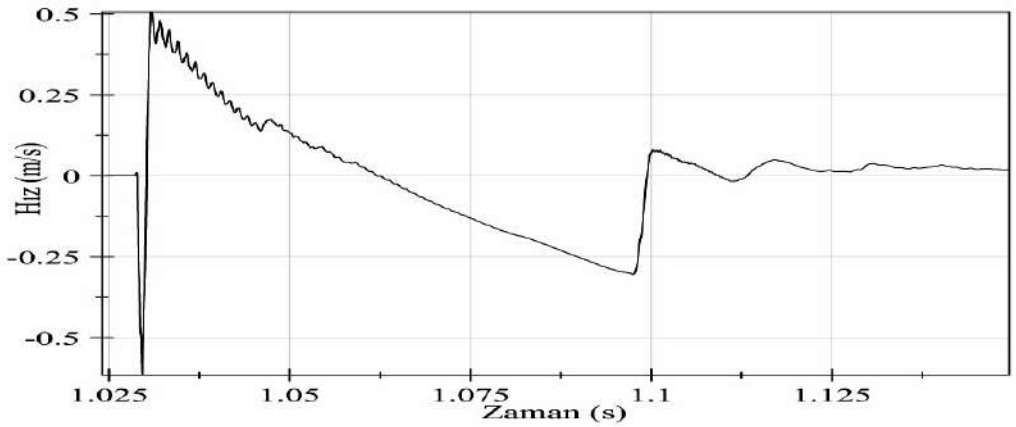


(a)

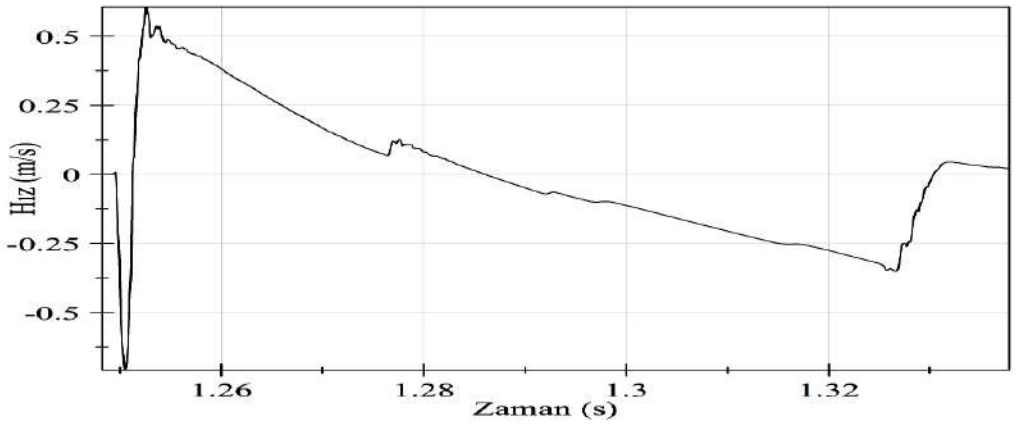


(b)

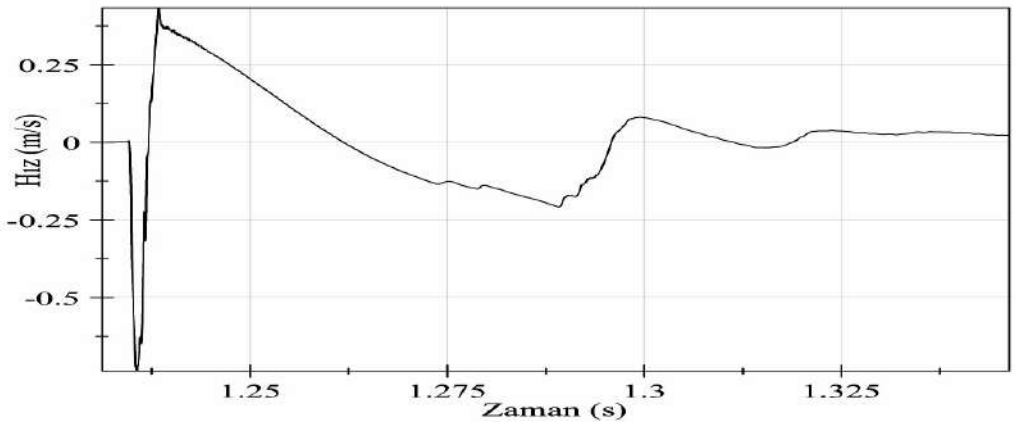
Şekil 5.14. SC3 Deney elemanın 34. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

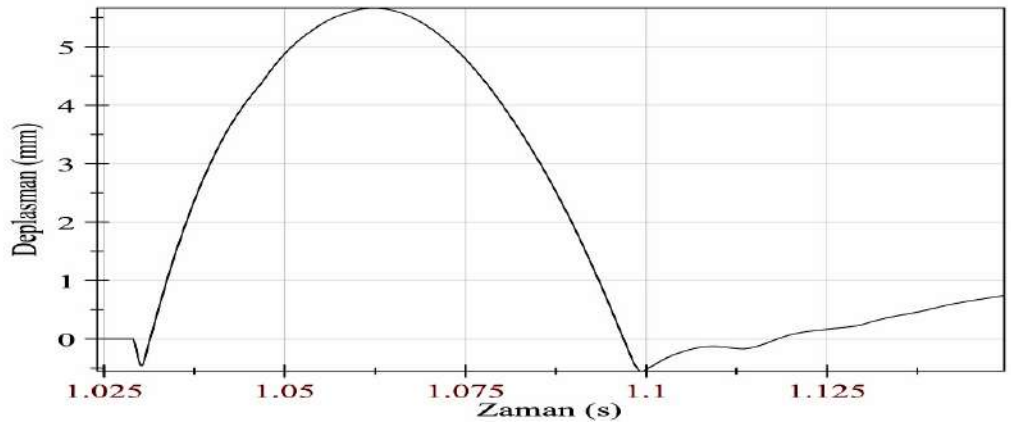


(b)

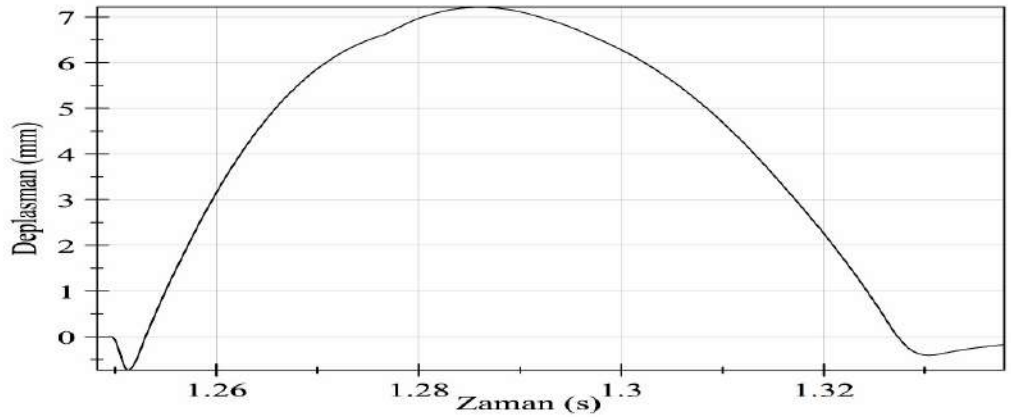


(c)

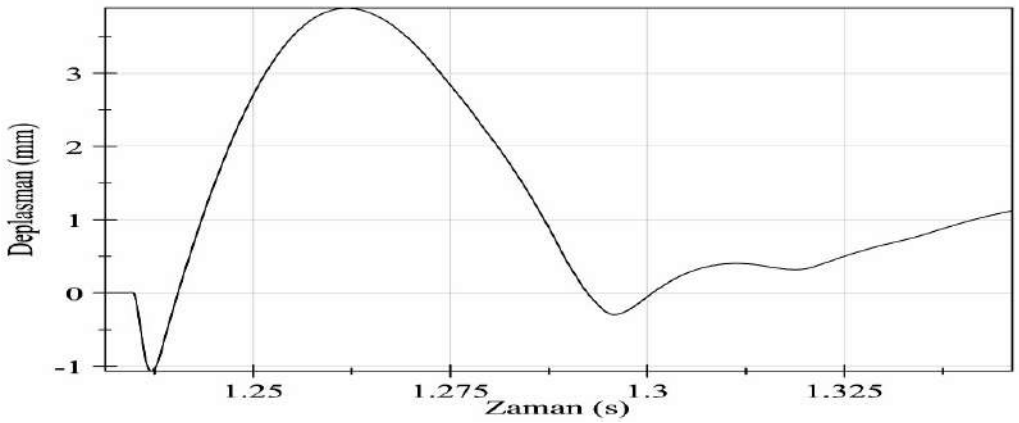
Şekil 5.15. SC3 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a)2. düşme b) 11. düşme c) 34. düşme



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.16. SC3 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 11. düşme c) 34. düşme

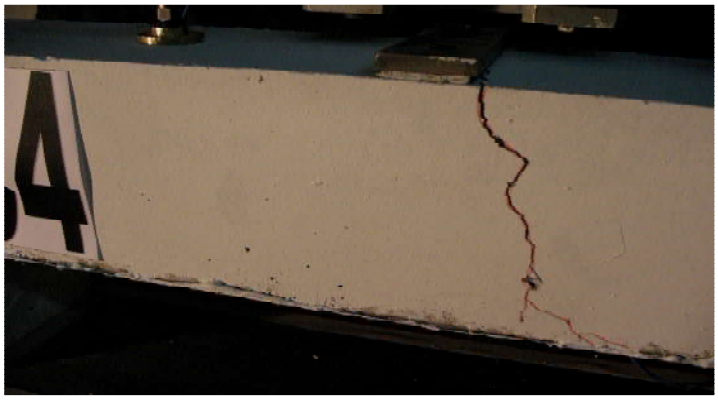


Resim 5.12. SC3 Deney elemanı göçme durumu

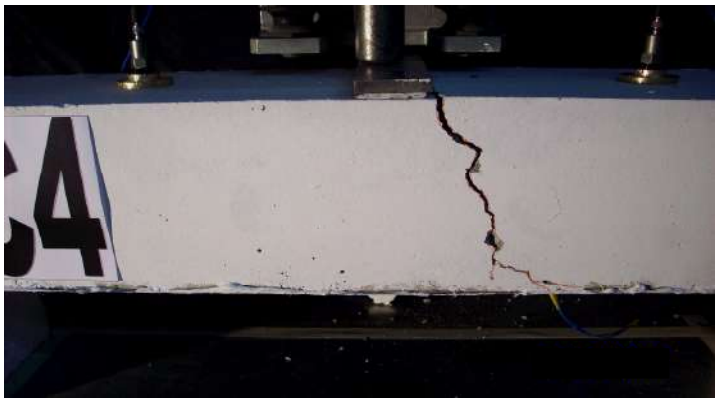
5.5. SC4 Deney Elemanı

Deney elemanı SC4 600 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı normal dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 29 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 419 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 20'inci düşmede almıştır (Resim 5.13). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.14). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.15). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.5'de verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 4. düşme, 20. düşme ve 29. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20, Şekil 5.21). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.16'de verilmiştir.



Resim 5.13. SC4 Elemanında oluşan ilk hasar



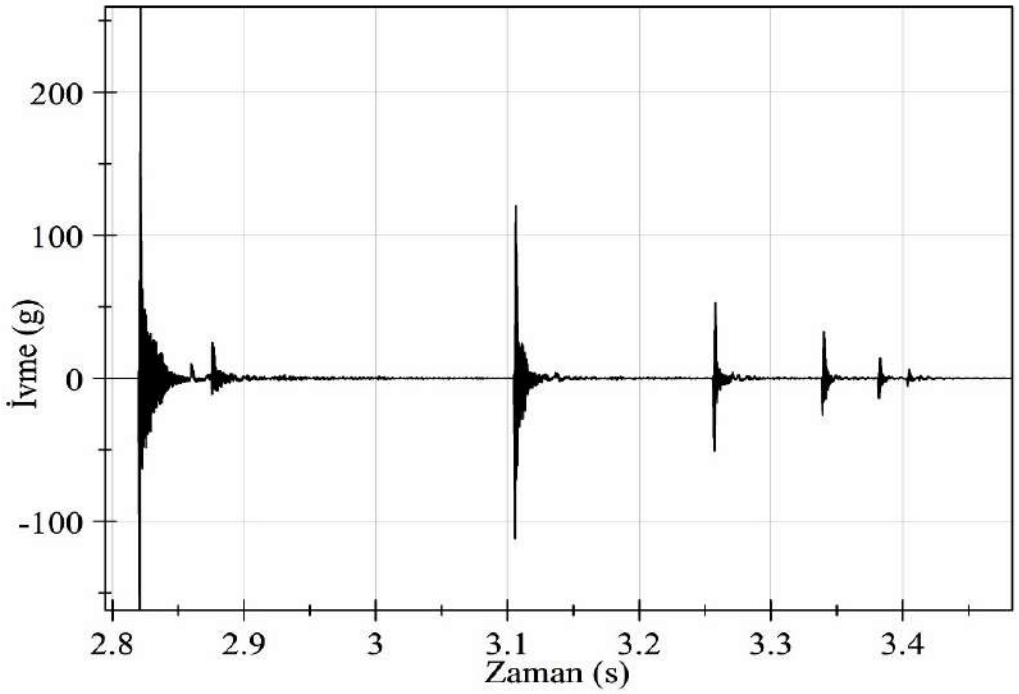
Resim 5.14. SC4 Elemanının göçme durumu



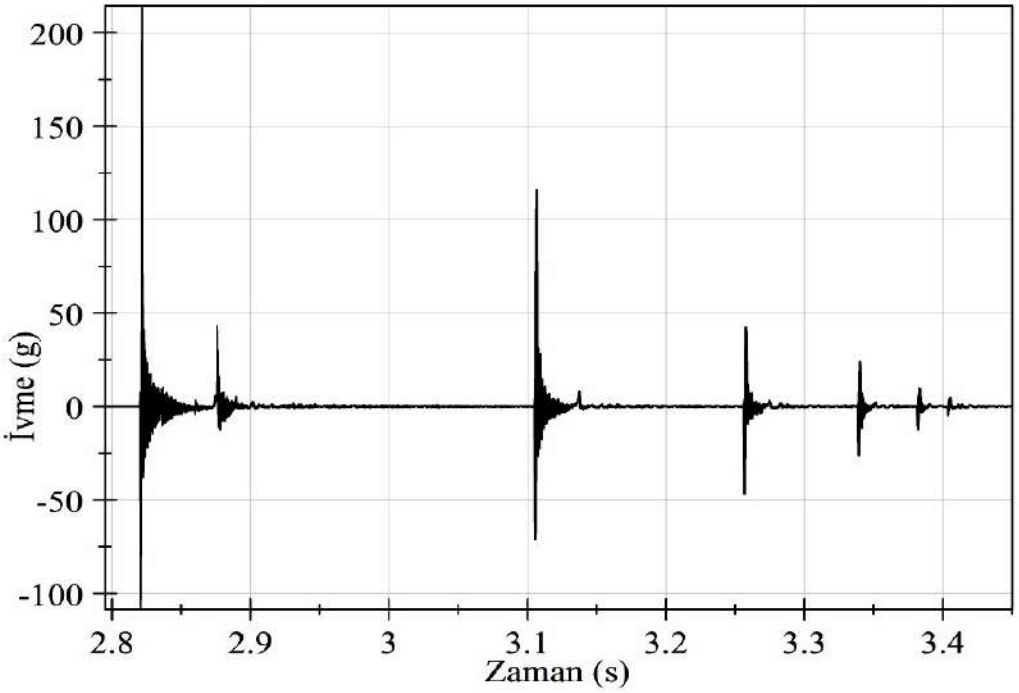
Resim 5.15. SC4 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.5. SC4 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

Eleman	Düşme No	Sol İvme Ölçer		Sağ İvme Ölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC4	1	-174,12	217,77	-119,97	164,00
	2	-171,98	222,08	-116,05	190,49
	3	-172,23	253,00	-114,11	197,49
	4	-162,34	259,65	-108,64	214,32
	5	-158,39	268,12	-108,20	219,27
	6	-167,44	272,04	-119,61	254,05
	7	-171,40	271,55	-130,54	255,88
	8	-180,21	270,13	-128,57	226,12
	9	-160,39	237,86	-120,91	237,86
	10	-161,11	269,14	-136,18	255,09
	11	-180,61	250,56	-160,59	261,17
	12	-180,06	240,23	-169,33	223,14
	13	-192,09	271,76	-167,94	254,42
	14	-205,50	232,38	-167,24	270,09
	15	-159,68	271,19	-171,49	206,74
	16	-206,25	272,98	-221,74	273,95
	17	-207,39	271,59	-207,78	200,52
	18	-205,14	268,90	-217,34	202,16
	19	-204,38	252,18	-212,32	206,11
	20	-169,81	218,32	-219,65	207,25
	21	-196,12	203,15	-207,06	271,96
	22	-194,58	245,23	-202,19	219,09
	23	-188,56	271,01	-272,71	222,89
	24	-181,60	263,94	-270,19	251,18
	25	-174,95	234,57	-234,23	276,05
	26	-187,63	262,69	-277,53	275,87
	27	-185,42	201,87	-205,47	278,06
	28	-192,42	232,19	-218,92	278,09
	29	-187,09	273,00	-277,71	278,01

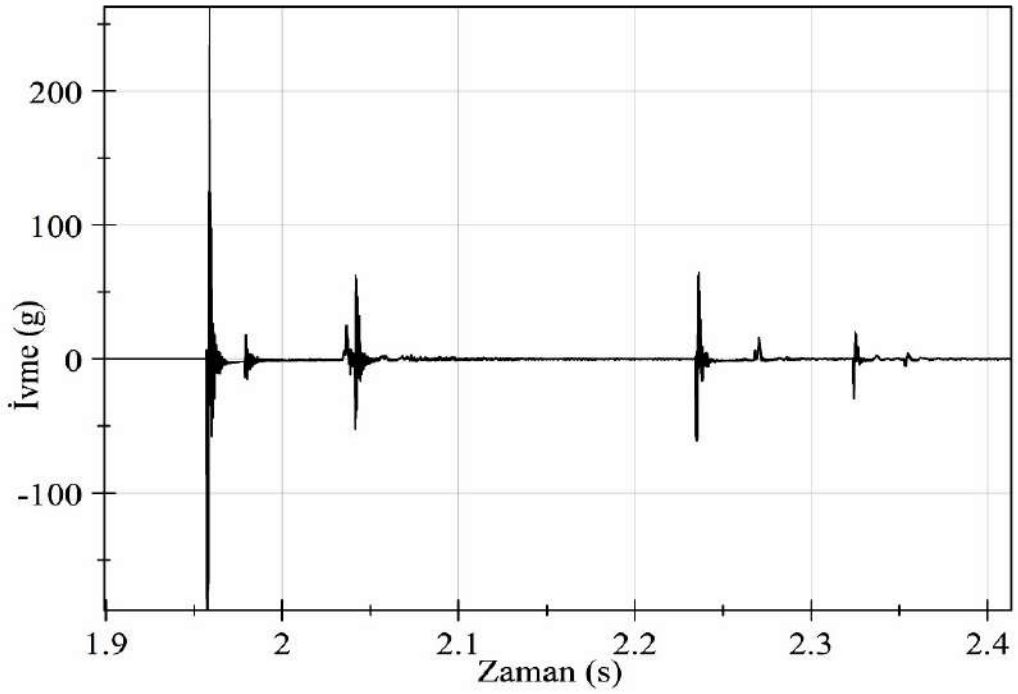


(a)

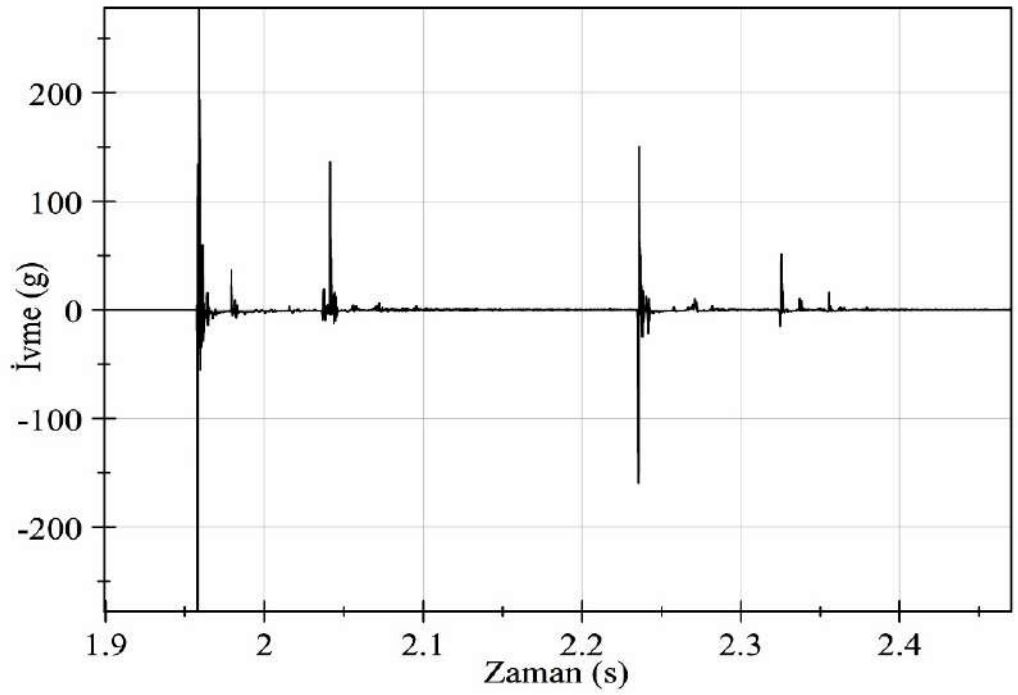


(b)

Şekil 5.17. SC4 Deney elemanının 4. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

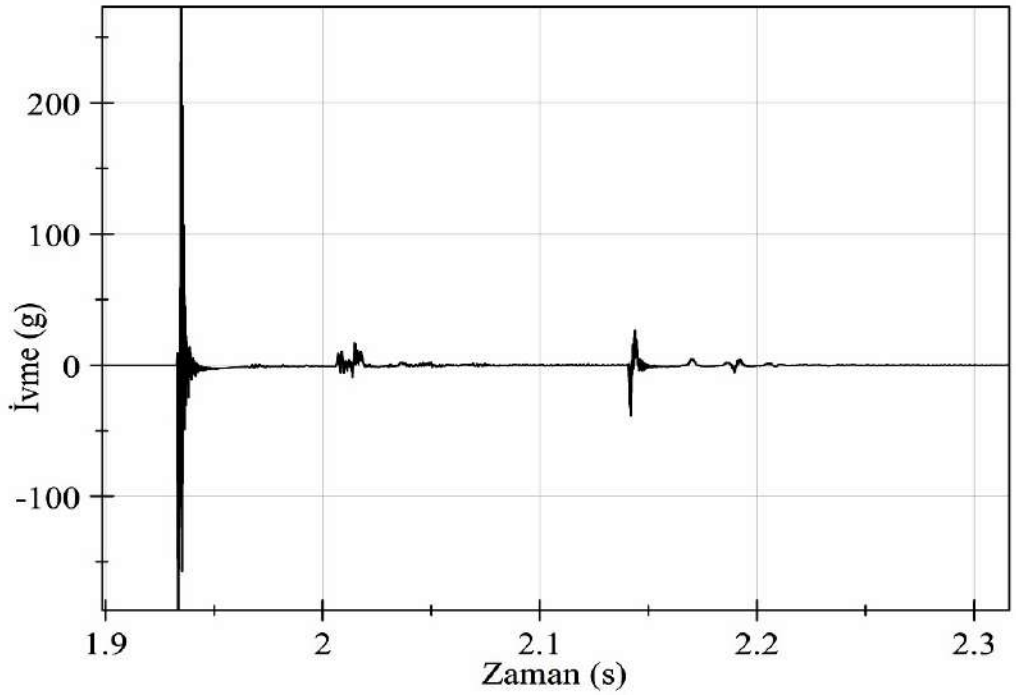


(a)

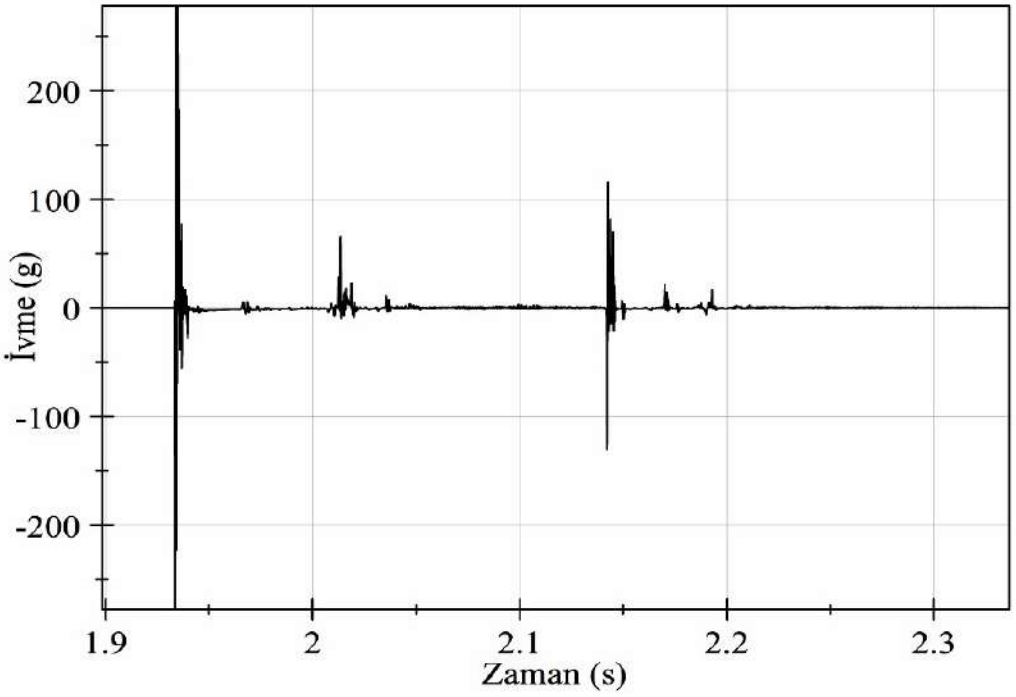


(b)

Şekil 5.18. SC4 Deney elemanın 20. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

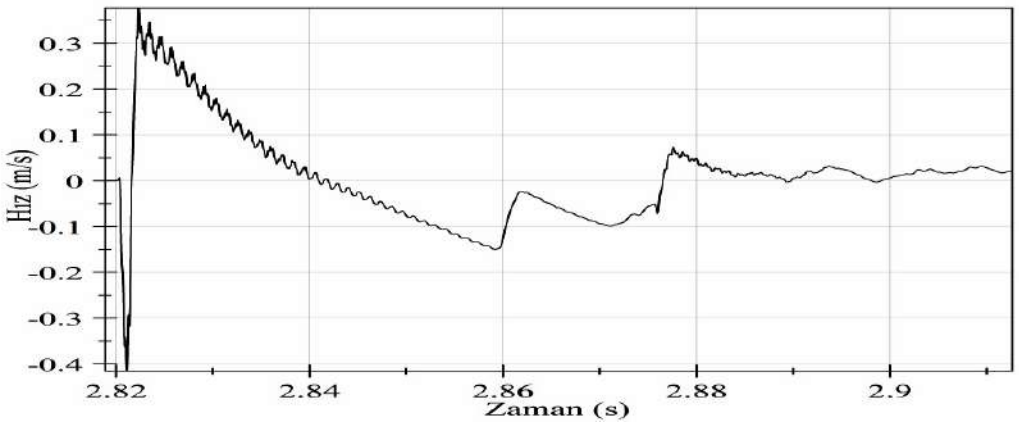


(a)

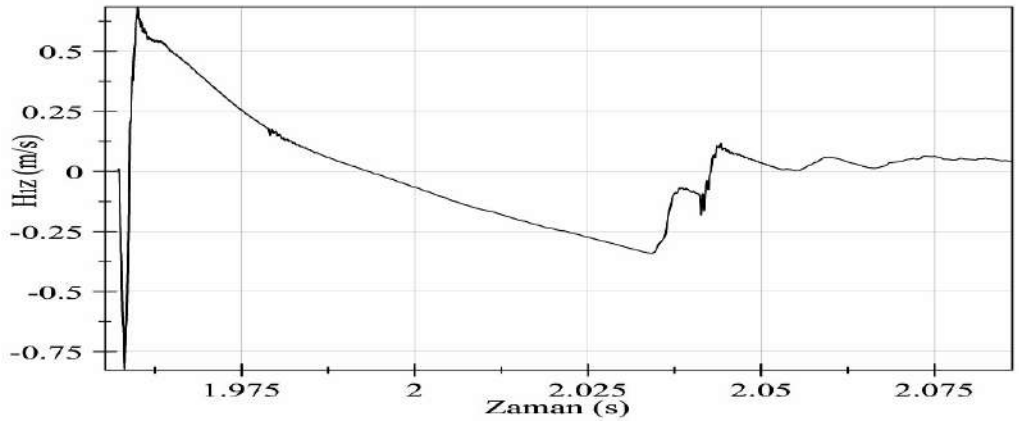


(b)

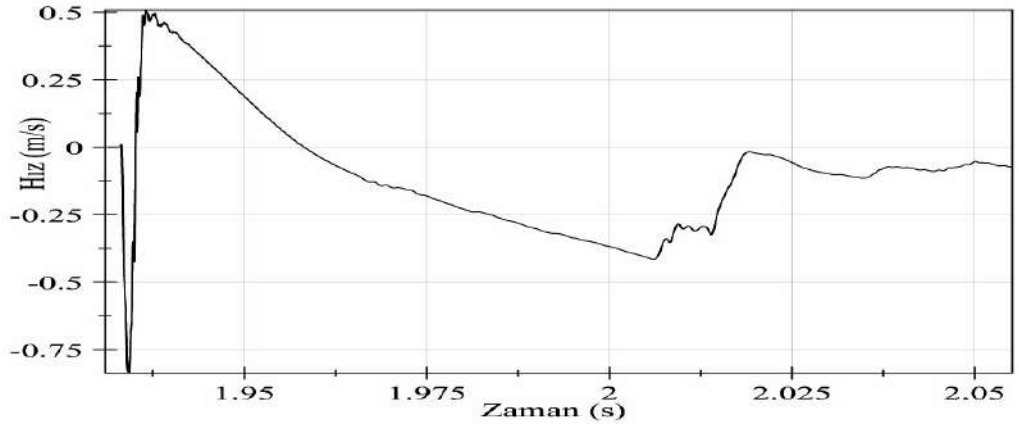
Şekil 5.19. SC4 Deney elemanın 29. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

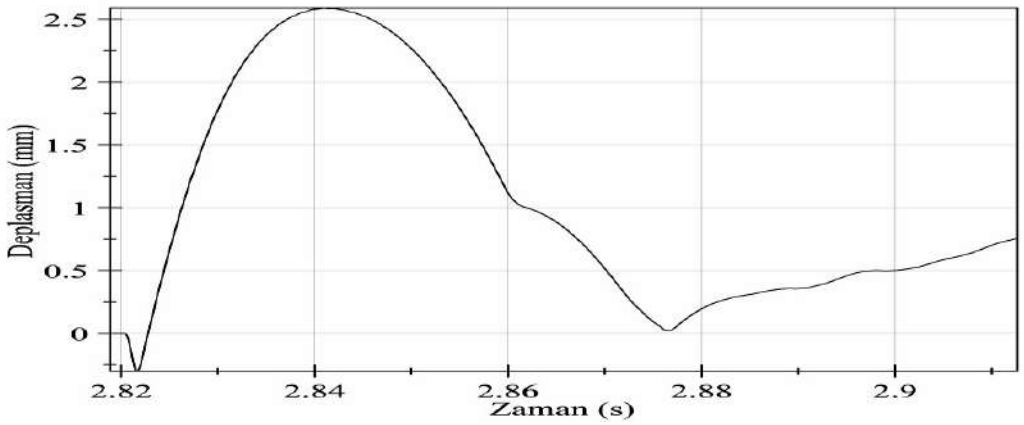


(b)

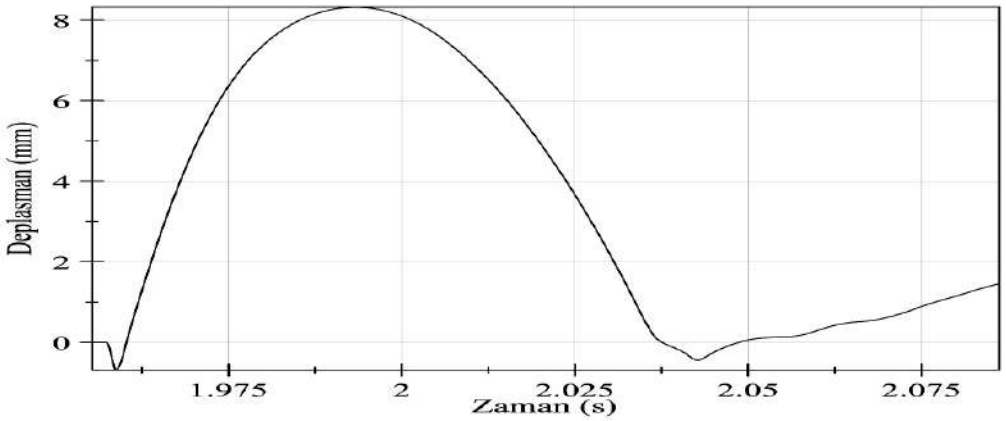


(c)

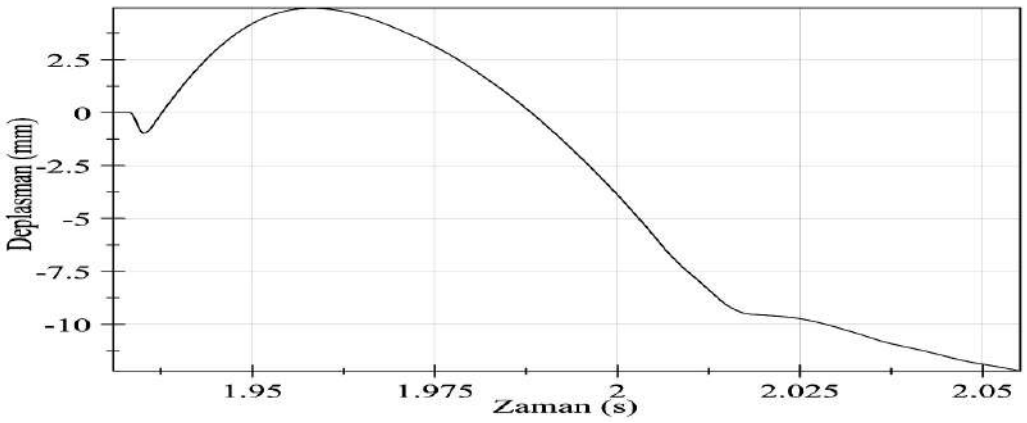
Şekil 5.20. SC4 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a)4. düşme b) 20. düşme c) 29. düşme



(a)

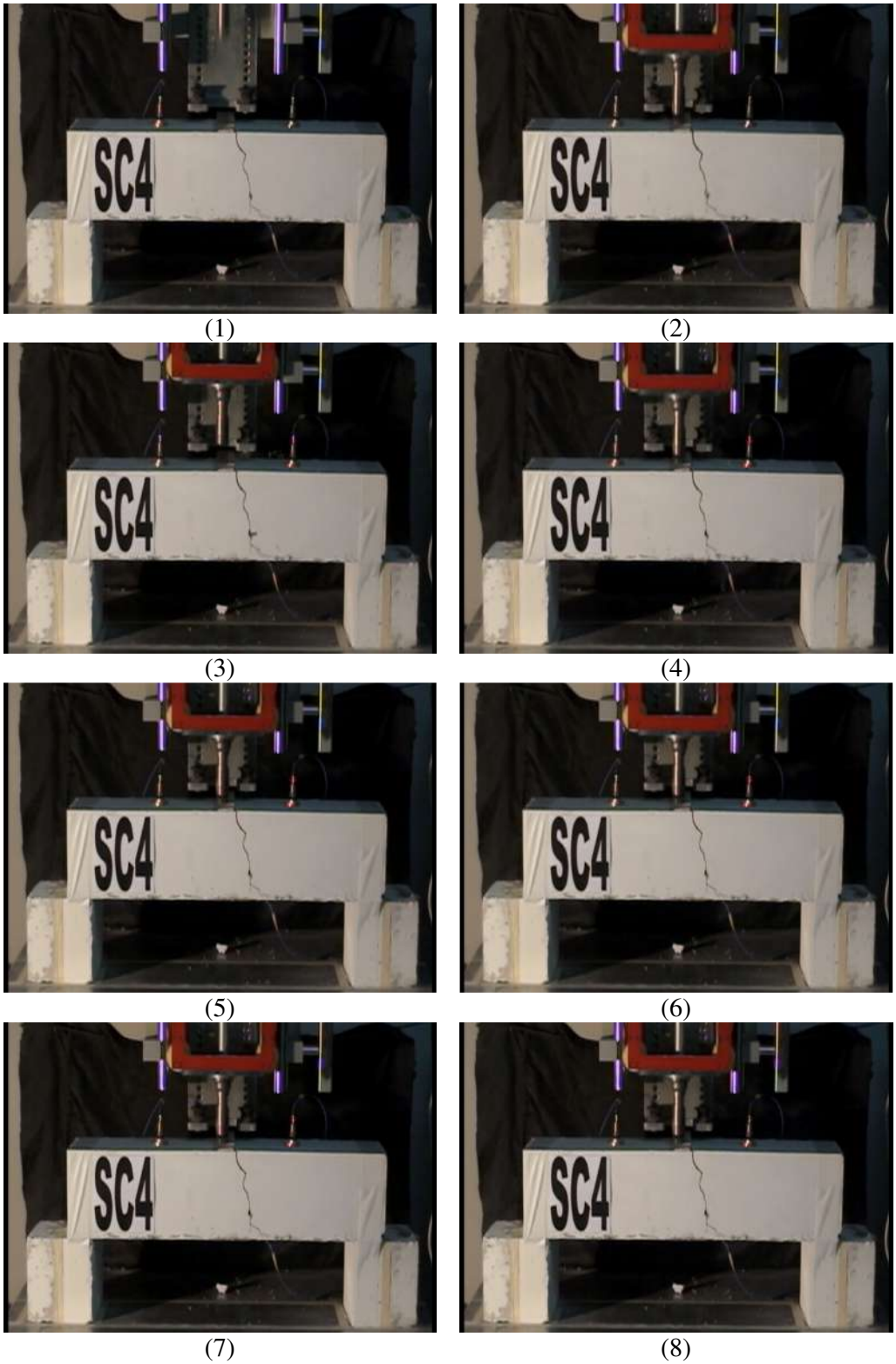


(b)



(c)

Şekil 5.21. SC4 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a)4. düşme b) 20. düşme c) 29. düşme



Resim 5.16. SC4 Deney elemanı göçme durumu

5.6. SC5 Deney Elemanı

Deney elemanı SC5 550 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı normal dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 44 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 393 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 36'ıncı düşmede almıştır (Resim 5.17). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.18). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.19). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.6'de verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 1. düşme, 36. düşme ve 42. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.20'de verilmiştir.



Resim 5.17. SC5 Elemanında oluşan ilk hasar



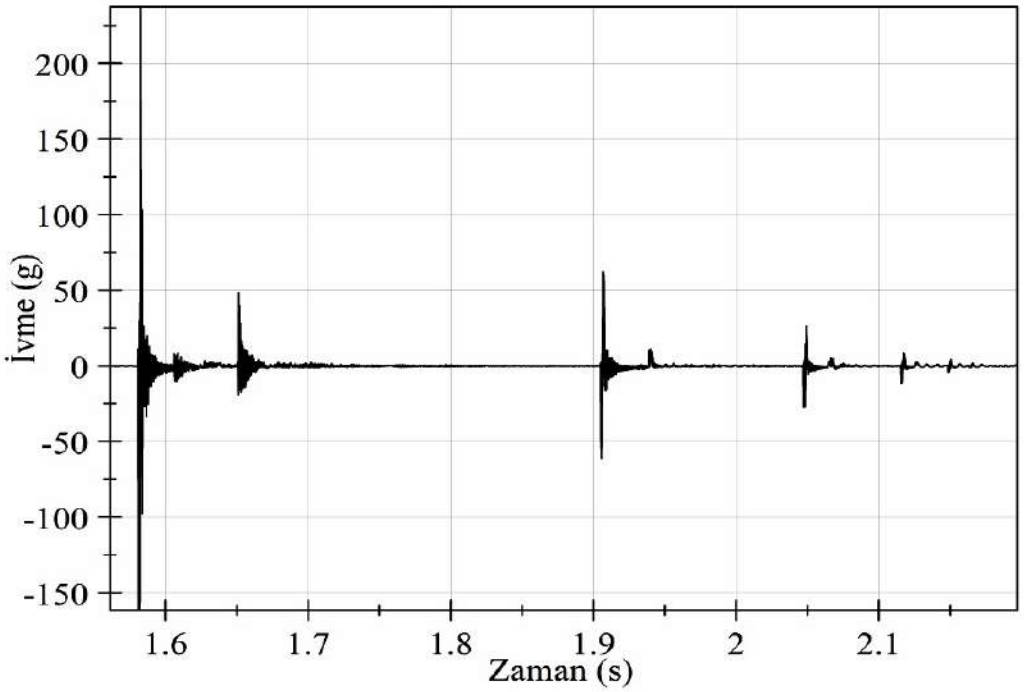
Resim 5.18. SC5 Elemanının göçme durumu



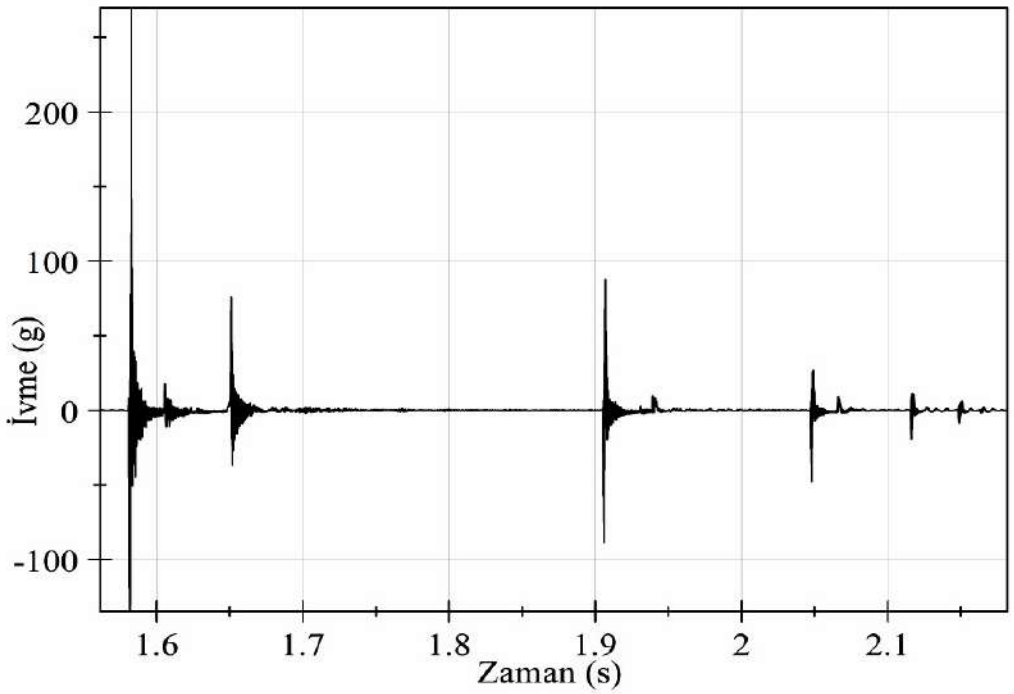
Resim 5.19. SC5 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.6. SC5 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

Eleman	Düşme No	Sol İvme Ölçer		Sağ İvme Ölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC5	1	-156,55	236,39	-140,61	270,67
	2	-133,72	166,22	-129,90	177,55
	3	-153,87	174,33	-151,72	161,98
	4	-151,59	191,41	-148,69	171,81
	5	-140,33	180,20	-139,95	166,47
	6	-108,58	159,69	-104,72	163,16
	7	-144,95	188,74	-139,96	167,21
	8	-119,28	190,63	-127,01	144,59
	9	-154,15	220,22	-147,28	162,69
	10	-120,11	172,22	-126,58	145,30
	11	-152,22	151,81	-141,39	177,50
	12	-132,71	184,42	-131,88	173,52
	13	-129,87	192,67	-131,38	139,82
	14	-120,94	217,27	-118,01	134,34
	15	-145,92	151,40	-140,53	169,92
	16	-112,63	141,12	-98,75	161,07
	17	-111,93	165,26	-98,43	135,10
	18	-149,10	190,87	-142,17	145,88
	19	-148,71	180,10	-143,28	135,85
	20	-113,82	171,11	-120,07	152,92
	21	-129,35	184,33	-115,15	160,03
	22	-135,20	152,49	-123,49	156,13
	23	-125,29	160,88	-115,87	162,08
	24	-127,44	133,89	-120,39	147,65
	25	-115,75	124,56	-124,56	135,17
	26	-181,43	209,68	-160,21	159,25
	27	-167,57	168,80	-137,11	180,24
	28	-171,53	159,03	-135,45	175,88
	29	-174,87	149,74	-136,40	182,44
	30	-139,59	188,98	-129,46	192,60
	31	-162,97	177,95	-132,71	126,32
	32	-161,75	237,30	-134,84	269,71
	33	-190,93	187,92	-148,71	158,40
	34	-177,01	170,55	-130,76	169,18
	35	-166,41	180,67	-142,34	187,14
	36	-138,23	273,00	-158,65	246,84
	37	-231,40	192,18	-164,23	232,45
	38	-188,91	205,38	-149,04	219,10
	39	-197,90	190,13	-240,35	208,23
	40	-169,19	189,55	-175,72	218,35
	41	-158,81	171,38	-161,77	197,02
	42	-272,92	273,00	-277,78	278,09
	43	-168,65	169,17	-167,19	160,12
	44	-200,86	195,23	-170,13	179,09

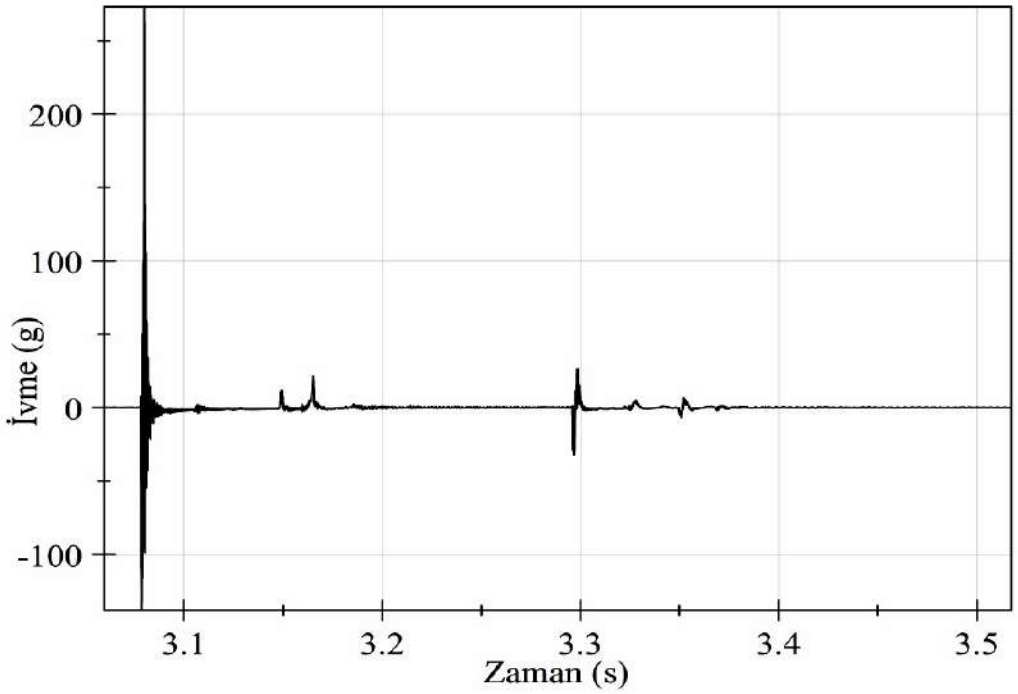


(a)

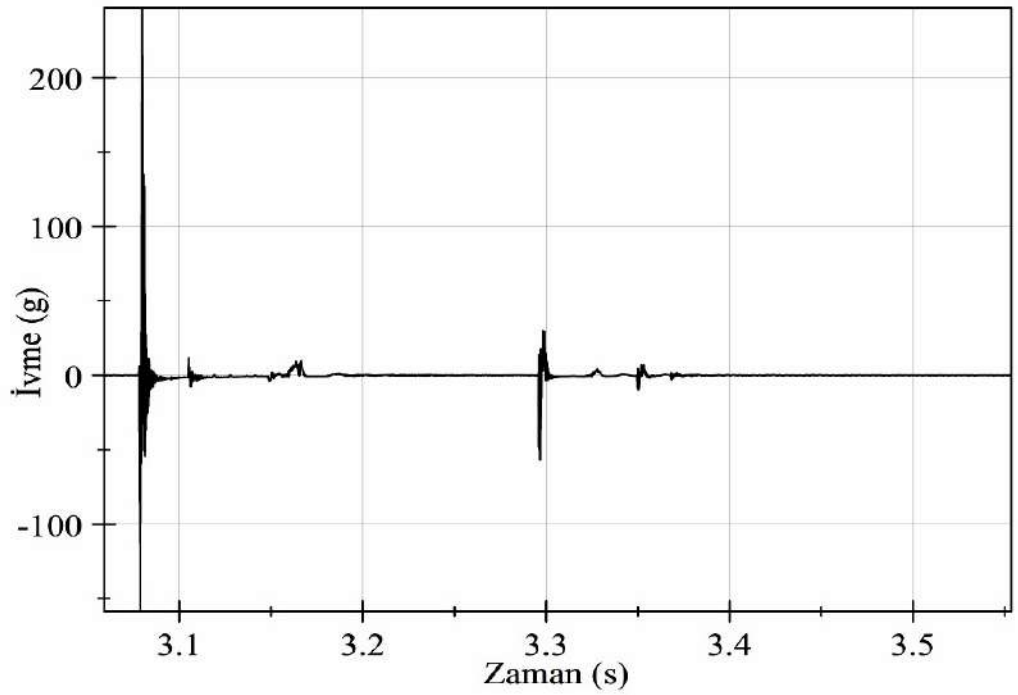


(b)

Şekil 5.22. SC5 Deney elemanının 1. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

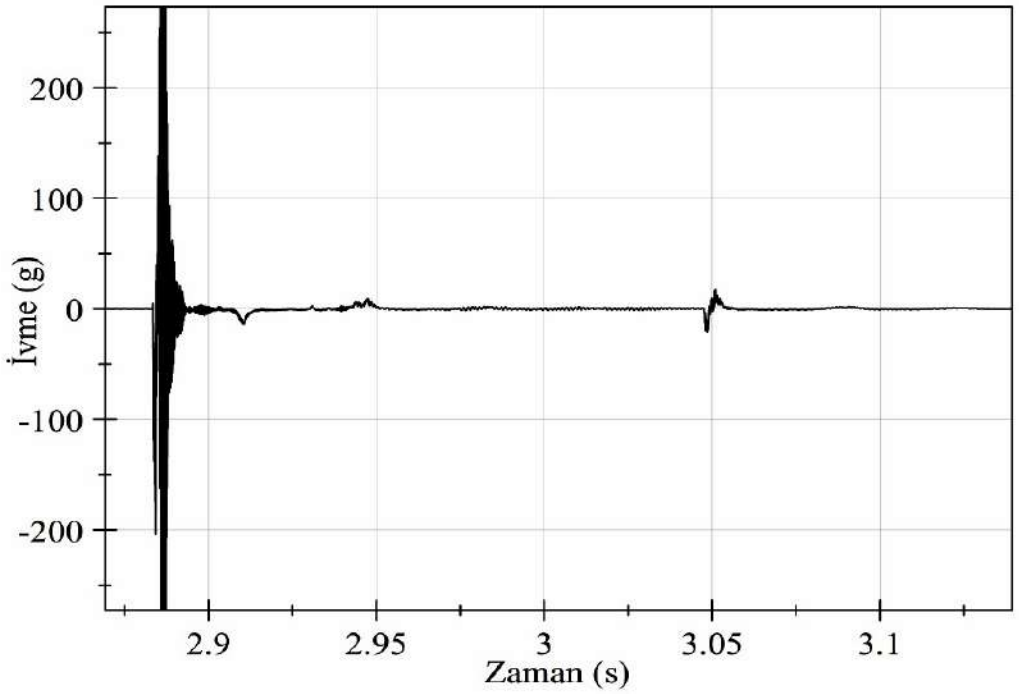


(a)

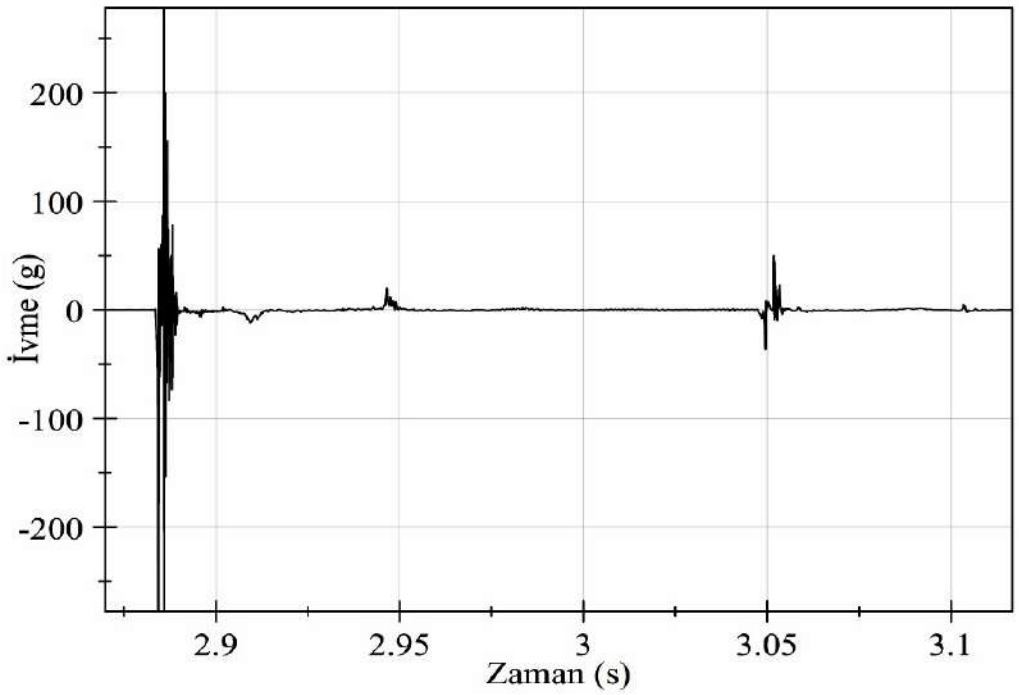


(b)

Şekil 5.23. SC5 Deney elemanın 36. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

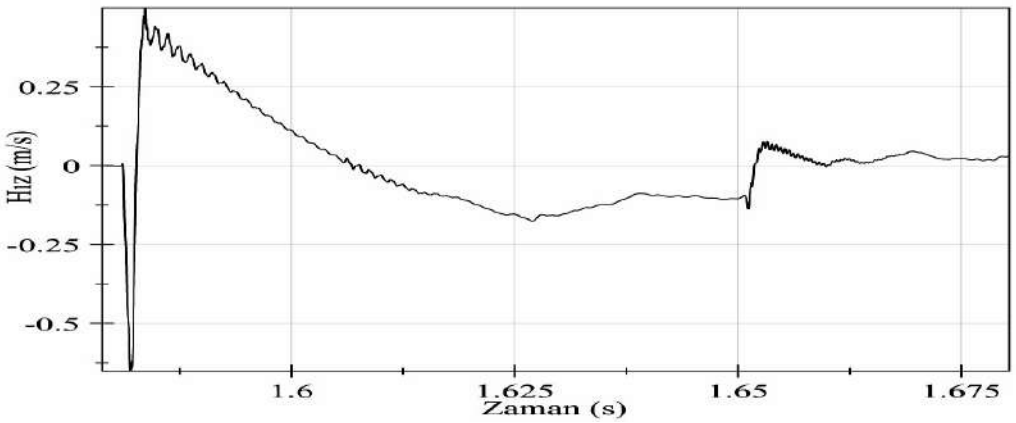


(a)

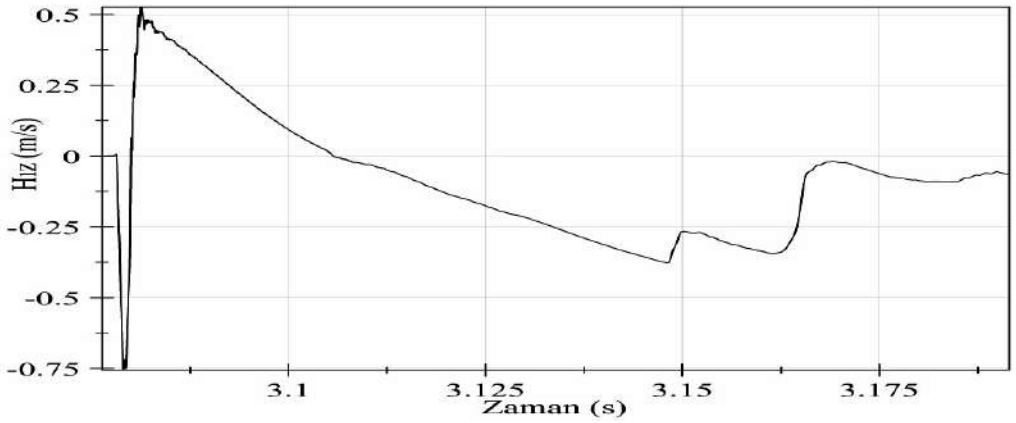


(b)

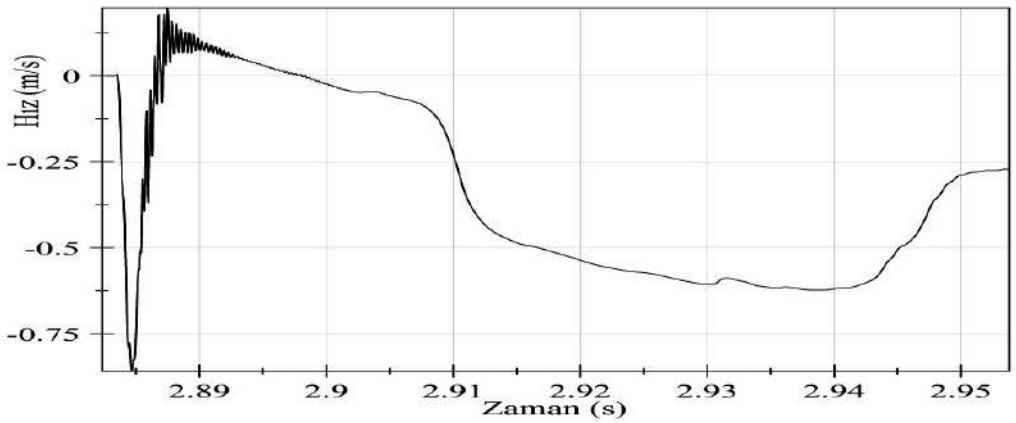
Şekil 5.24. SC5 Deney elemanın 42. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

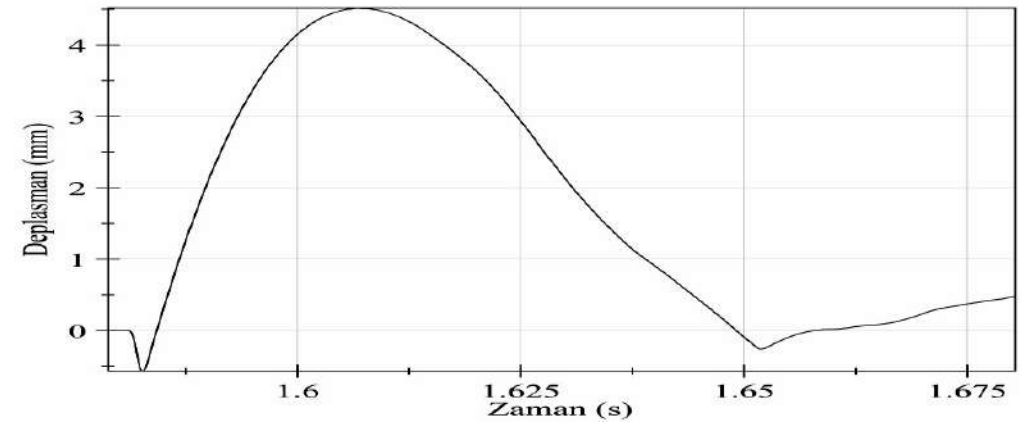


(b)

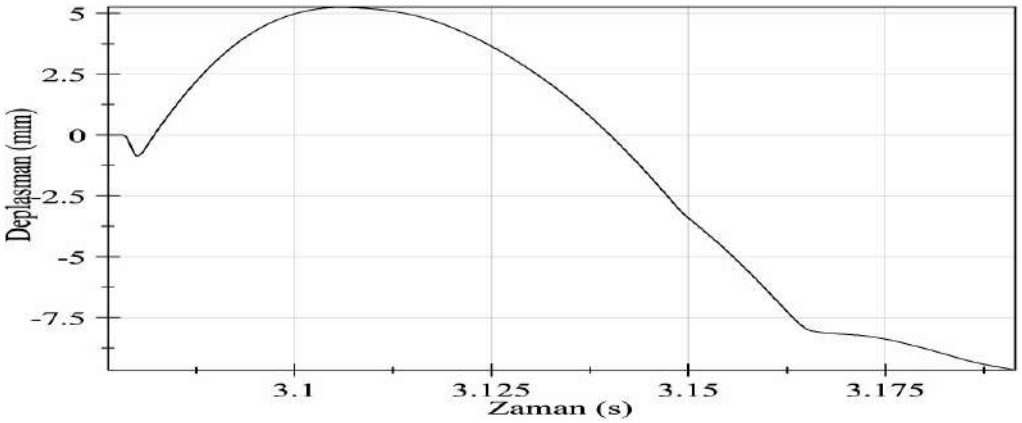


(c)

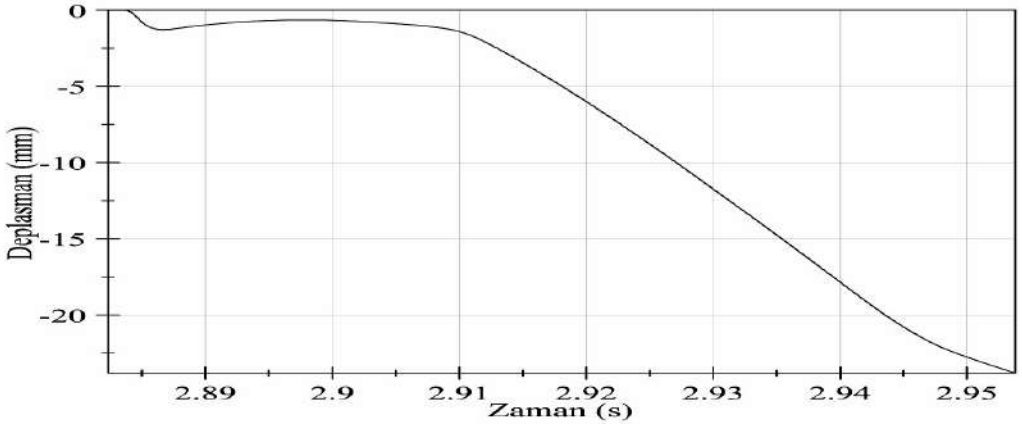
Şekil 5.25. SC5 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a) 1. düşme b) 36. düşme c) 42. düşme



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.26. SC5 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 1. düşme b) 36. düşme c) 42. düşme

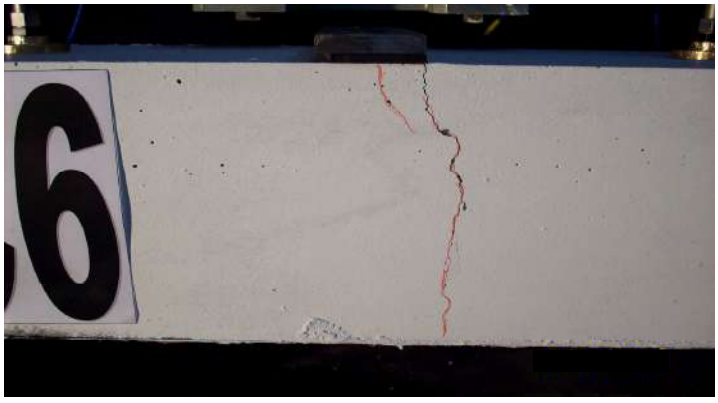


Resim 5.20. SC5 Deney elemanı göçme durumu

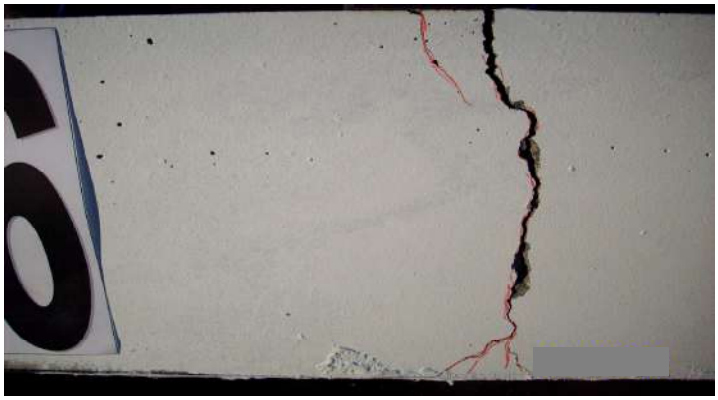
5.7. SC6 Deney Elemanı

Deney elemanı SC6 750 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı yüksek dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 45 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 498 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 30'uncu düşmede almıştır (Resim 5.21). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.22). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.23). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.7'de verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 2. düşme, 30. düşme ve 44. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.24'de verilmiştir.



Resim 5.21. SC6 Elemanında oluşan ilk hasar



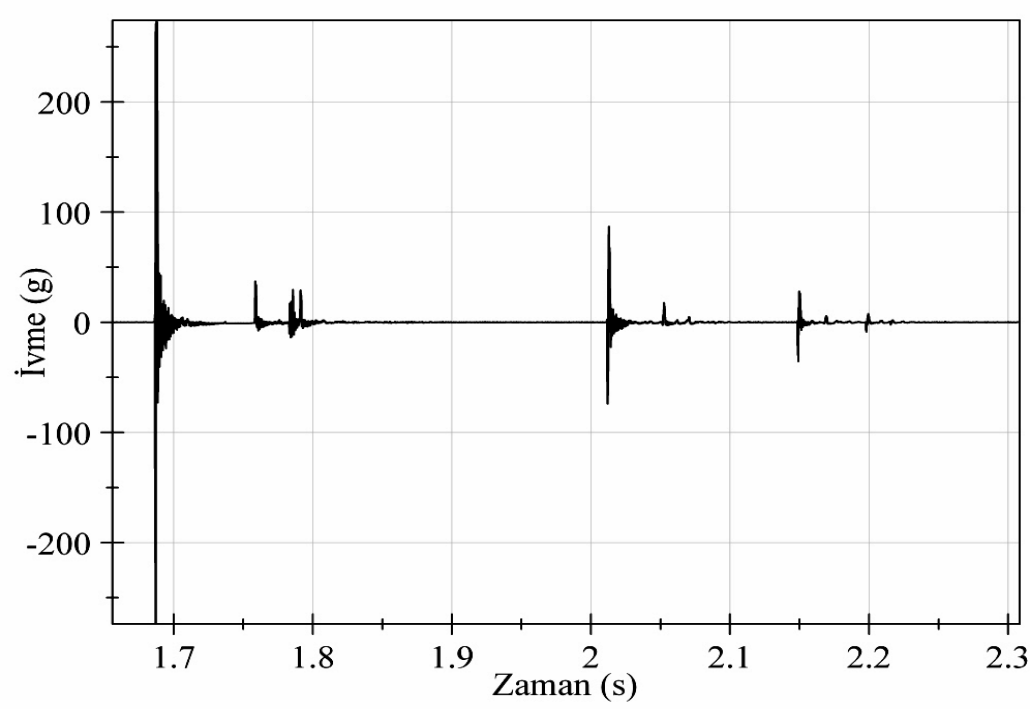
Resim 5.22. SC6 Elemanının göçme durumu



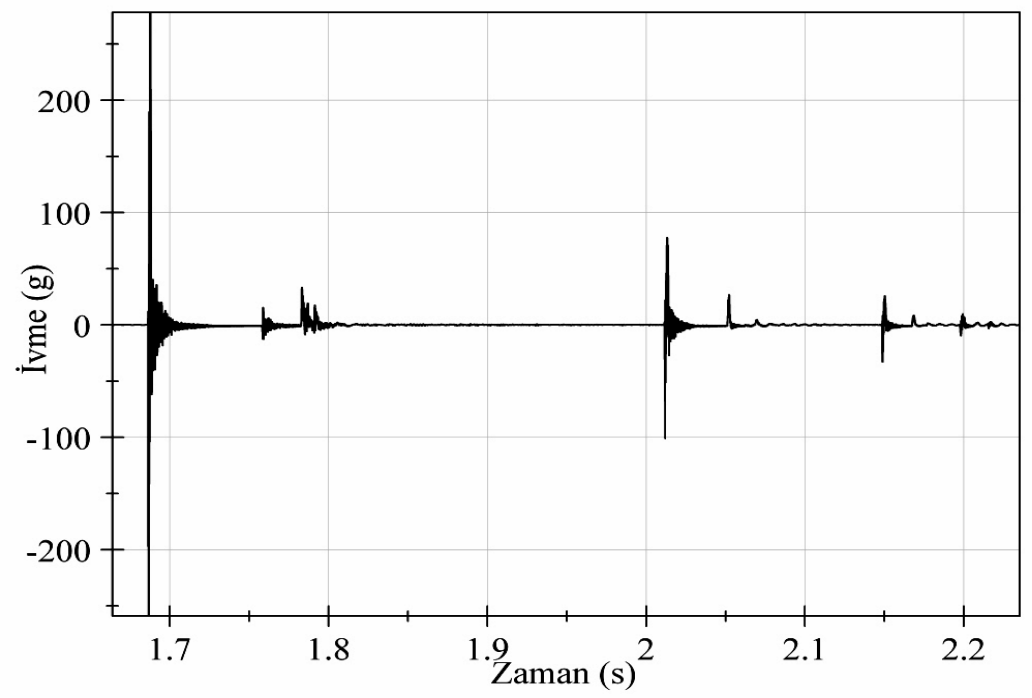
Resim 5.23. SC6 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.7. SC6 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

Eleman	Düşme No	Sol İvme Ölçer		Sağ İvme Ölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC6	1	-270,38	271,90	-277,78	248,32
	2	-273,88	273,95	-259,04	278,09
	3	-271,11	242,80	-240,42	251,48
	4	-267,37	260,18	-277,75	261,37
	5	-254,23	270,05	-226,36	257,32
	6	-237,19	234,45	-208,48	245,33
	7	-271,82	238,87	-207,16	186,38
	8	-265,29	249,21	-183,32	138,53
	9	-271,17	267,98	-226,91	229,81
	10	-232,34	260,95	-224,00	258,47
	11	-271,91	201,38	-198,57	174,69
	12	-245,87	257,29	-191,06	163,84
	13	-270,08	221,23	-171,96	162,40
	14	-243,45	268,15	-206,81	212,03
	15	-269,61	265,98	-218,47	238,52
	16	-212,90	232,45	-186,17	226,42
	17	-260,21	249,01	-181,24	265,80
	18	-237,91	267,88	-169,44	236,83
	19	-239,06	233,87	-194,01	270,72
	20	-271,18	239,12	-196,92	244,60
	21	-236,12	205,29	-207,35	174,35
	22	-241,38	251,75	-194,43	216,05
	23	-256,93	241,00	-186,49	256,78
	24	-272,92	219,33	-181,88	223,55
	25	-245,32	262,11	-193,33	238,01
	26	-267,78	260,60	-185,56	201,09
	27	-217,49	221,34	-189,74	197,88
	28	-223,47	255,31	-195,45	232,15
	29	-201,90	204,39	-200,17	272,62
	30	-211,17	257,59	-195,58	210,09
	31	-223,76	239,17	-185,32	202,04
	32	-204,18	201,89	-206,02	262,61
	33	-208,11	244,91	-204,70	235,44
	34	-272,92	248,83	-183,77	214,28
	35	-238,81	272,29	-206,60	273,25
	36	-241,45	258,90	-200,16	242,22
	37	-219,32	207,24	-170,12	264,54
	38	-213,19	206,94	-148,63	197,23
	39	-220,91	235,78	-162,32	245,24
	40	-271,43	234,76	-184,83	195,09
	41	-249,13	192,64	-155,26	183,01
	42	-221,92	218,31	-153,06	213,60
	43	-203,03	197,07	-128,97	156,85
	44	-272,92	192,97	-156,14	278,09
	45	-189,23	178,13	-190,57	167,92

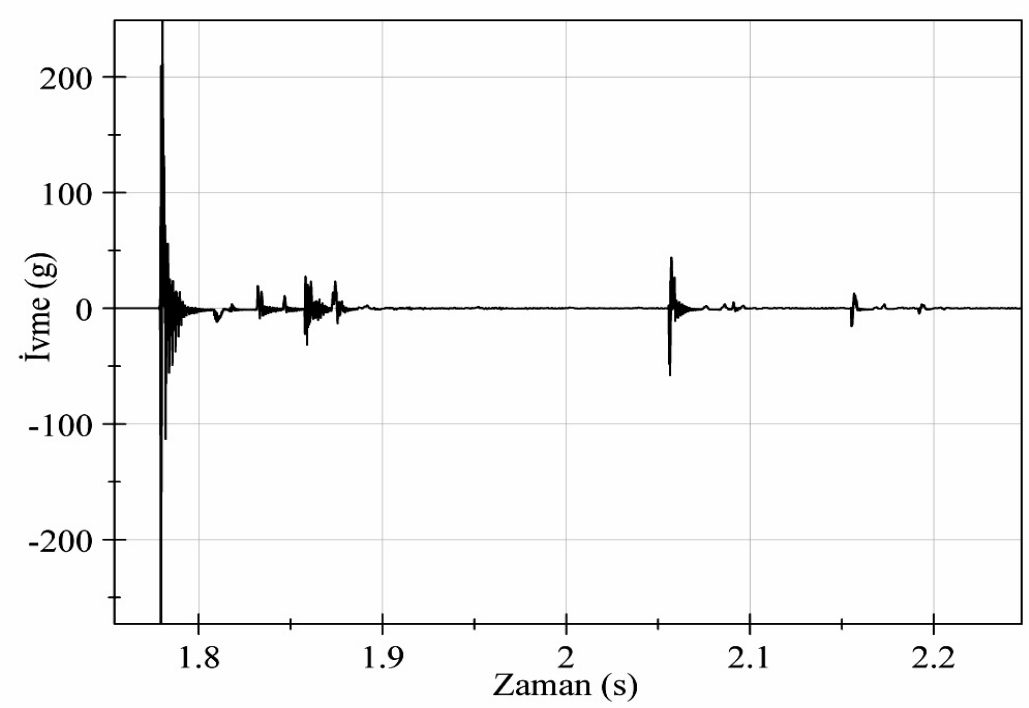


(a)

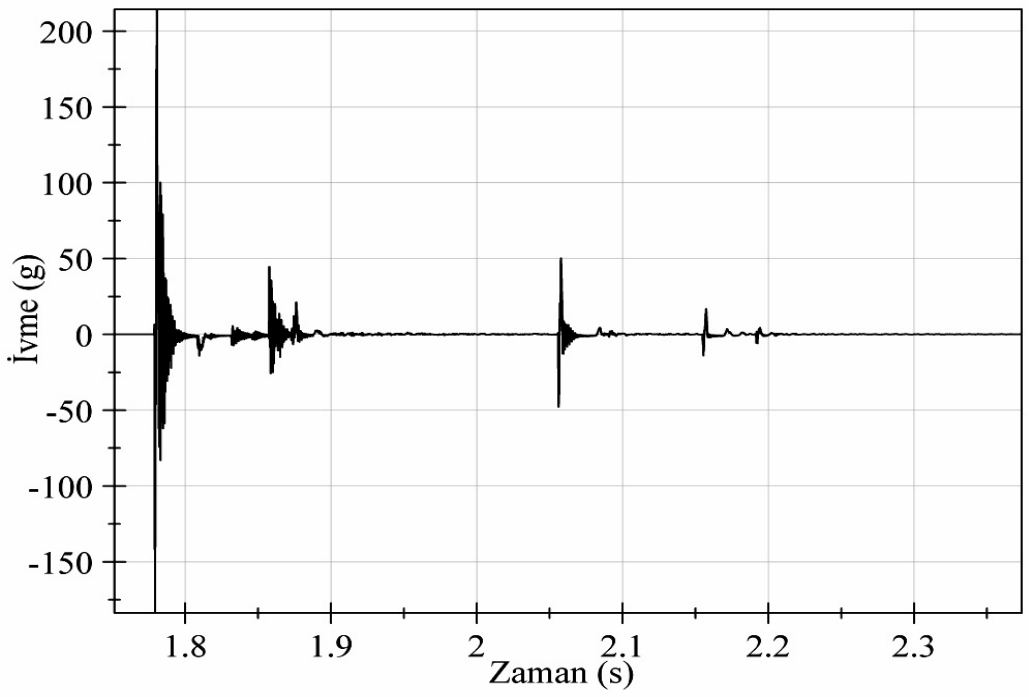


(b)

Şekil 5.27. SC6 Deney elemanının 2. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

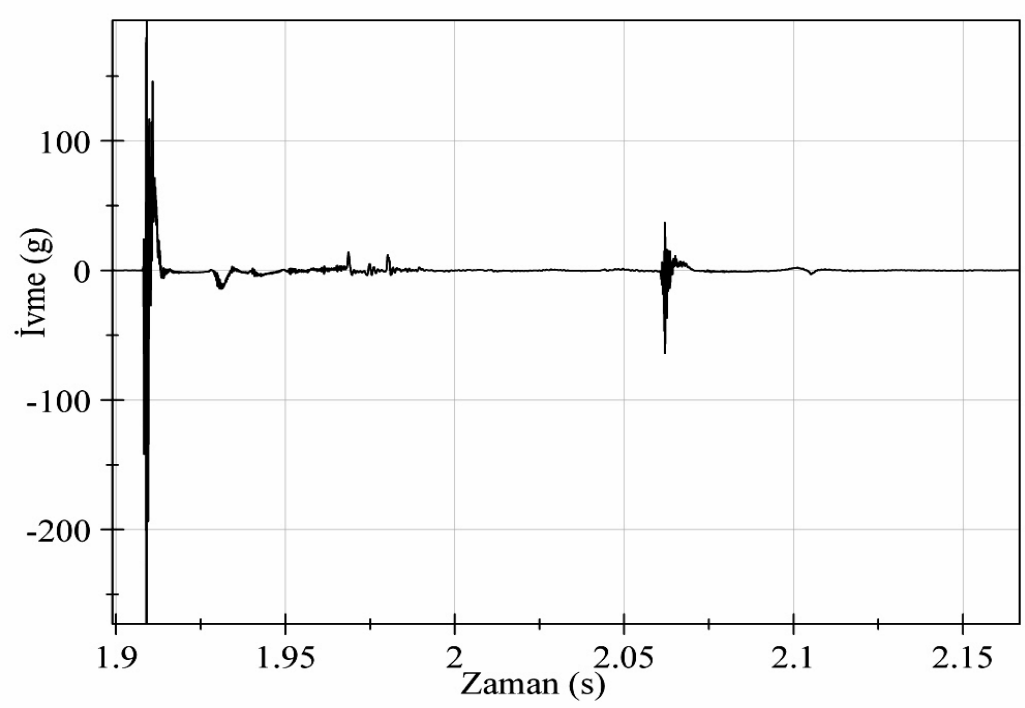


(a)

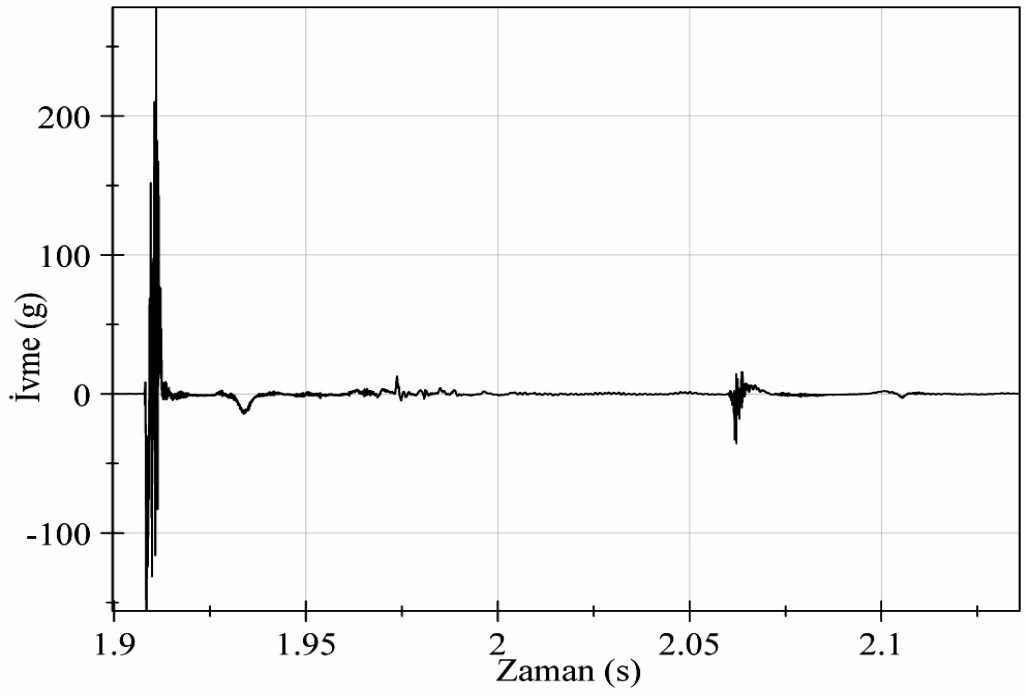


(b)

Şekil 5.28. SC6 Deney elemanın 30. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

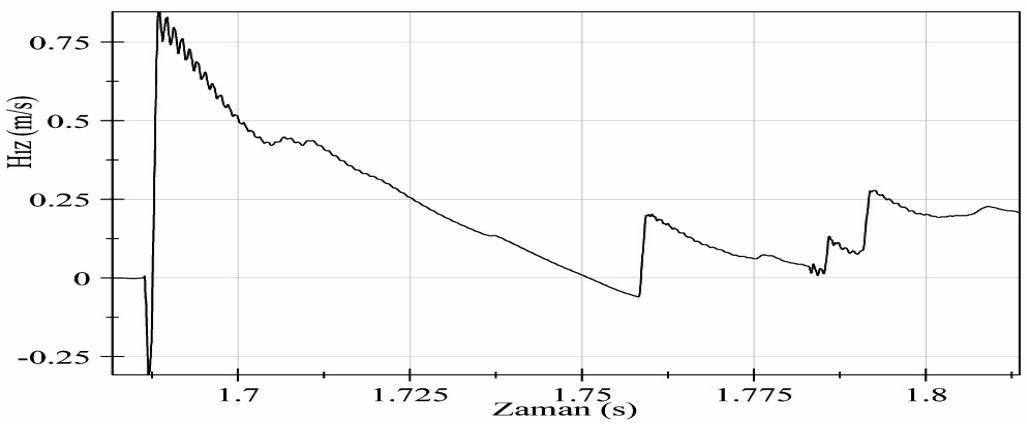


(a)

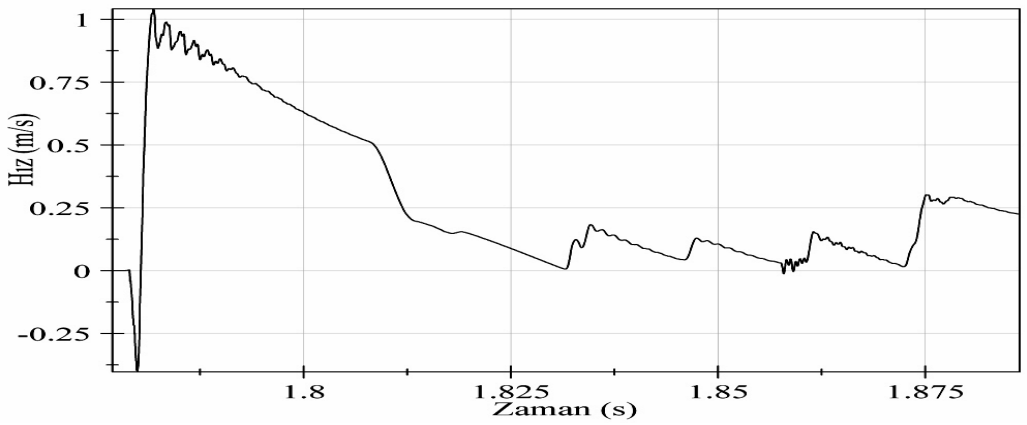


(b)

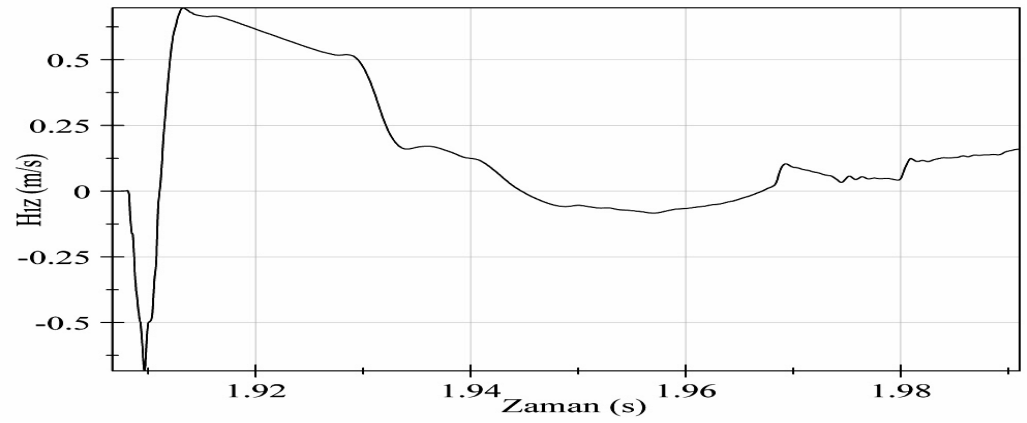
Şekil 5.29. SC6 Deney elemanın 44. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

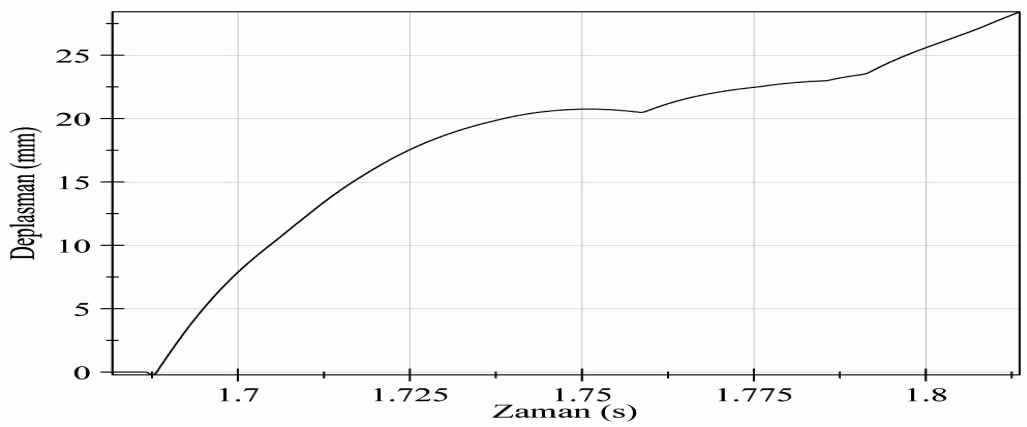


(b)

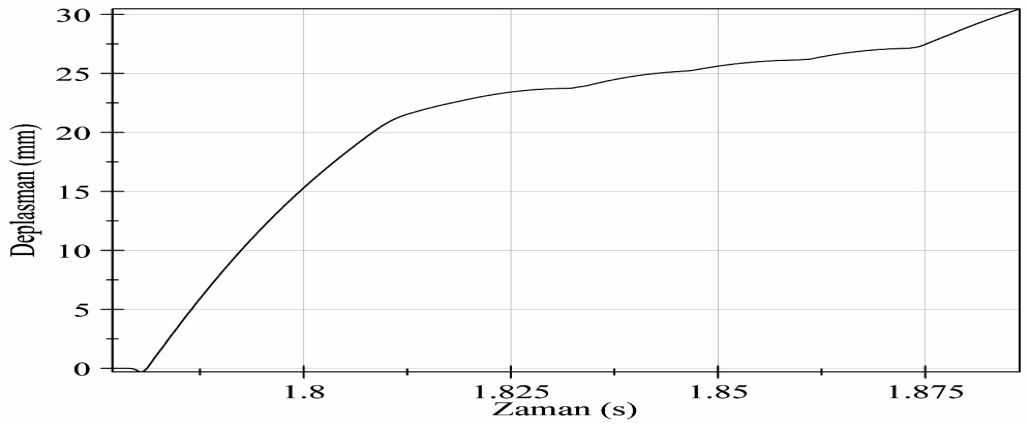


(c)

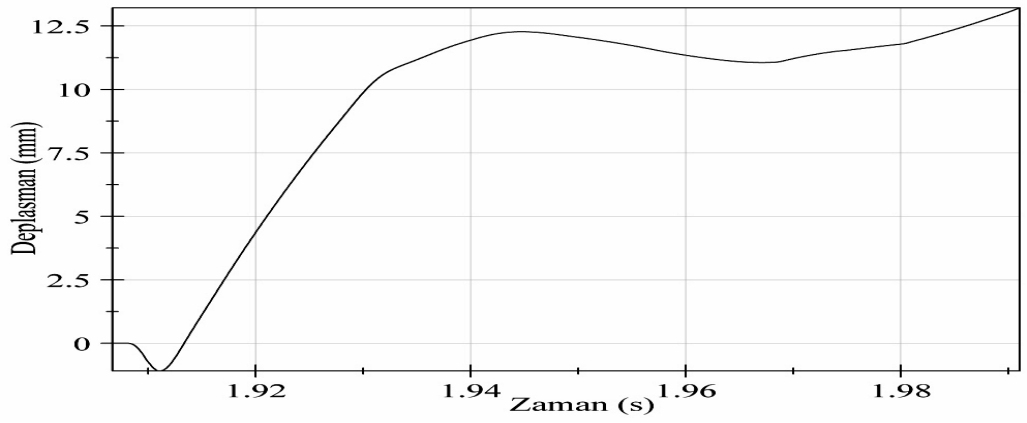
Şekil 5.30. SC6 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 30. düşme c) 44. düşme



(a)

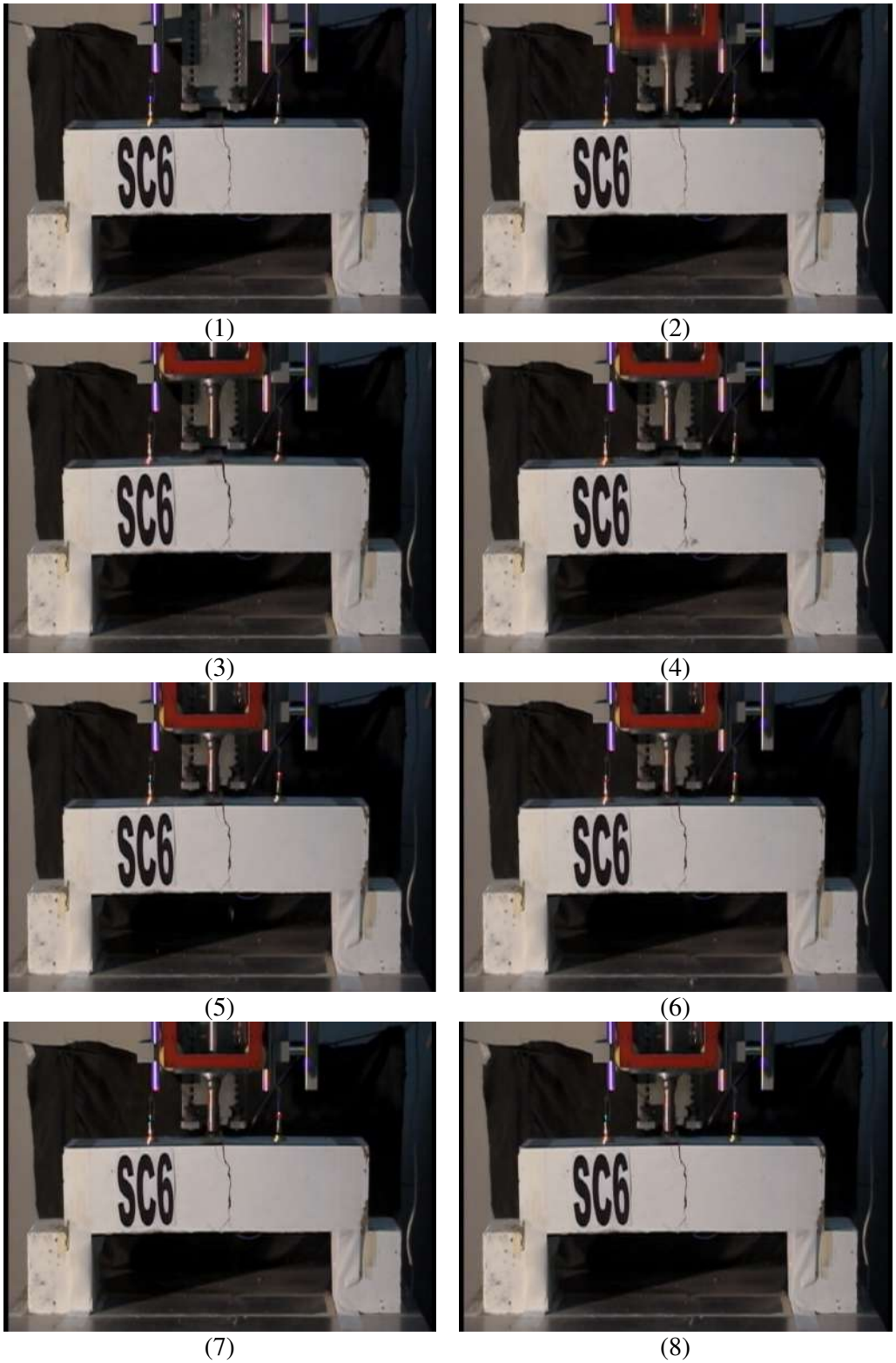


(b)



(c)

Şekil 5.31. SC6 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 30. düşme c) 44. düşme

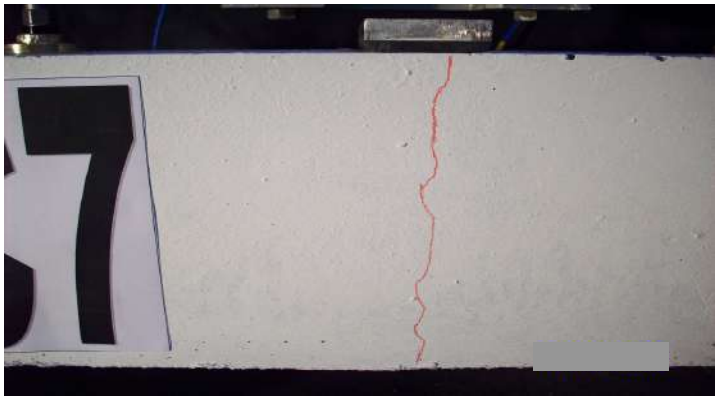


Resim 5.24. SC6 Deney elemanı göçme durumu

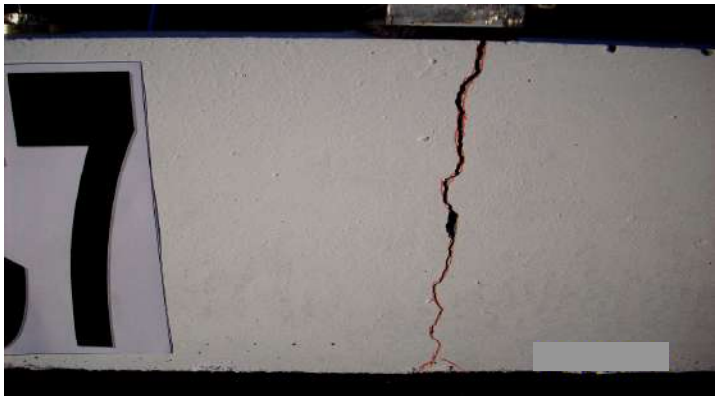
5.8. SC7 Deney Elemanı

Deney elemanı SC7 700 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı yüksek dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 34 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 471 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 19'uncu düşmede almıştır (Resim 5.25). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.26). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.27). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.8'de verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 1. düşme, 19. düşme ve 33. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.31, Şekil 5.32, Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.28'de verilmiştir.



Resim 5.25. SC7 Elemanında oluşan ilk hasar



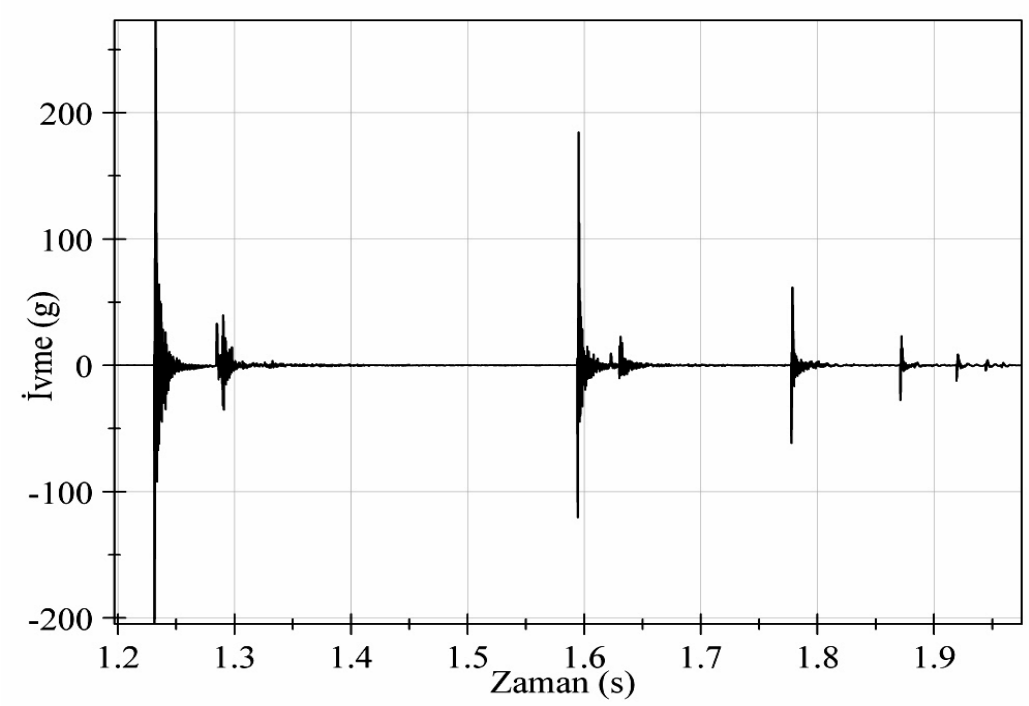
Resim 5.26. SC7 Elemanının göçme durumu



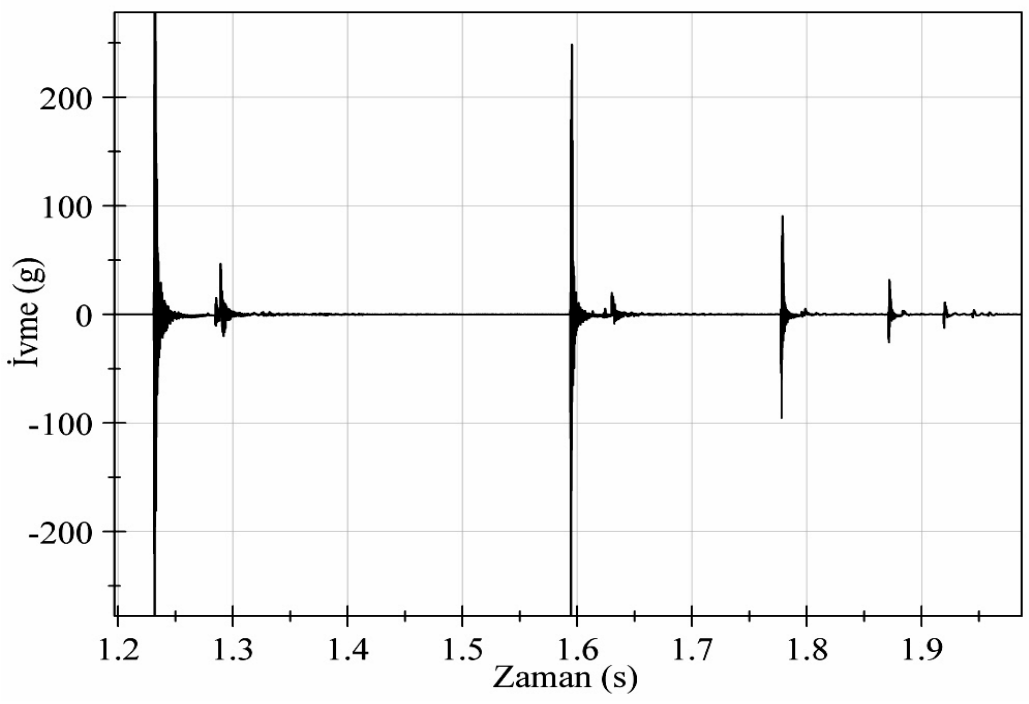
Resim 5.27. SC7 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.8. SC7 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

Eleman	Düşme No	Sol İvme Ölçer		Sağ İvme Ölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC7	1	-201,12	270,02	-263,62	260,12
	2	-204,79	271,19	-238,72	231,15
	3	-210,95	265,03	-268,62	245,21
	4	-218,15	235,91	-240,08	230,60
	5	-229,68	244,23	-256,19	224,21
	6	-189,79	162,59	-216,52	188,87
	7	-246,59	229,39	-254,78	233,41
	8	-265,51	235,29	-219,34	248,09
	9	-250,92	265,11	-250,04	232,19
	10	-260,18	232,21	-249,21	230,01
	11	-265,27	256,19	-245,87	223,20
	12	-270,21	230,19	-209,78	245,98
	13	-260,17	258,01	-211,35	250,09
	14	-223,11	228,32	-239,71	231,76
	15	-238,87	245,39	-240,09	229,15
	16	-245,67	256,09	-222,32	222,18
	17	-239,33	244,18	-239,18	223,76
	18	-265,38	267,19	-241,11	240,39
	19	-263,91	255,03	-240,21	258,22
	20	-208,24	222,34	-230,07	201,98
	21	-227,30	256,39	-231,45	211,38
	22	-256,39	249,25	-250,88	250,07
	23	-272,92	273,00	-277,18	271,96
	24	-270,02	268,01	-254,19	259,13
	25	-268,55	234,29	-240,38	220,59
	26	-245,60	240,01	-231,19	209,35
	27	-263,39	265,23	-220,78	259,77
	28	-222,92	254,00	-228,13	250,87
	29	-248,91	241,19	-234,70	245,07
	30	-259,83	229,32	-221,34	267,22
	31	-268,17	256,91	-231,76	251,03
	32	-229,15	264,82	-260,23	260,12
	33	-272,90	272,01	-277,01	270,78
	34	-230,35	227,32	-217,19	207,81

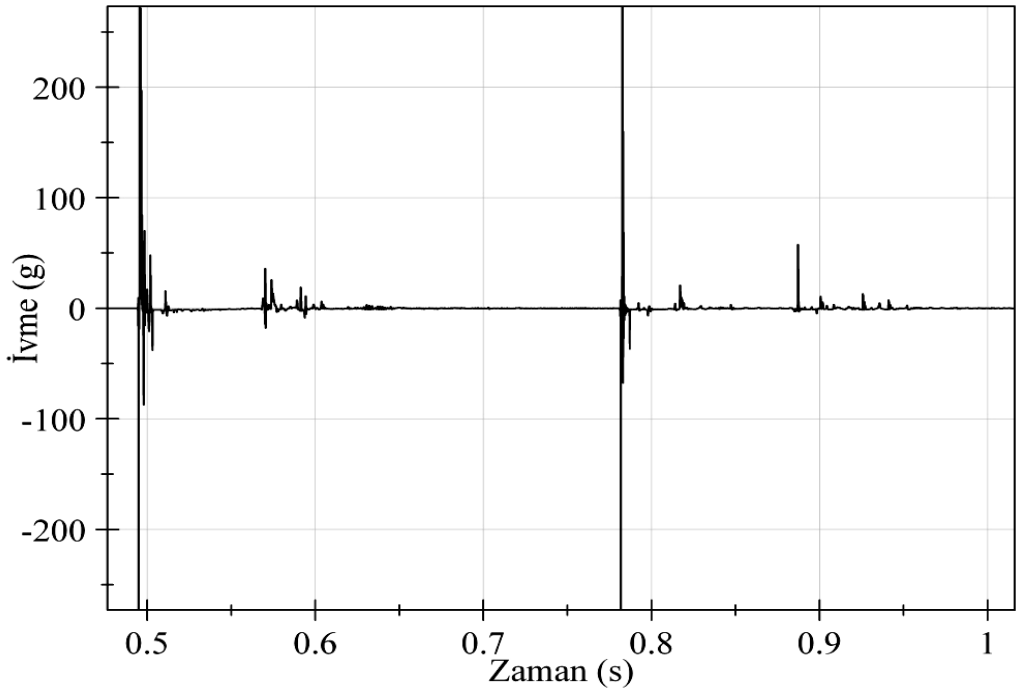


(a)

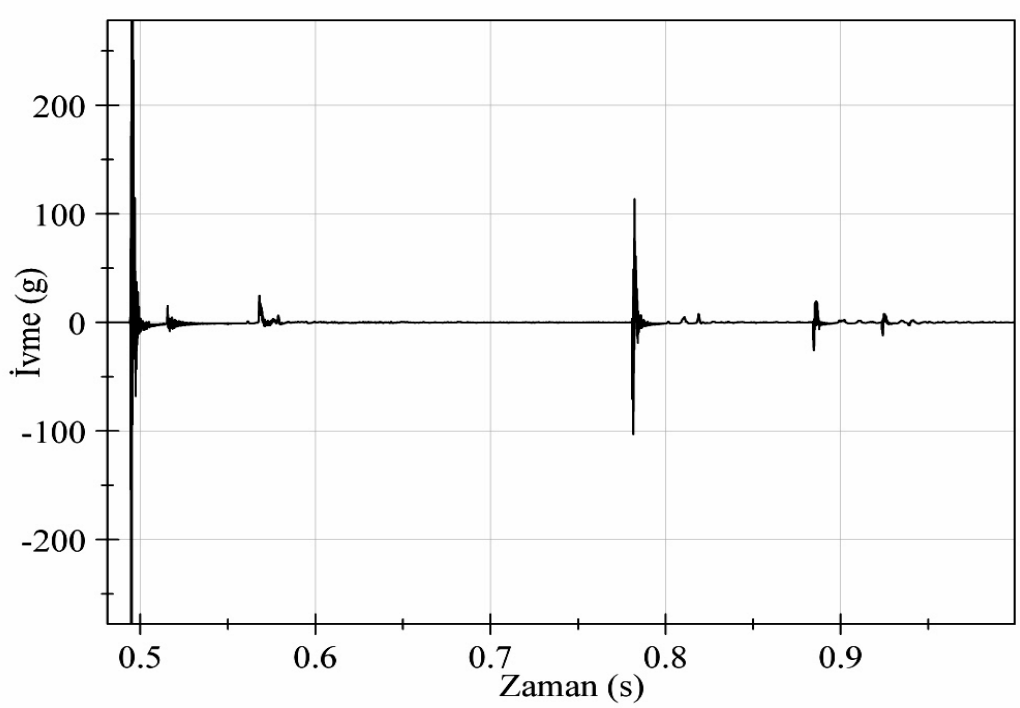


(b)

Şekil 5.31. SC7 Deney elemanının 1. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

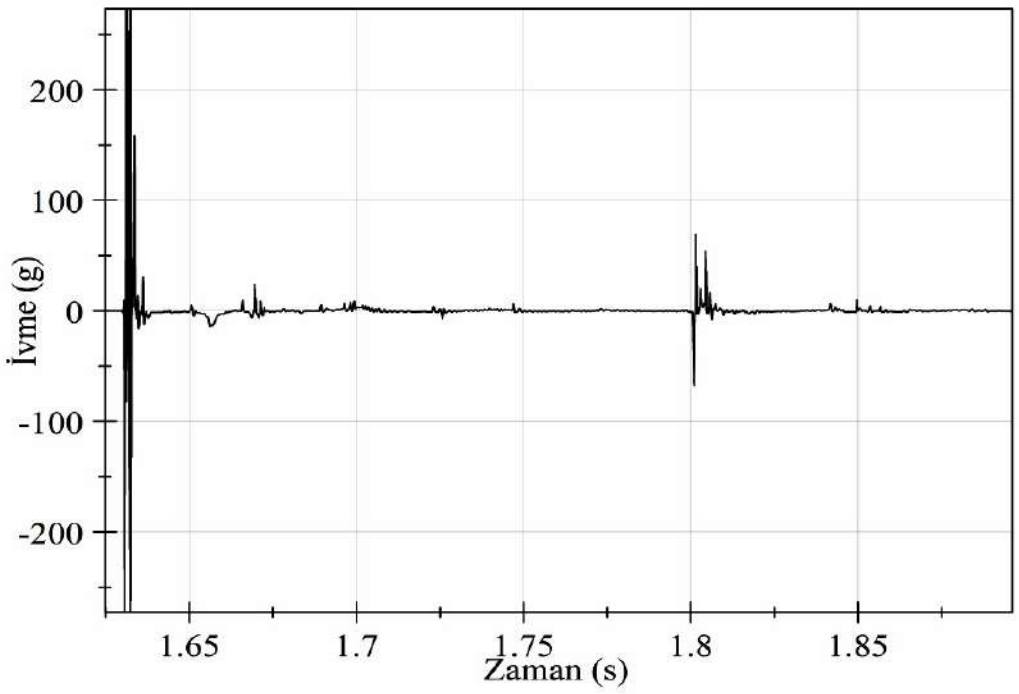


(a)

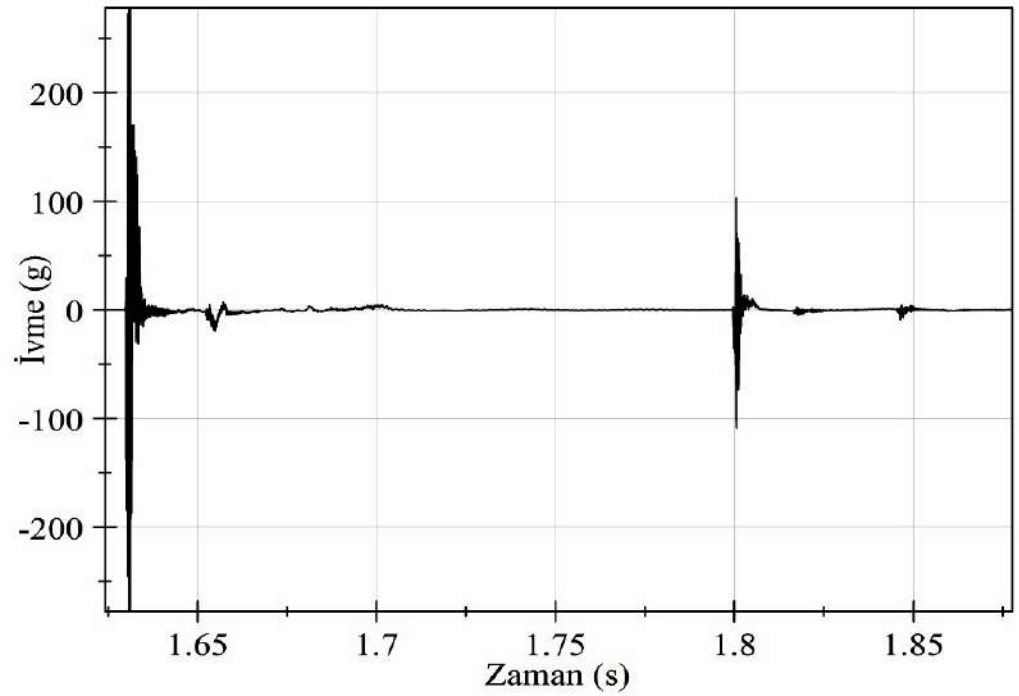


(b)

Şekil 5.32. SC7 Deney elemanın 19. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

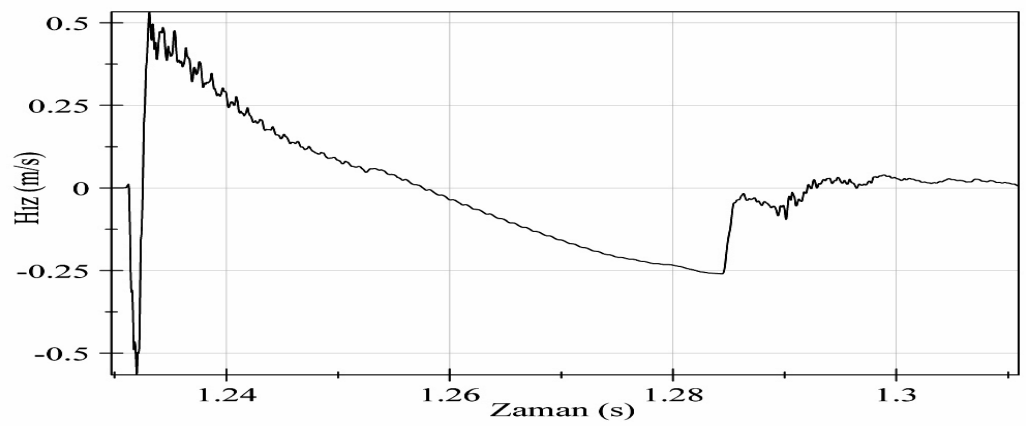


(a)

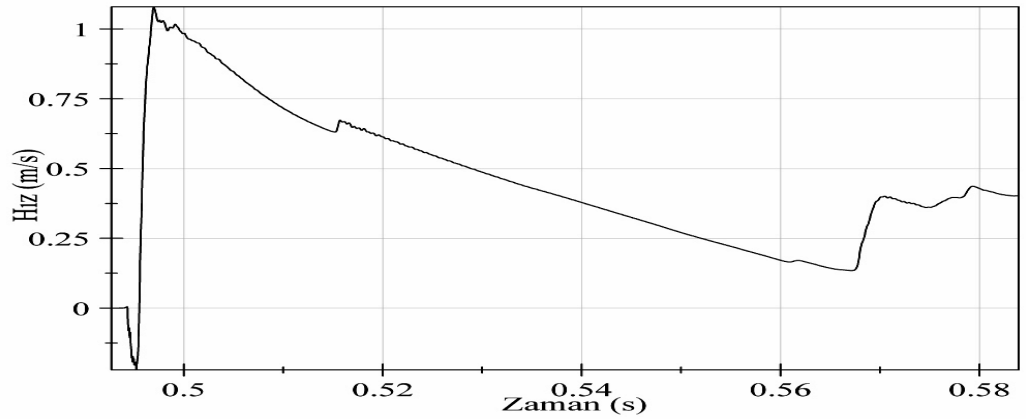


(b)

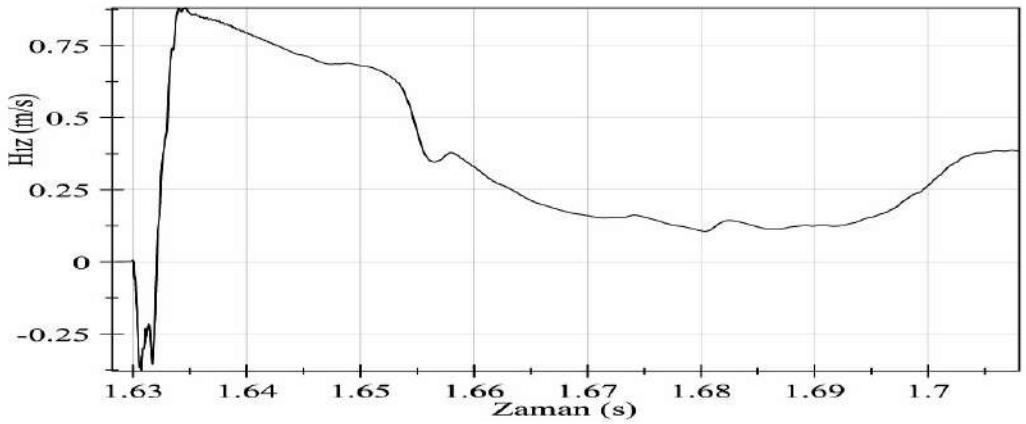
Şekil 5.33. SC7 Deney elemanın 33. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

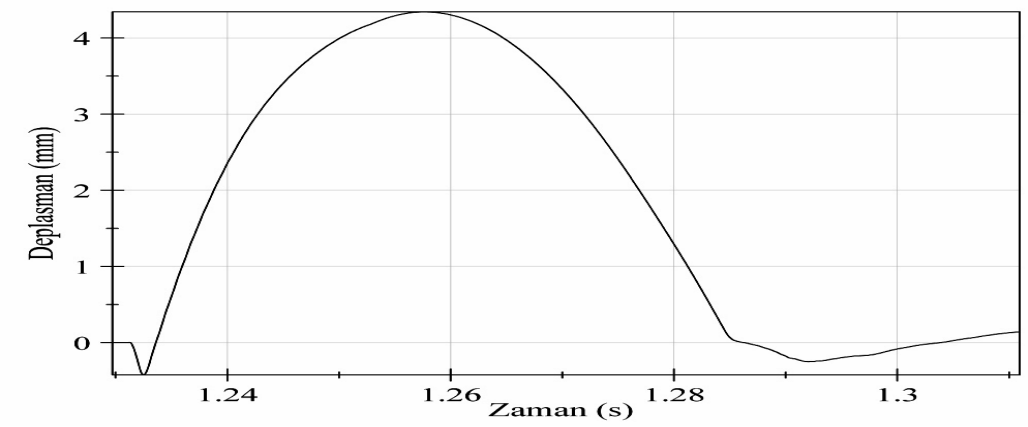


(b)

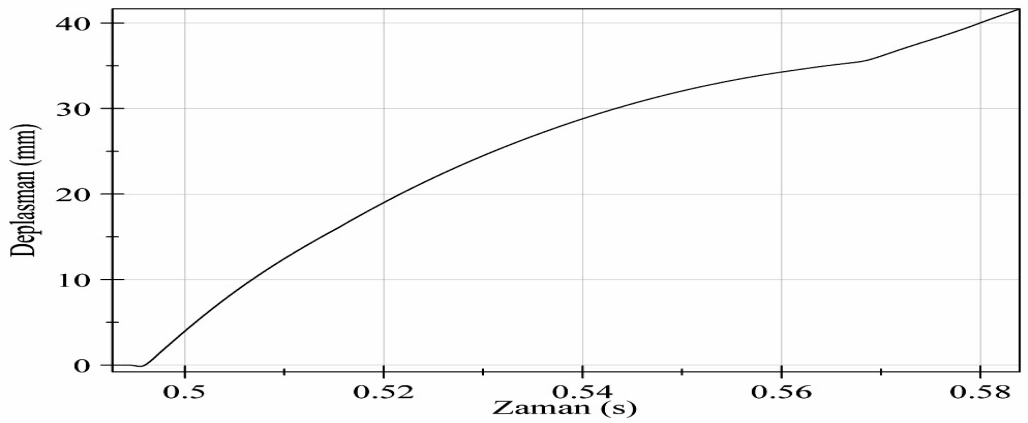


(c)

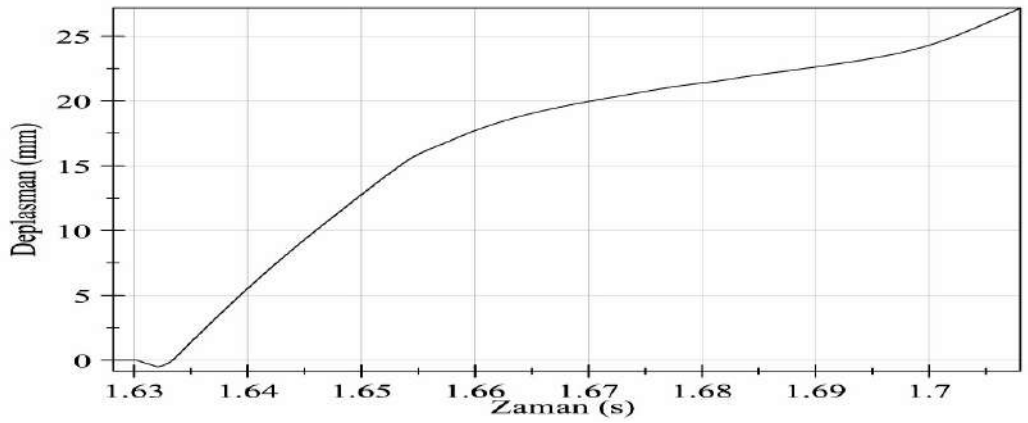
Şekil 5.34. SC7 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a) 1. düşme b) 19. düşme c) 33. düşme



(a)

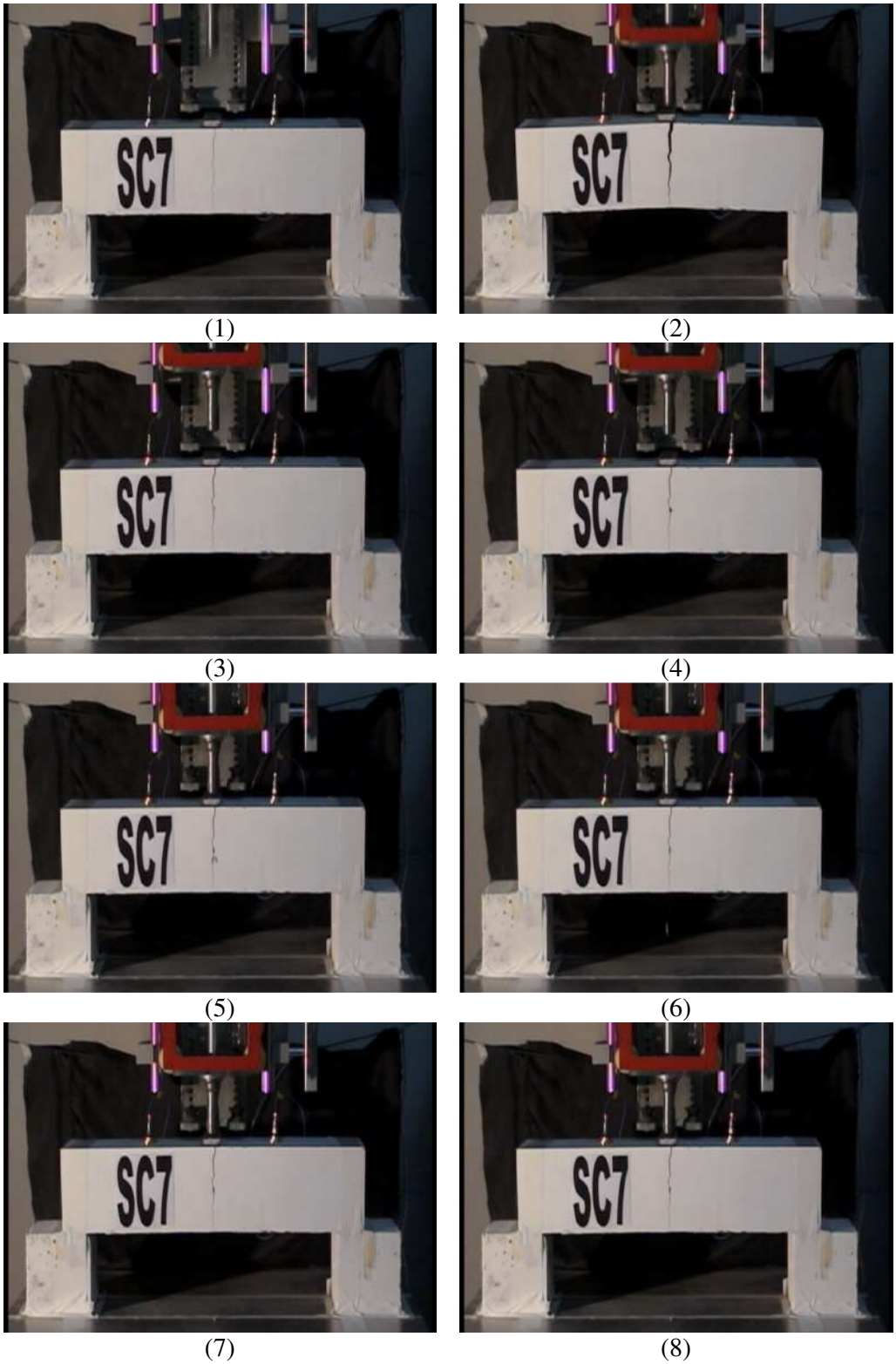


(b)



(c)

Şekil 5.35. SC7 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 1. düşme b) 19. düşme c) 33. düşme

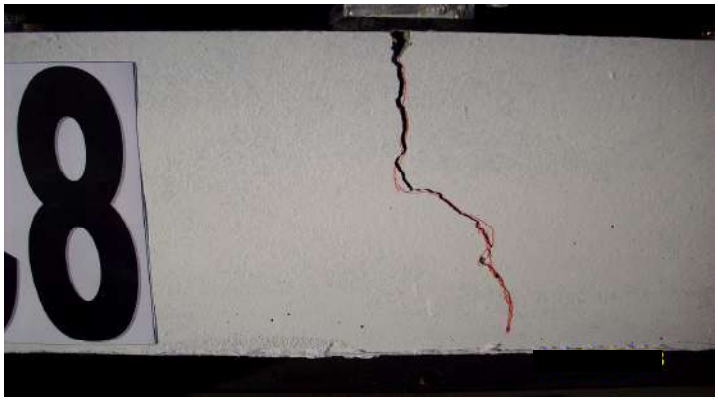


Resim 5.28. SC7 Deney elemanı göçme durumu

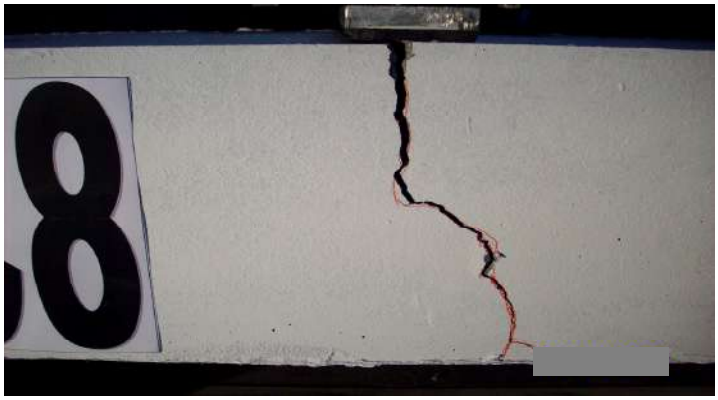
5.9. SC8 Deney Elemanı

Deney elemanı SC8 650 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı yüksek dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 72 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 445 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 47'inci düşmede almıştır (Resim 5.29). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.30). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.31). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.9'da verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 2. düşme, 47. düşme ve 71. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.36, Şekil 5.37, Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.32'de verilmiştir.



Resim 5.29. SC8 Elemanında oluşan ilk hasar



Resim 5.30. SC8 Elemanının göçme durumu



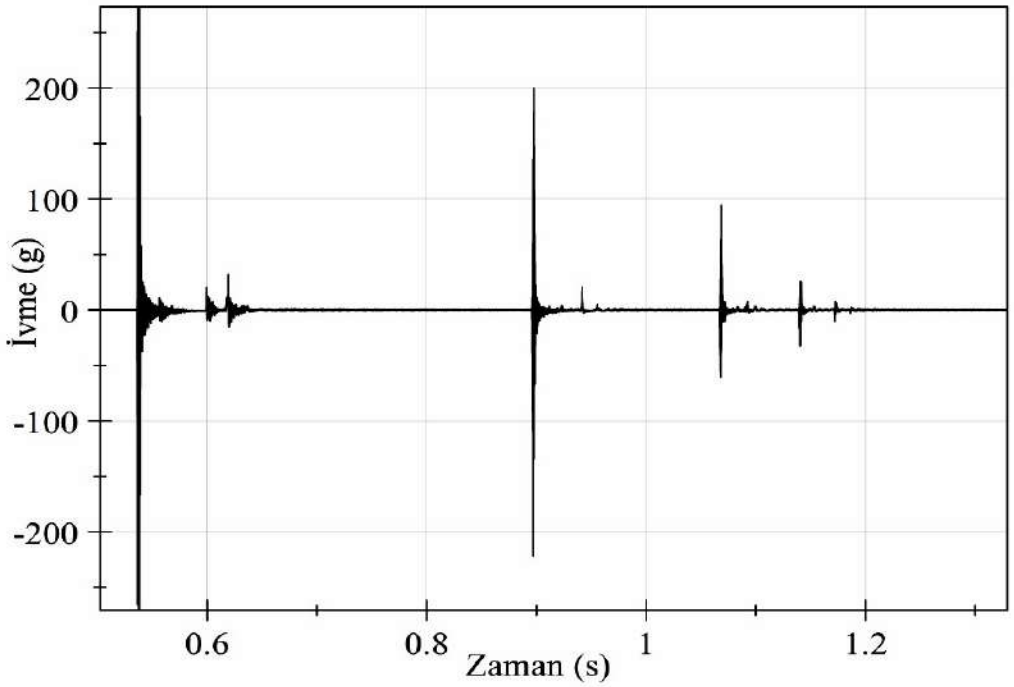
Resim 5.31. SC8 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.9. SC8 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

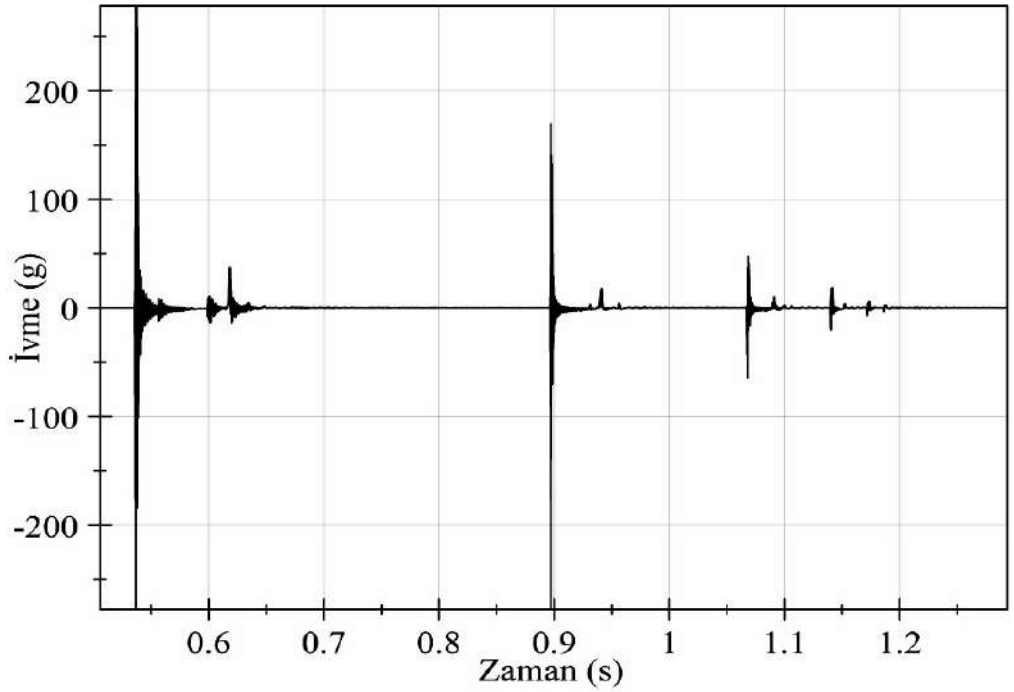
Eleman	Düşme No	Sol İvme Ölçer		Sağ İvme Ölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC8	1	-218,92	232,11	-238,17	243,01
	2	-270,85	273,00	-277,78	278,09
	3	-220,16	210,75	-210,72	218,23
	4	-239,52	256,78	-214,82	238,77
	5	-221,38	218,92	-241,34	230,09
	6	-263,72	223,19	-250,81	234,76
	7	-232,55	234,91	-221,09	223,57
	8	-247,18	223,12	-235,21	211,83
	9	-271,92	234,81	-219,83	226,01
	10	-264,78	267,19	-250,29	232,34
	11	-227,35	238,23	-234,82	217,65
	12	-233,88	201,21	-230,29	210,50
	13	-221,53	149,18	-201,10	140,59
	14	-272,92	234,85	-260,13	223,76
	15	-264,24	208,17	-258,27	270,13
	16	-250,55	211,53	-219,43	201,67
	17	-263,88	223,76	-260,01	219,66
	18	-219,90	226,89	-225,08	223,89
	19	-266,67	201,18	-260,13	208,27
	20	-270,01	265,72	-250,55	267,19
	21	-160,14	158,90	-215,58	194,34
	22	-269,77	230,00	-234,19	220,15
	23	-236,14	199,23	-232,87	223,17
	24	-184,38	171,81	-189,35	167,38
	25	-229,49	270,01	-219,23	258,87
	26	-254,90	220,19	-253,19	198,16
	27	-112,55	136,79	-143,02	190,17
	28	-256,53	201,87	-225,72	209,75
	29	-239,22	230,23	-228,91	207,99
	30	-116,21	100,75	-150,93	154,21
	31	-251,62	250,67	-234,94	228,45
	32	-245,21	220,90	-243,81	230,76
	33	-250,77	249,03	-240,17	240,87
	34	-267,14	236,01	-203,34	225,81
	35	-247,84	201,27	-210,55	219,94
	36	-247,28	205,78	-217,08	201,23
	37	-220,71	241,17	-238,80	208,56
	38	-133,79	122,28	-122,54	199,88
	39	-152,93	196,89	-150,56	130,65
	40	-239,82	198,76	-202,93	188,17
	41	-198,87	187,45	-180,17	232,00

Çizelge 5.9. SC8 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar(Devam)

SC8	42	-156,85	107,74	-130,16	107,59
	43	-135,62	113,02	-134,61	179,78
	44	-256,83	265,57	-250,66	238,23
	45	-253,98	238,23	-219,23	224,82
	46	-125,64	119,73	-102,75	169,17
	47	-270,82	266,72	-255,19	260,21
	48	-263,76	261,17	-243,27	240,01
	49	-268,39	219,23	-203,18	205,02
	50	-267,52	228,87	-238,67	215,87
	51	-201,19	200,25	-224,45	228,11
	52	-188,71	219,00	-199,32	195,26
	53	-129,98	121,30	-113,30	172,15
	54	-251,56	251,18	-209,20	249,81
	55	-131,07	118,94	-106,90	178,99
	56	-270,01	269,13	-229,83	238,28
	57	-204,28	218,82	-276,70	266,52
	58	-103,91	110,86	-135,44	165,82
	59	-180,19	195,19	-176,45	170,16
	60	-117,30	197,39	-101,39	156,43
	61	-202,53	173,82	-230,18	200,55
	62	-190,76	183,29	-201,55	215,68
	63	-272,92	273,00	-277,78	278,09
	64	-258,74	221,17	-241,20	254,13
	65	-219,98	208,63	-276,05	217,71
	66	-205,53	200,16	-200,17	264,37
	67	-178,92	199,16	-222,34	196,59
	68	-200,04	257,77	-205,19	180,81
	69	-195,67	245,81	-177,28	259,12
	70	-246,82	217,76	-273,33	237,95
	71	-272,92	273,00	-277,78	230,21
	72	-230,15	240,02	-209,29	211,71

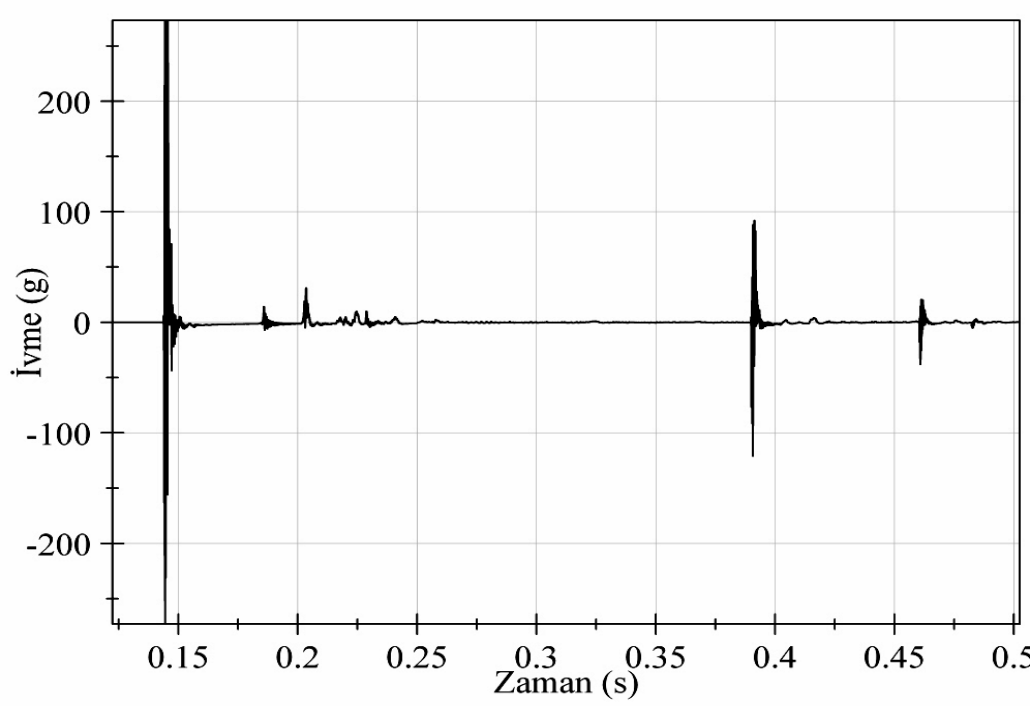


(a)

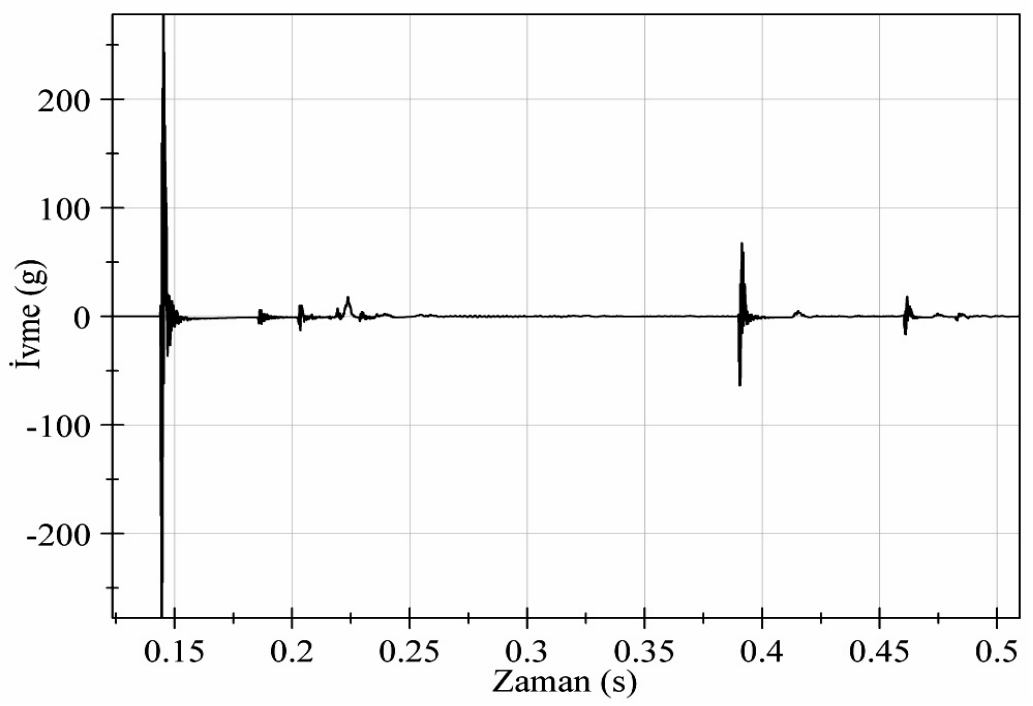


(b)

Şekil 5.36. SC8 Deney elemanının 2. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

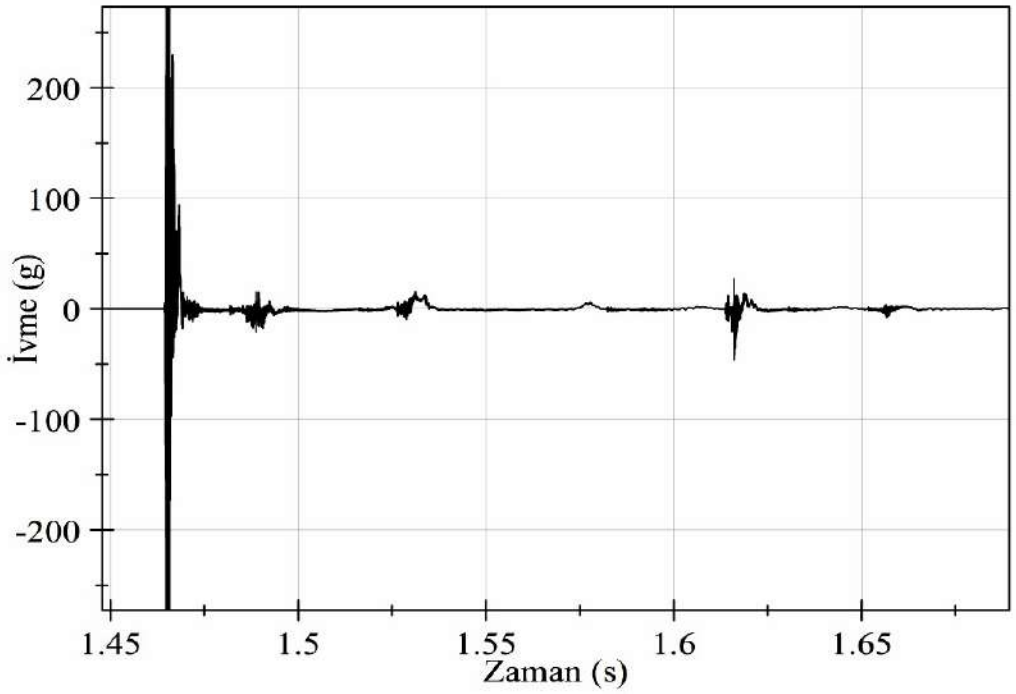


(a)

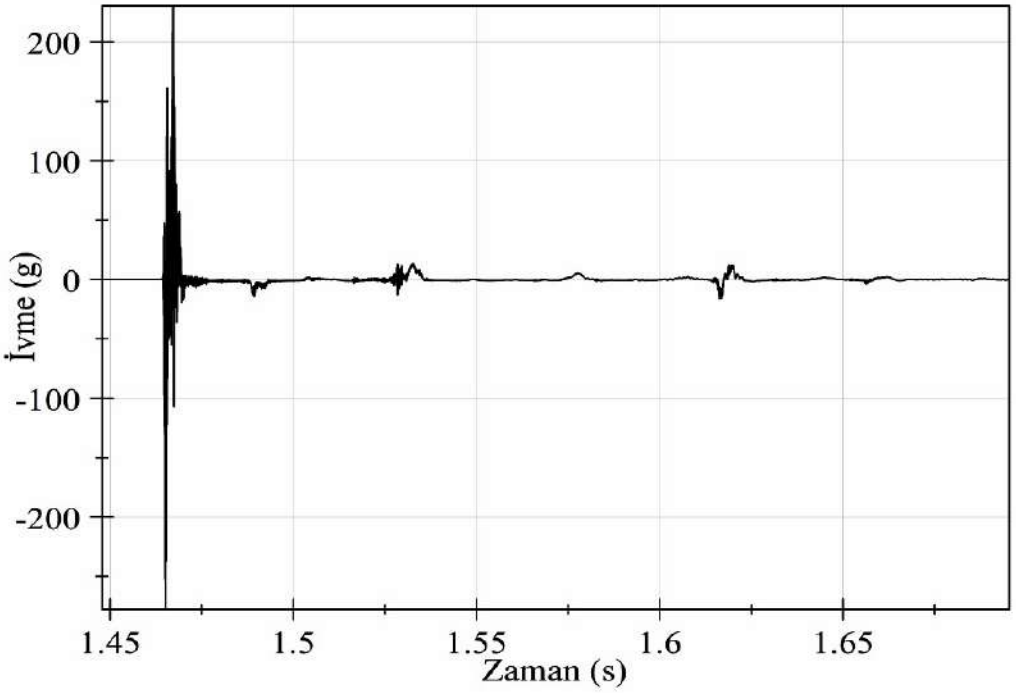


(b)

Şekil 5.37. SC8 Deney elemanın 47. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

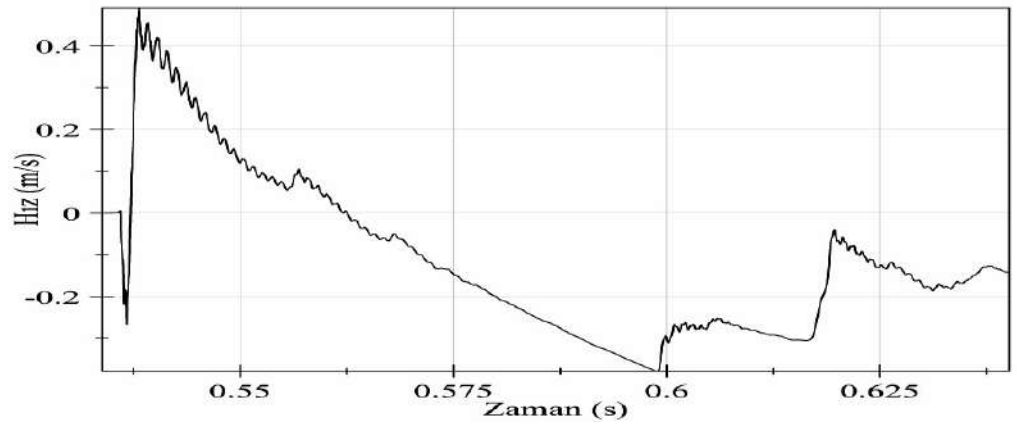


(a)

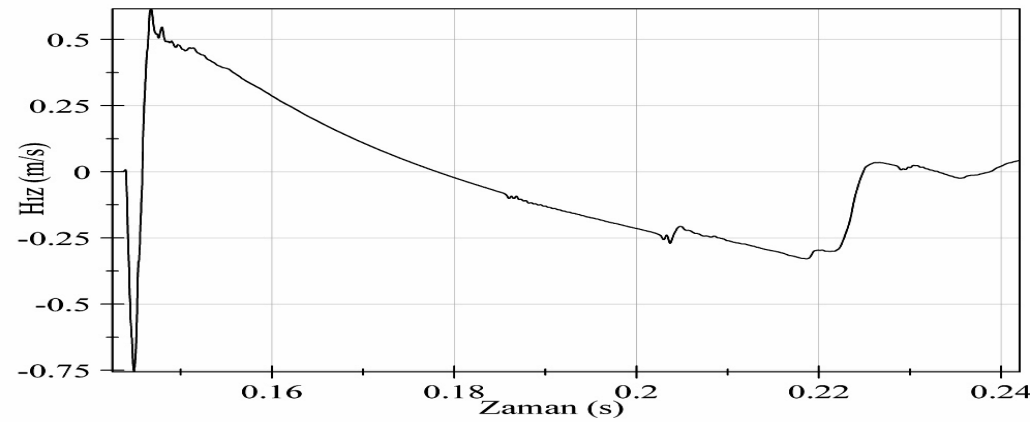


(b)

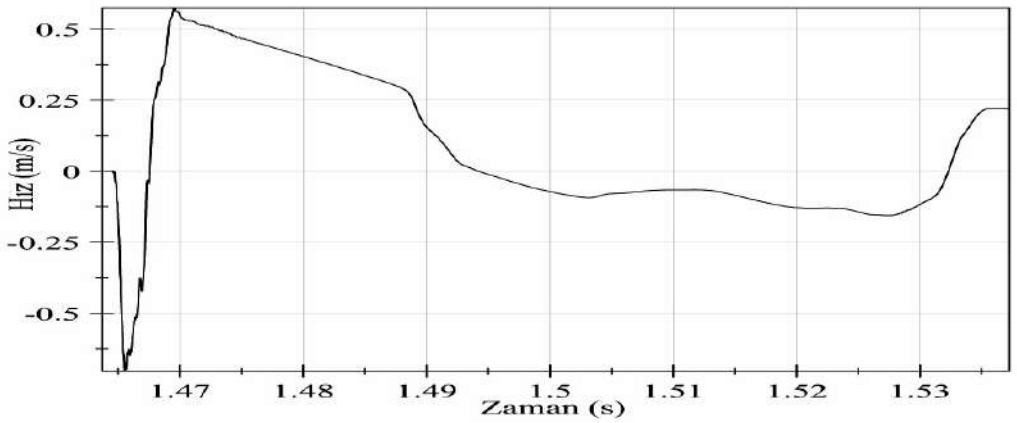
Şekil 5.38. SC8 Deney elemanın 71. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

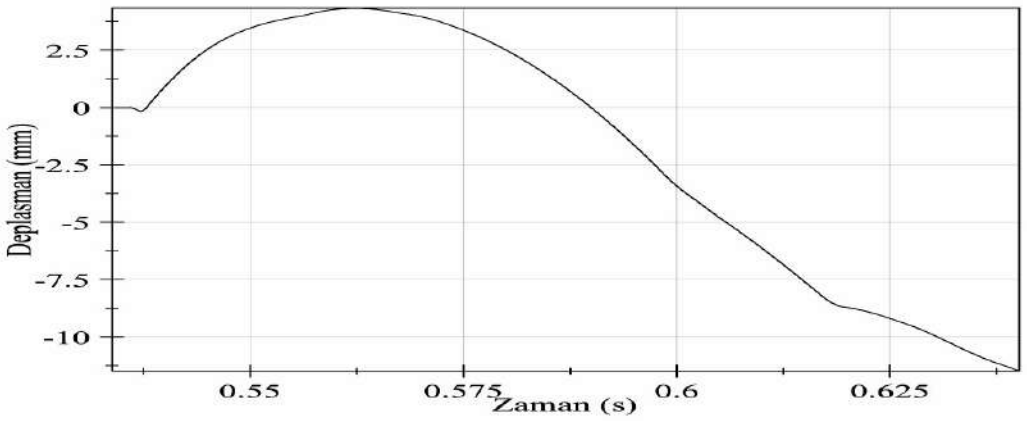


(b)

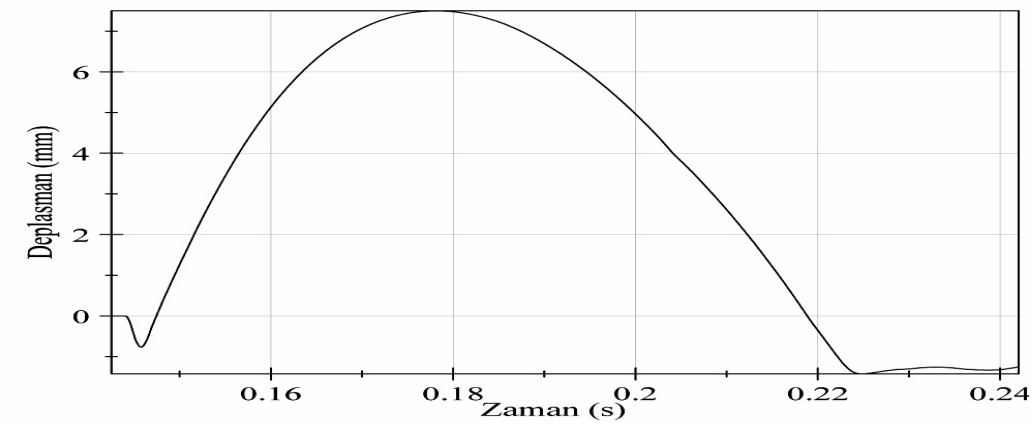


(c)

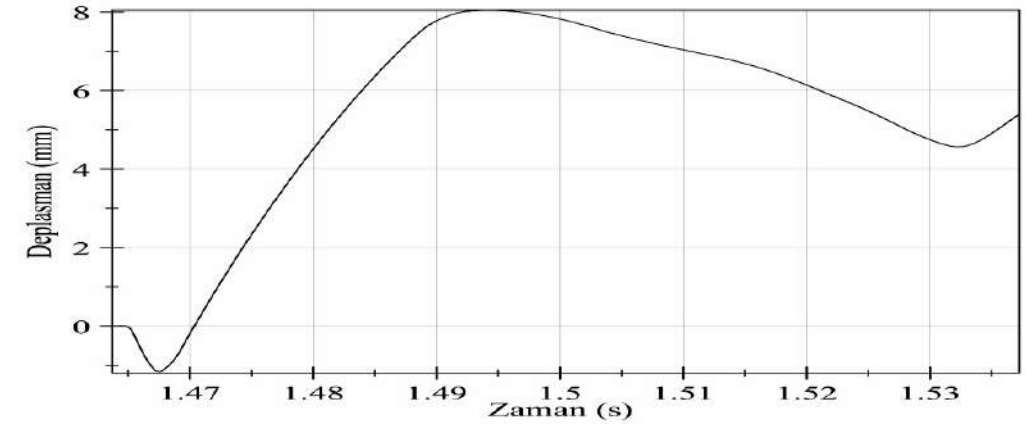
Şekil 5.39. SC8 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 47. düşme c) 71. düşme



(a)

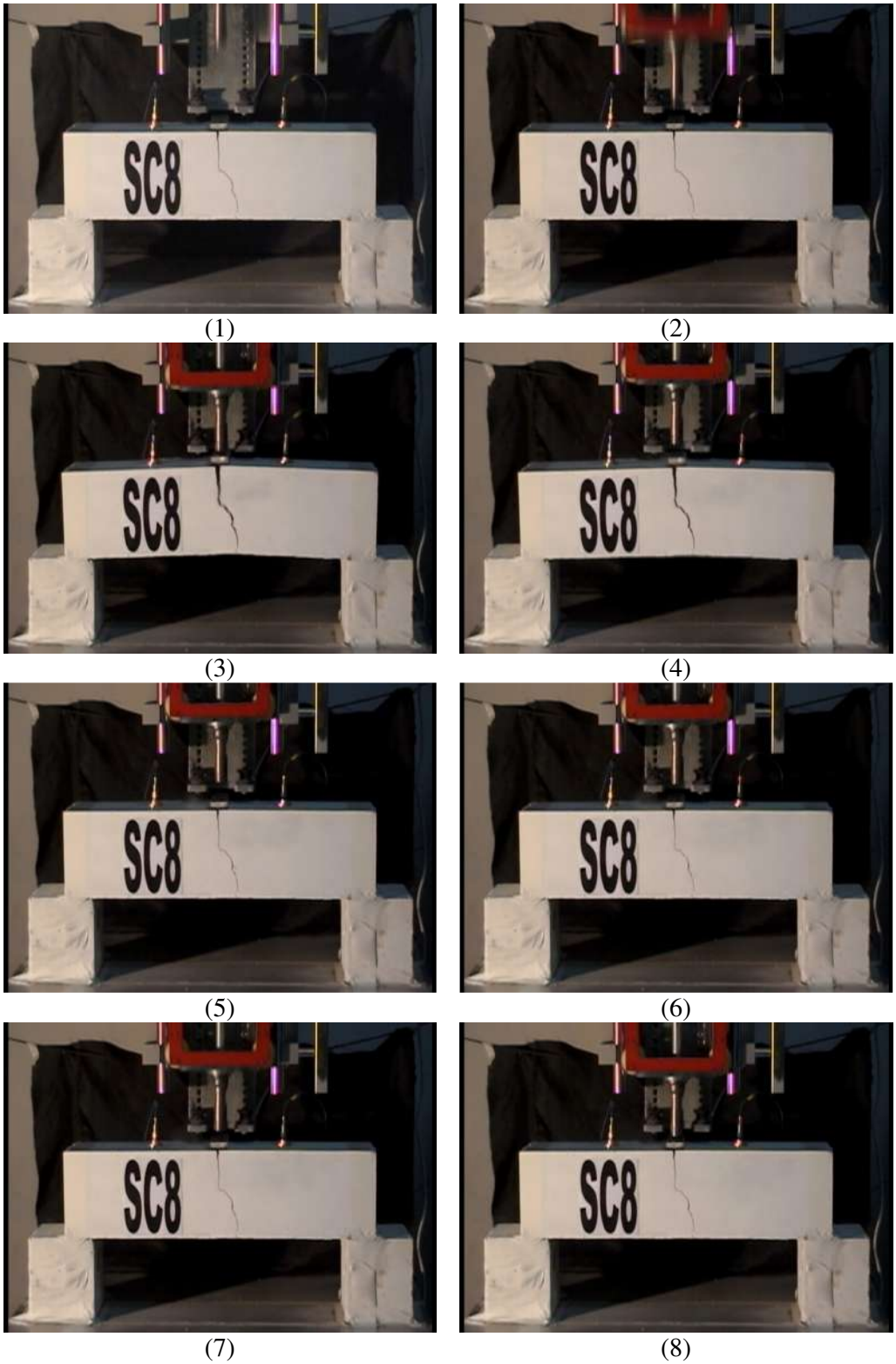


(b)



(c)

Şekil 5.40. SC8 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 47. düşme c) 71. düşme

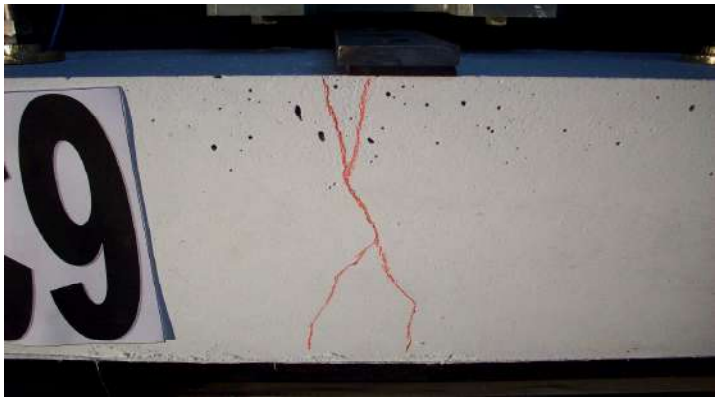


Resim 5.32. SC8 Deney elemanı göçme durumu

5.10. SC9 Deney Elemanı

Deney elemanı SC9 600 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı yüksek dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 58 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 419 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 29'uncu düşmede almıştır (Resim 5.33). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.34). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.35). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.10'da verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 1. düşme, 29. düşme ve 56. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.41, Şekil 5.42, Şekil 5.43, Şekil 5.44, Şekil 5.45). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.36'de verilmiştir.



Resim 5.33. SC9 Elemanında oluşan ilk hasar



Resim 5.34. SC9 Elemanının göçme durumu



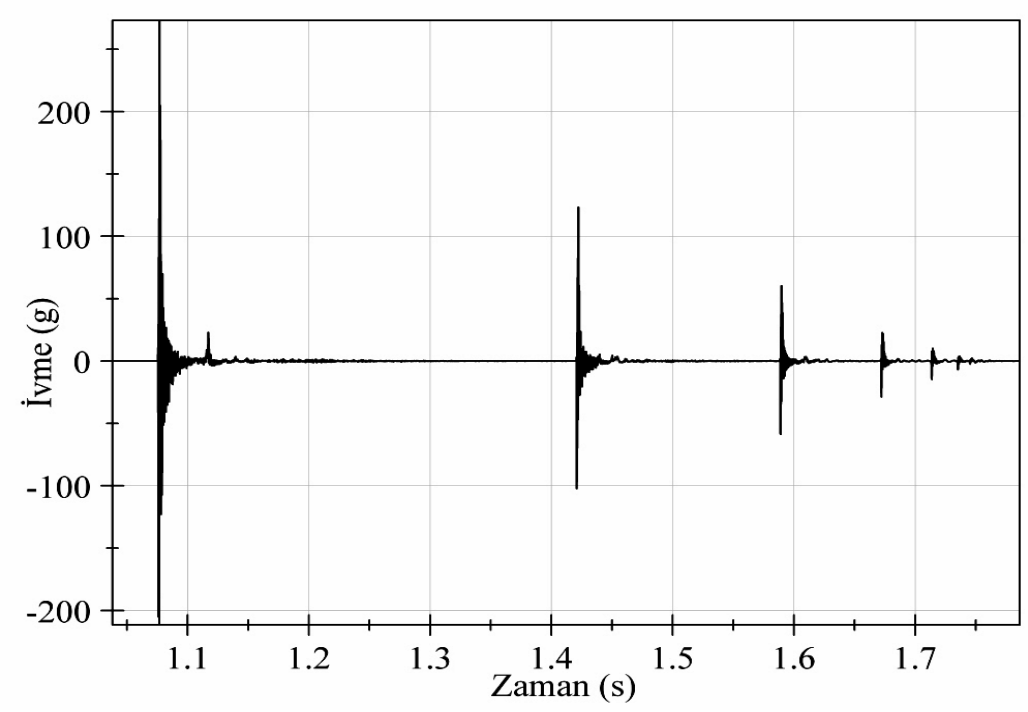
Resim 5.35. SC9 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.10. SC9 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

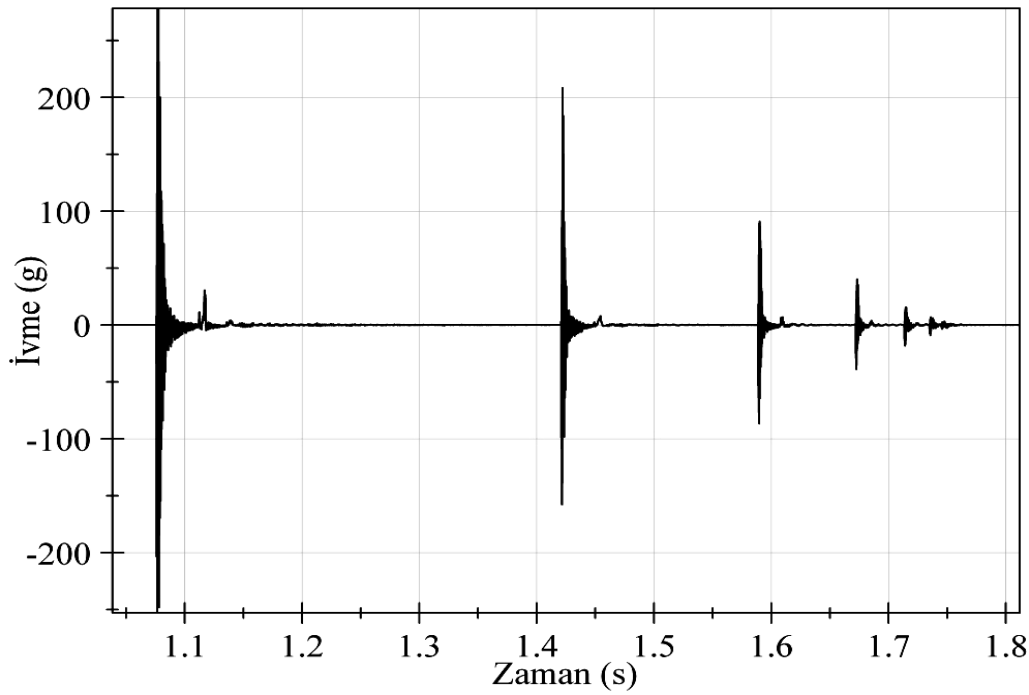
Eleman	Düşme No	Sol İvme Ölçer		Sağ İvme Ölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC9	1	-207,55	234,51	-248,91	236,53
	2	-197,27	210,32	-270,32	223,61
	3	-200,91	219,71	-251,93	211,75
	4	-211,53	254,70	-252,98	232,29
	5	-199,84	273,00	-265,69	271,61
	6	-197,64	218,25	-238,41	228,28
	7	-199,59	230,62	-223,98	217,09
	8	-225,91	215,32	-255,12	205,35
	9	-189,01	239,17	-217,34	219,53
	10	-221,95	261,23	-250,76	225,86
	11	-203,01	233,27	-240,74	211,17
	12	-230,77	206,26	-242,11	204,02
	13	-222,92	154,23	-241,21	134,11
	14	-112,03	227,48	-131,18	217,28
	15	-198,99	200,80	-203,11	263,65
	16	-211,21	204,16	-222,16	195,19
	17	-201,70	216,39	-215,79	213,18
	18	-197,41	219,52	-195,12	217,41
	19	-194,37	193,81	-243,60	201,79
	20	-191,96	258,35	-264,04	260,71
	21	-184,32	151,53	-254,66	187,86
	22	-190,57	222,63	-236,67	213,67
	23	-192,68	191,86	-225,72	216,69
	24	-201,60	164,44	-235,75	160,90
	25	-191,39	262,64	-228,80	252,39
	26	-188,31	212,82	-245,43	191,68
	27	-204,73	129,42	-200,88	183,69
	28	-194,21	194,50	-249,94	203,27
	29	-207,04	252,86	-205,91	194,51
	30	-190,21	193,38	-249,27	147,73
	31	-207,25	243,30	-251,20	221,97
	32	-209,82	213,53	-206,30	224,28
	33	-202,70	241,66	-254,75	234,39
	34	-199,27	228,64	-257,42	219,33
	35	-212,45	193,90	-222,52	213,46
	36	-206,46	198,41	-211,57	194,75
	37	-213,46	233,80	-200,09	202,08
	38	-209,92	114,91	-210,19	193,40
	39	-194,78	189,52	-215,68	124,17
	40	-210,91	191,39	-216,35	181,69
	41	-208,90	180,08	-231,10	225,52
	42	-195,50	100,37	-204,18	101,11

Çizelge 5.10. SC9 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar(Devam)

SC9	43	-195,75	105,65	-245,90	173,30
	44	-212,73	258,20	-235,06	231,75
	45	-200,94	230,86	-243,95	218,34
	46	-192,88	112,36	-240,64	162,69
	47	-208,58	259,35	-234,89	243,73
	48	-209,74	253,80	-194,59	233,53
	49	-199,73	211,86	-196,39	198,54
	50	-203,18	221,50	-244,72	209,39
	51	-235,93	192,88	-185,10	221,63
	52	-272,92	211,63	-233,11	188,78
	53	-246,29	113,93	-223,71	165,67
	54	-267,24	243,81	-259,02	243,33
	55	-218,50	111,57	-270,00	172,51
	56	-220,86	261,76	-270,11	261,80
	57	-189,82	211,45	-217,00	260,04
	58	-167,01	103,49	-236,87	159,34

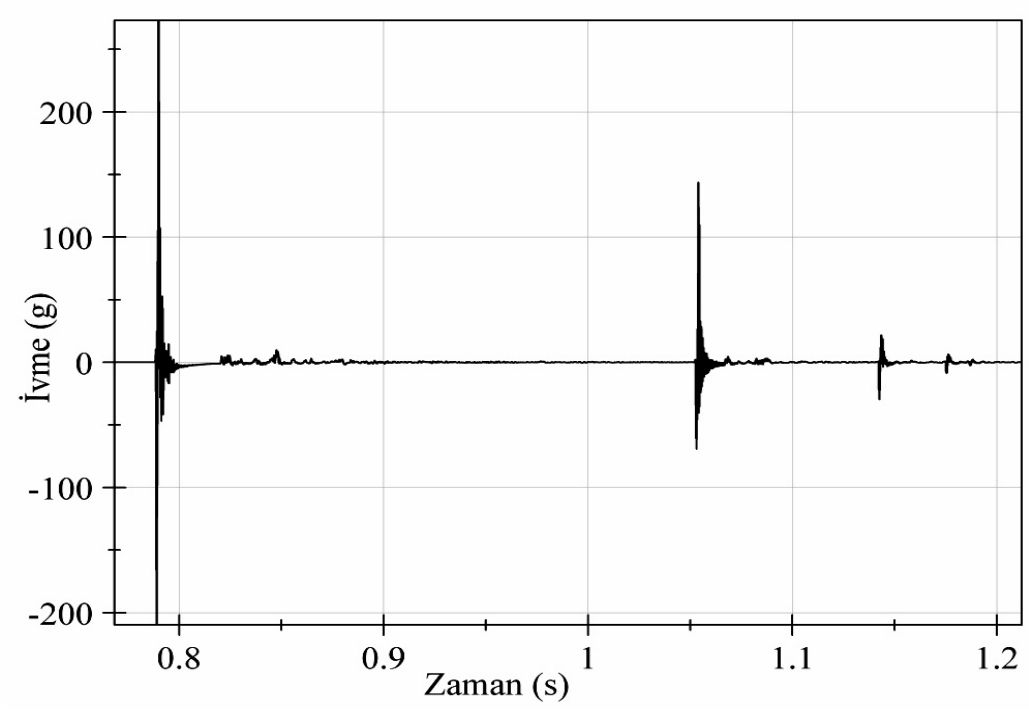


(a)

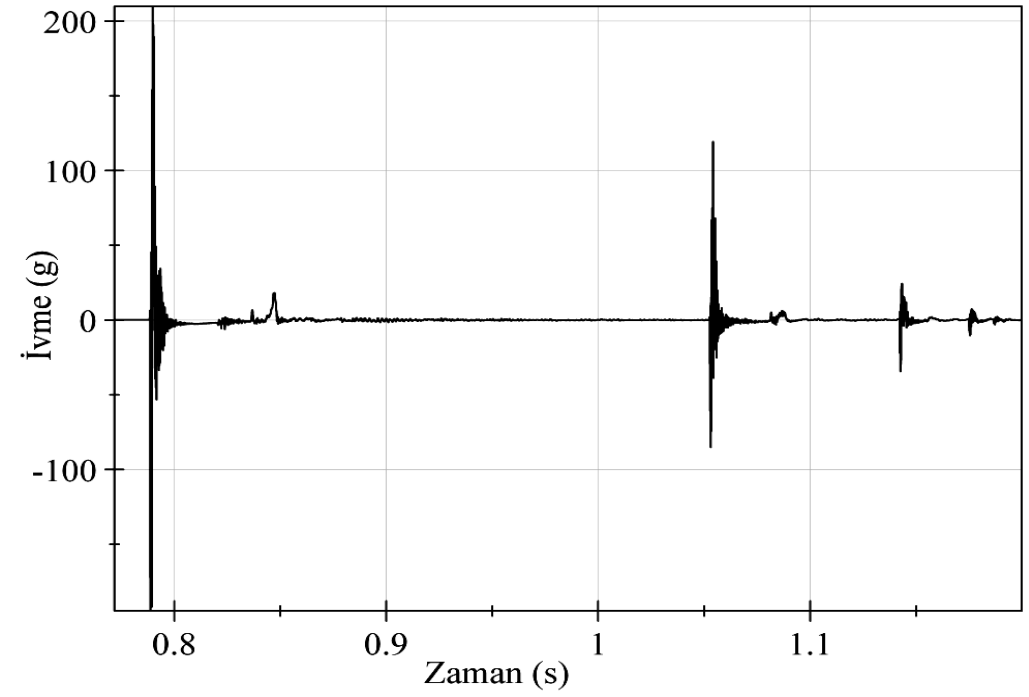


(b)

Şekil 5.41. SC9 Deney elemanının 1. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

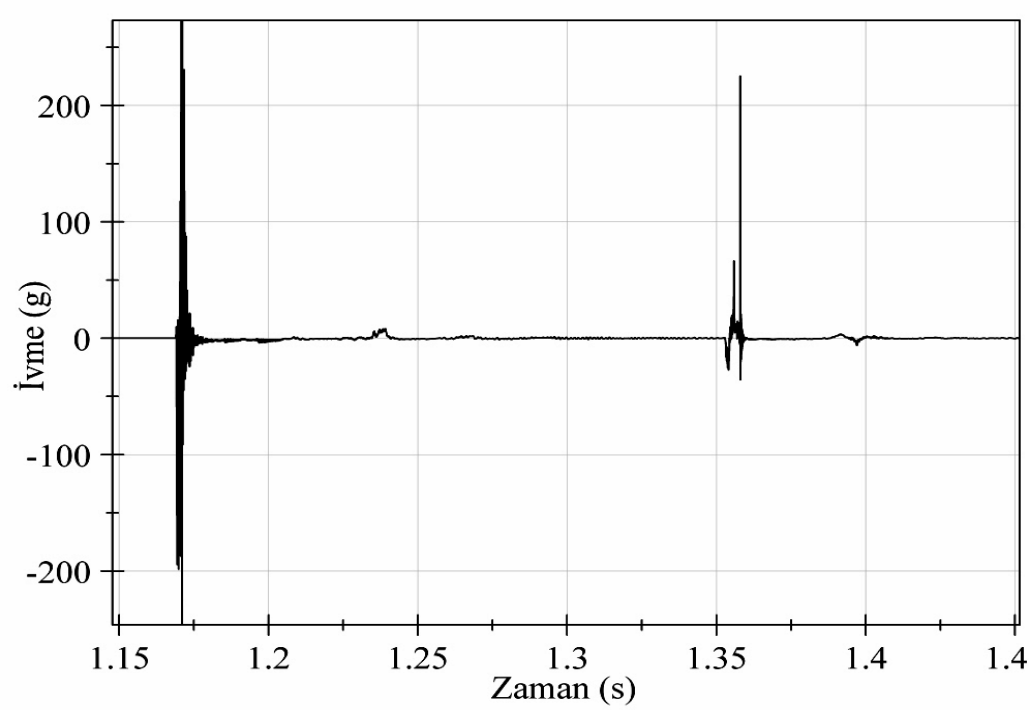


(a)

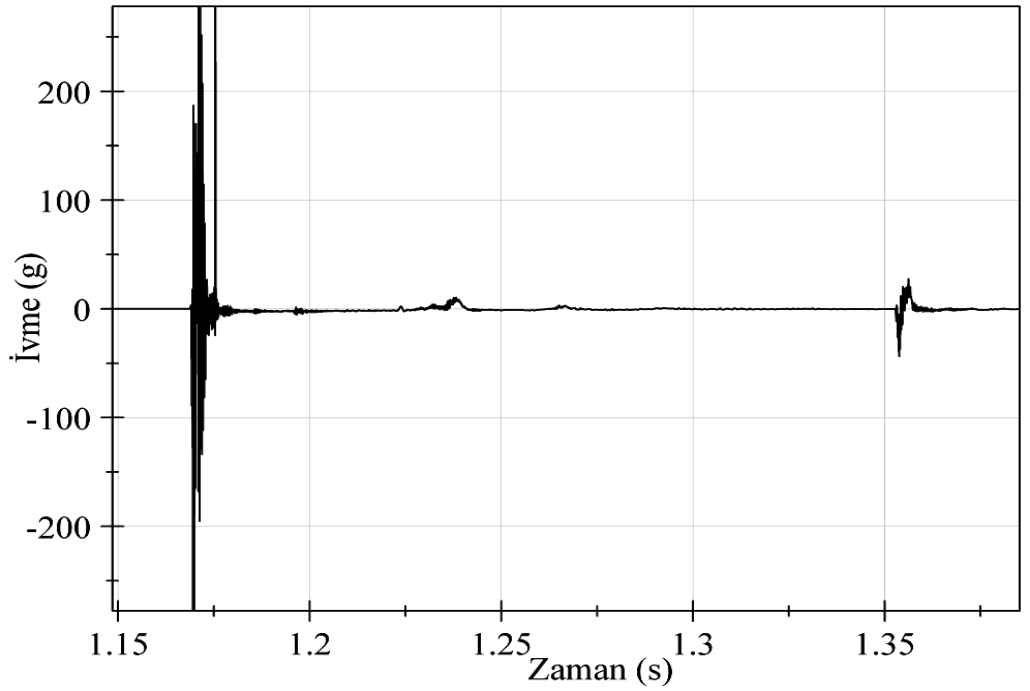


(b)

Şekil 5.42. SC9 Deney elemanın 29. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

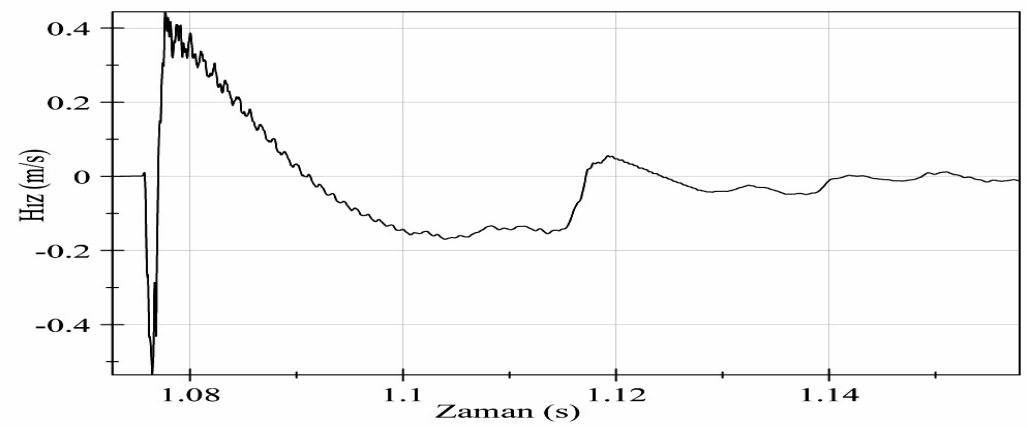


(a)

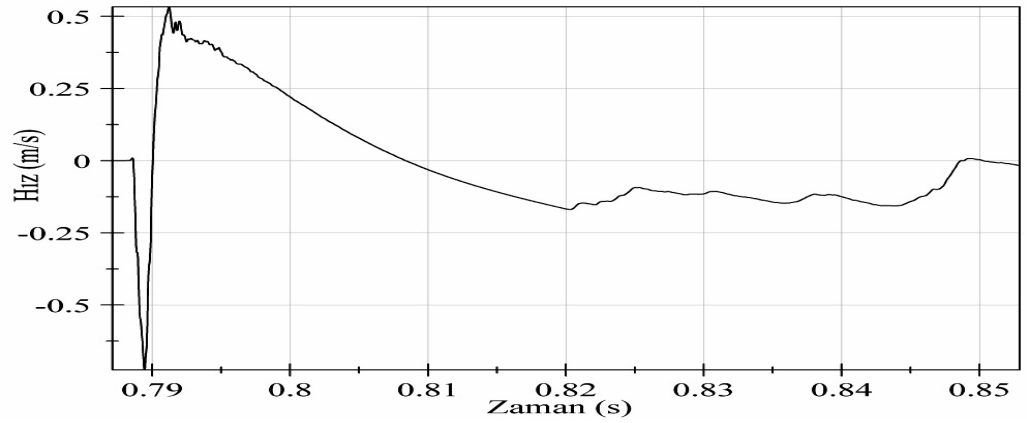


(b)

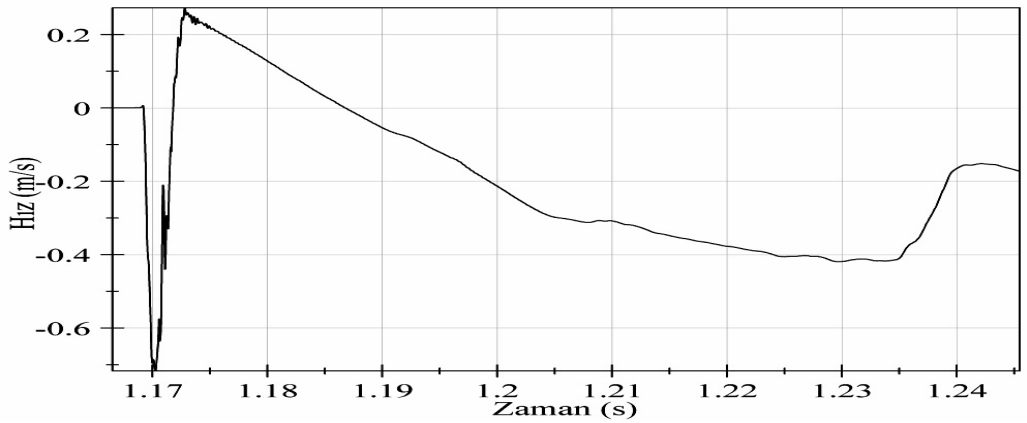
Şekil 5.43. SC9 Deney elemanın 56. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

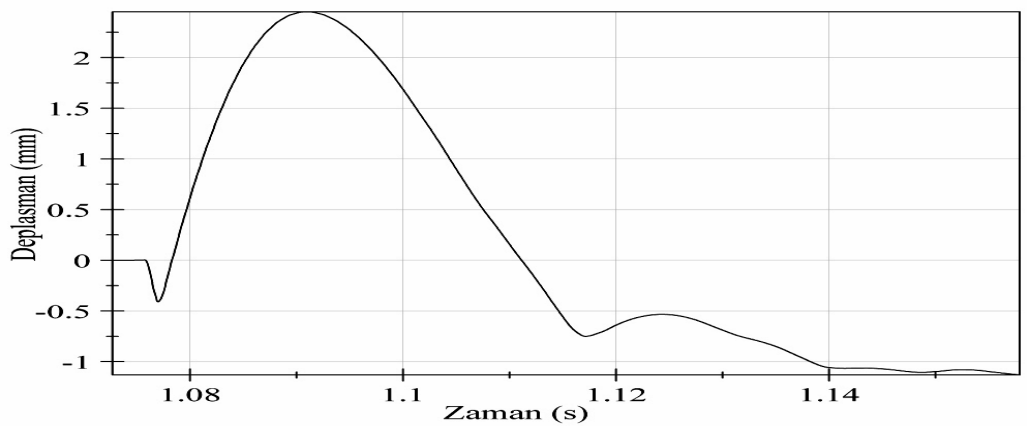


(b)

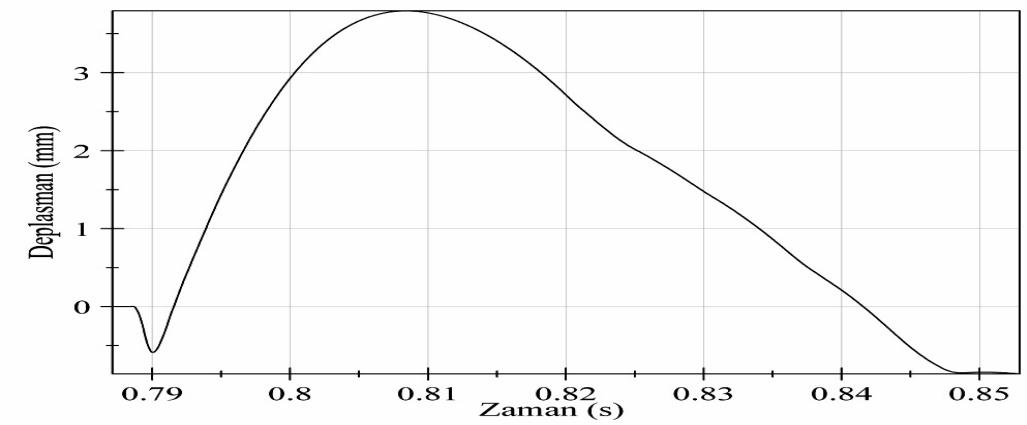


(c)

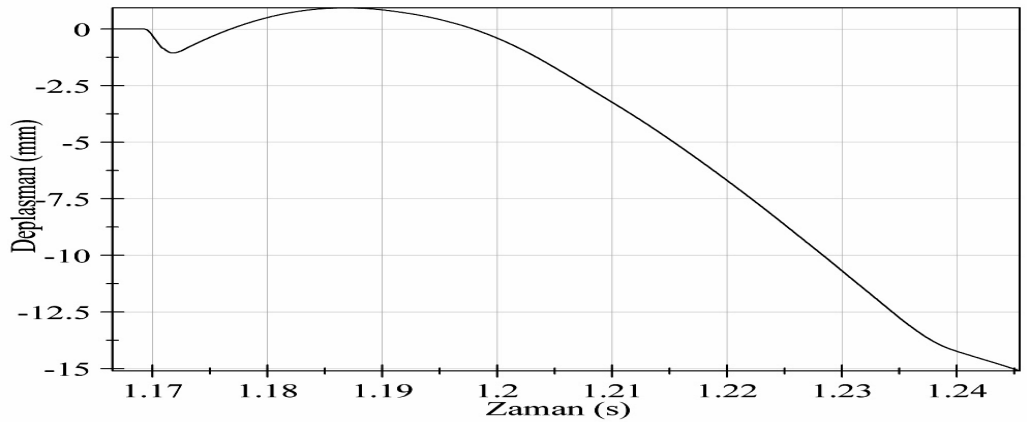
Şekil 5.44. SC9 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a) 1. düşme b) 29. düşme c) 56. düşme



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.45. SC9 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 1. düşme b) 29. düşme c) 56. düşme

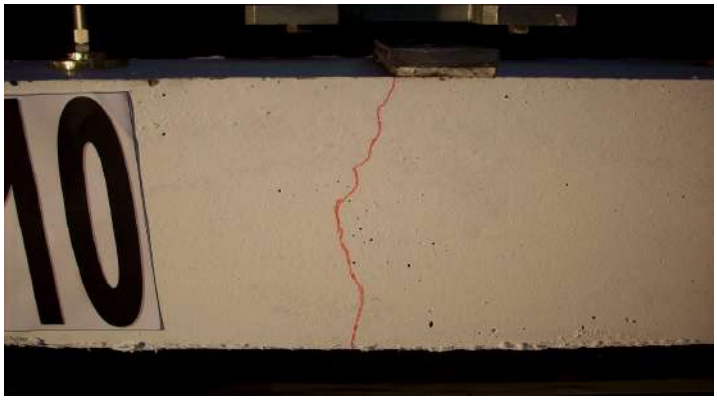


Resim 5.36. SC9 Deney elemanı göçme durumu

5.11. SC10 Deney Elemanı

Deney elemanı SC10 550 mm yükseklikten düşürülen ağırlık ile test edilmiştir. Deney elemanı yüksek dayanımlı beton ile üretilmiştir.

Deneyde toplam 90 düşme yapılmıştır. Çekiç düşme zamanı 393 ms olarak ölçülmüştür. Eleman ilk hasarı 79'uncu düşmede almıştır (Resim 5.37). Daha sonra düşme sayısı arttıkça agrega ve matris birbirinden ayrılmaya başlamıştır (Resim 5.38). Göçme durumunda CFRP bağlantısı haricinde iki yüzey arasında bir bağlantı kalmamıştır (Resim 5.39). Agrega ile matris arasındaki bağlantı kalmamasına rağmen eleman 2 parçaya ayrılarak göçmemiş ve CFRP deney elemanının bütünlüğünü korumuştur. Epoksi ve CFRP ile oluşan lamine kısım elemanı ayakta tutmuştur. Her düşme için ölçülen ivme ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 5.11'de verilmiştir. Elde edilen değerlerle hasarsız durum, ilk hasar durumu ve göçme durumuna oluşan 2. düşme, 79. düşme ve 89. düşmeye ait grafikler çizilmiştir (Şekil 5.46, Şekil 5.46, Şekil 5.47, Şekil 5.48, Şekil 5.49). Deney elemanın göçme anında alınan video görüntülerinin analizi sonucunda çekicin çarpma anı ve göçme durumu Resim 5.40'de verilmiştir.



Resim 5.37. SC10 Elemanında oluşan ilk hasar



Resim 5.38. SC10 Elemanının göçme durumu



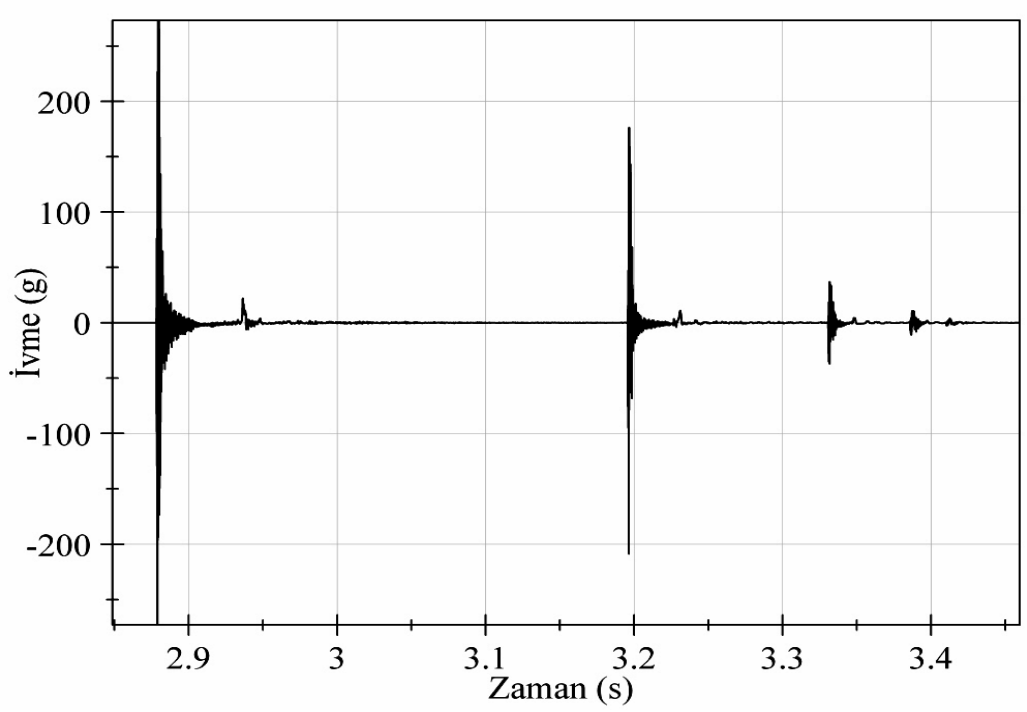
Resim 5.39. SC10 Elemanının agrega-matris görünümü

Çizelge 5.11. SC10 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar

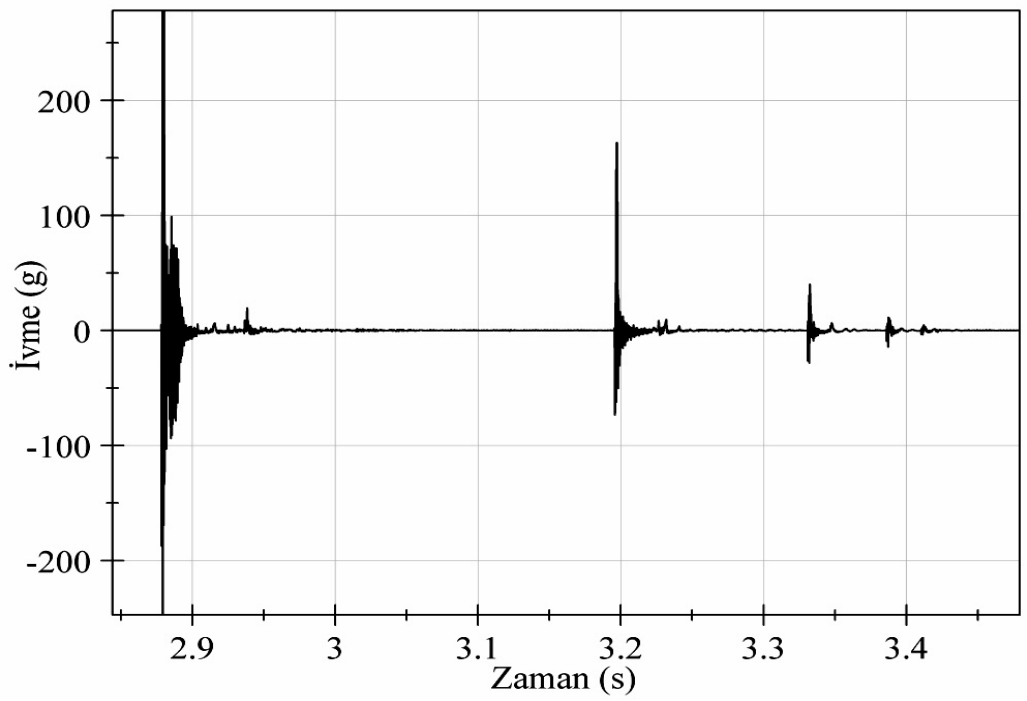
Eleman	Düşme No	Sol İvme Ölçer		Sağ İvme Ölçer	
		Min İvme	Max ivme	Min İvme	Max İvme
SC10	1	-208,53	218,21	-201,74	222,92
	2	-262,42	268,20	-249,65	270,00
	3	-253,36	257,23	-162,65	198,14
	4	-251,26	258,56	-224,01	218,68
	5	-252,18	255,47	-167,31	258,00
	6	-252,65	256,21	-189,87	214,67
	7	-213,17	258,08	-220,25	203,48
	8	-222,65	256,37	-150,49	191,74
	9	-268,94	266,39	-256,19	265,92
	10	-231,22	244,43	-222,74	212,25
	11	-235,68	251,58	-246,34	197,56
	12	-252,98	257,78	-201,40	190,41
	13	-251,24	256,21	-156,25	120,50
	14	-234,42	252,35	-209,17	203,67
	15	-237,26	247,07	-222,85	250,04
	16	-251,18	257,35	-196,56	181,58
	17	-219,32	251,55	-157,03	199,57
	18	-236,48	251,98	-162,87	203,80
	19	-245,88	256,70	-216,31	188,18
	20	-251,38	257,25	-221,20	247,10
	21	-249,15	241,23	-197,22	174,25
	22	-250,68	257,00	-222,82	200,06
	23	-199,40	255,33	-182,36	203,08
	24	-251,11	238,28	-157,31	147,29
	25	-204,42	220,76	-160,58	238,78
	26	-216,26	257,90	-225,73	178,07
	27	-250,68	256,22	-232,04	170,08
	28	-245,22	259,18	-169,60	189,66
	29	-211,15	233,43	-181,00	187,90
	30	-250,28	257,83	-152,62	134,12
	31	-250,77	247,07	-210,48	208,36
	32	-194,48	253,32	-194,59	210,67
	33	-251,38	257,31	-236,37	220,78
	34	-246,21	243,09	-209,69	205,72
	35	-214,64	253,66	-148,02	199,85
	36	-219,22	202,43	-230,70	181,14
	37	-249,93	248,38	-208,71	188,47
	38	-253,09	259,01	-222,88	179,79
	39	-215,72	229,41	-221,73	110,56
	40	-234,68	254,37	-146,35	168,08
	41	-217,21	256,20	-204,06	211,91
	42	-248,63	248,55	-237,58	257,50
	43	-193,95	215,14	-202,51	159,69
	44	-235,26	236,35	-195,01	218,14
	45	-183,68	229,45	-154,92	204,73

Çizelge 5.11. SC10 Deney elemanı için deneyden elde edilen sonuçlar(Devam)

SC10	46	-241,25	256,76	-185,99	149,08
	47	-106,47	196,66	-143,64	230,12
	48	-228,84	251,32	-149,03	219,92
	49	-208,67	254,37	-184,56	184,93
	50	-174,64	155,17	-164,33	195,78
	51	-210,67	234,52	-218,43	208,02
	52	-240,69	242,35	-170,75	175,17
	53	-239,89	231,36	-215,72	152,06
	54	-235,24	227,18	-169,47	229,72
	55	-133,58	104,85	-164,49	158,90
	56	-197,74	222,21	-173,32	218,19
	57	-234,30	236,39	-200,51	246,43
	58	-210,52	234,43	-176,33	145,73
	59	-239,29	222,11	-174,71	249,73
	60	-219,25	230,96	-219,85	248,22
	61	-213,34	216,42	-211,87	243,94
	62	-132,43	186,90	-159,01	169,09
	63	-206,32	253,22	-150,79	201,45
	64	-203,25	216,21	-228,77	200,56
	65	-187,78	229,71	-168,84	195,17
	66	-245,90	227,08	-250,61	226,25
	67	-116,26	182,26	-173,14	151,20
	68	-204,67	254,02	-177,64	187,98
	69	-247,20	236,28	-224,60	224,50
	70	-220,22	220,12	-215,05	211,16
	71	-244,71	226,95	-236,58	219,15
	72	-198,31	211,36	-215,89	207,65
	73	-182,22	201,47	-200,45	229,50
	74	-195,74	180,38	-157,79	165,78
	75	-253,11	205,21	-251,72	222,03
	76	-182,61	233,45	-233,94	217,88
	77	-230,82	251,65	-204,12	201,59
	78	-229,71	252,39	-227,35	220,11
	79	-257,72	263,85	-259,87	264,25
	80	-197,67	242,48	-201,60	205,36
	81	-191,78	175,43	-168,27	178,84
	82	-245,86	225,35	-240,31	215,61
	83	-218,77	227,33	-231,15	224,38
	84	-241,72	225,05	-214,28	204,56
	85	-233,06	219,47	-219,65	216,51
	86	-238,85	234,43	-223,14	209,94
	87	-218,25	244,15	-234,23	206,98
	88	-220,60	254,85	-252,23	181,84
	89	-269,44	257,39	-258,04	256,44
	90	-209,71	194,41	-236,34	225,01

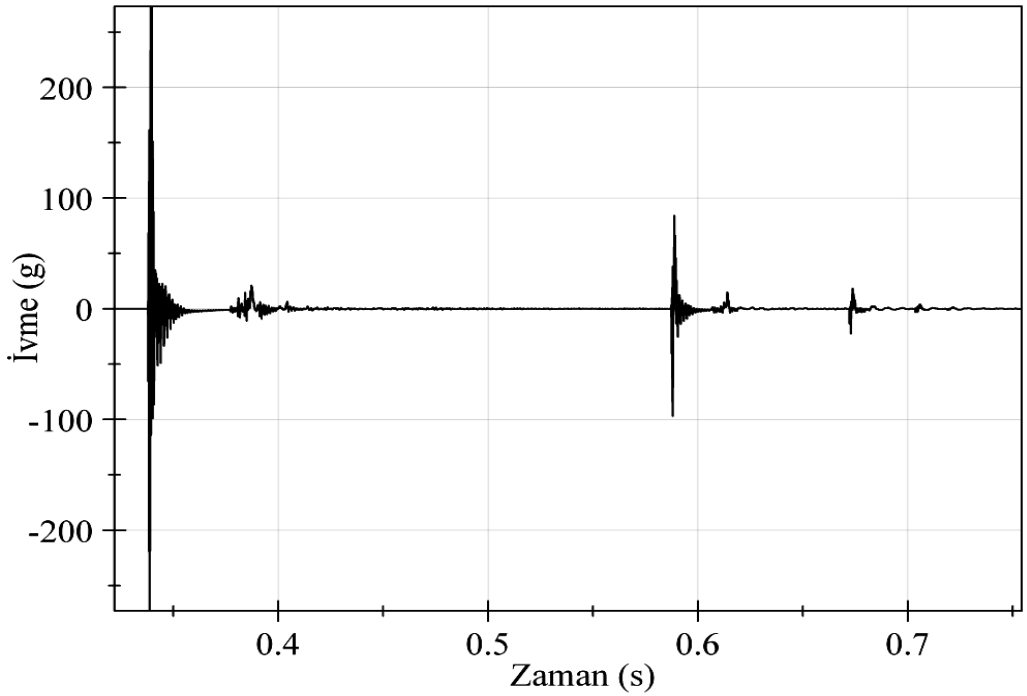


(a)

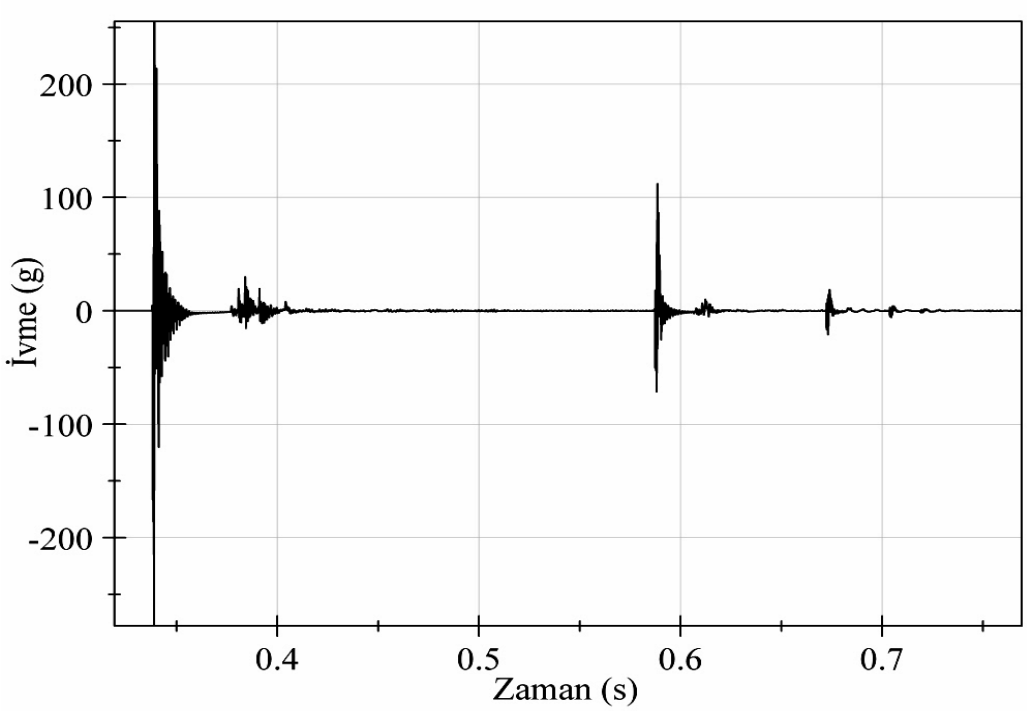


(b)

Şekil 5.46. SC10 Deney elemanının 2. düşme(hasarsız) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

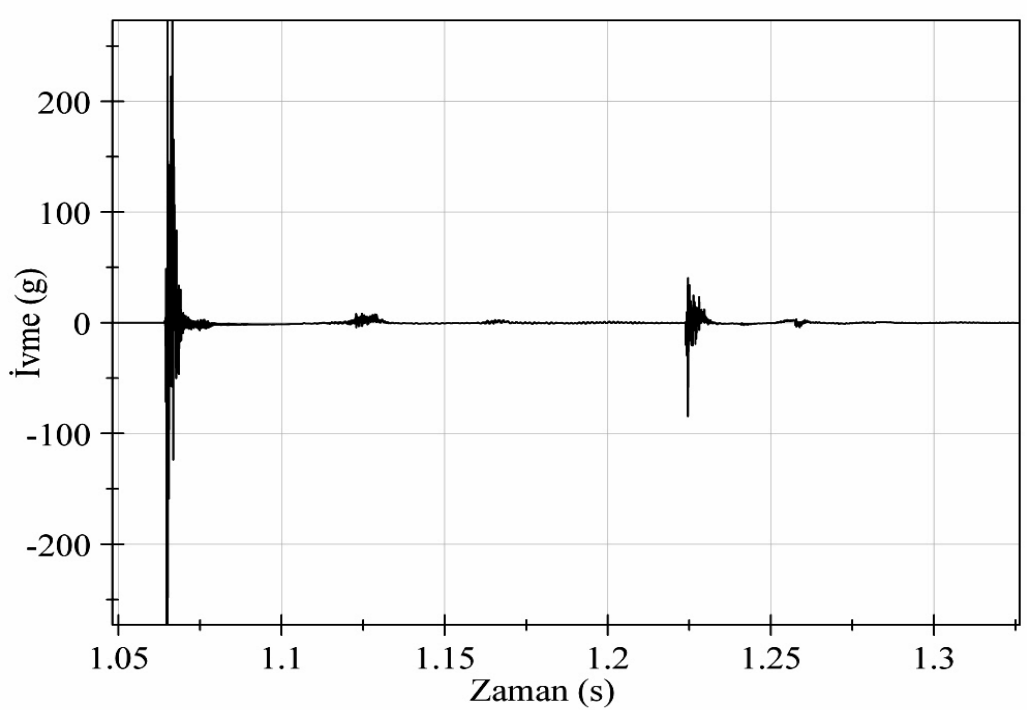


(a)

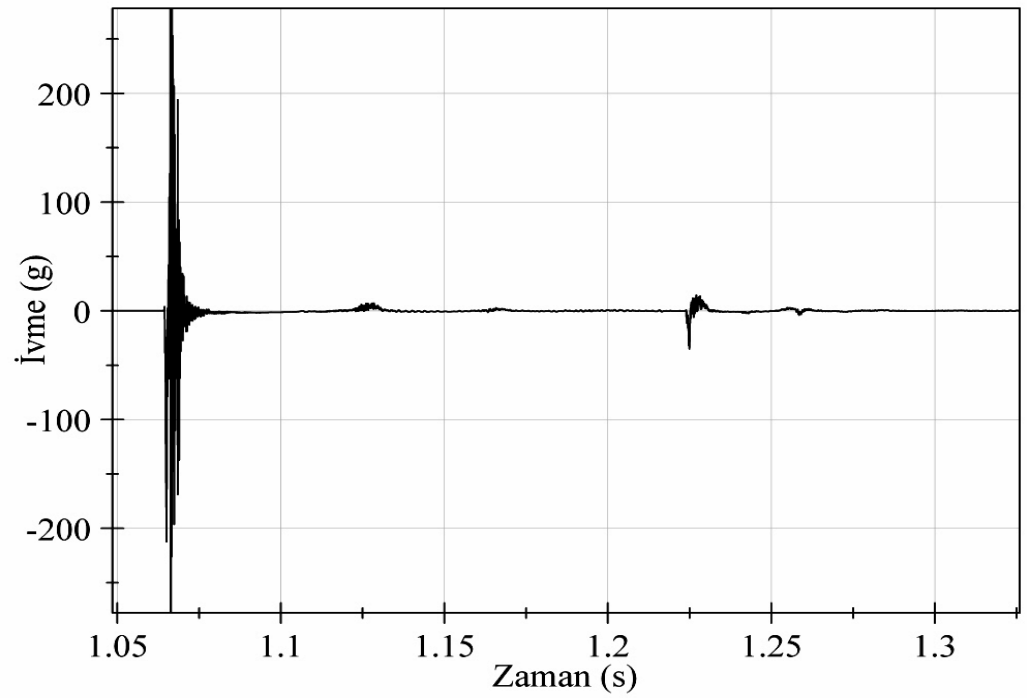


(b)

Şekil 5.47. SC10 Deney elemanın 79. düşme(ilk hasar) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer

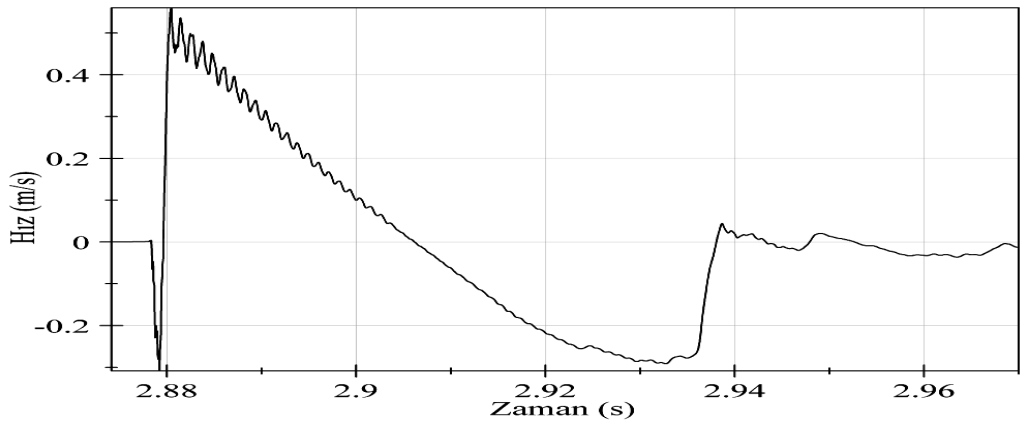


(a)

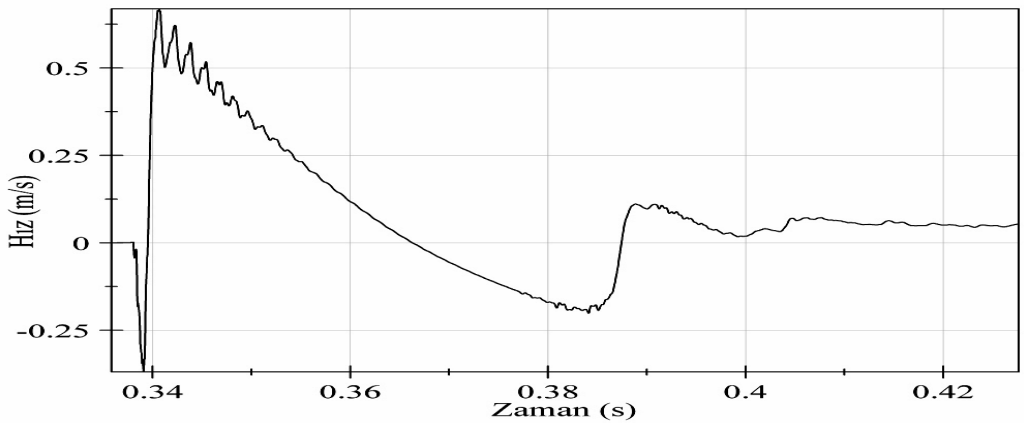


(b)

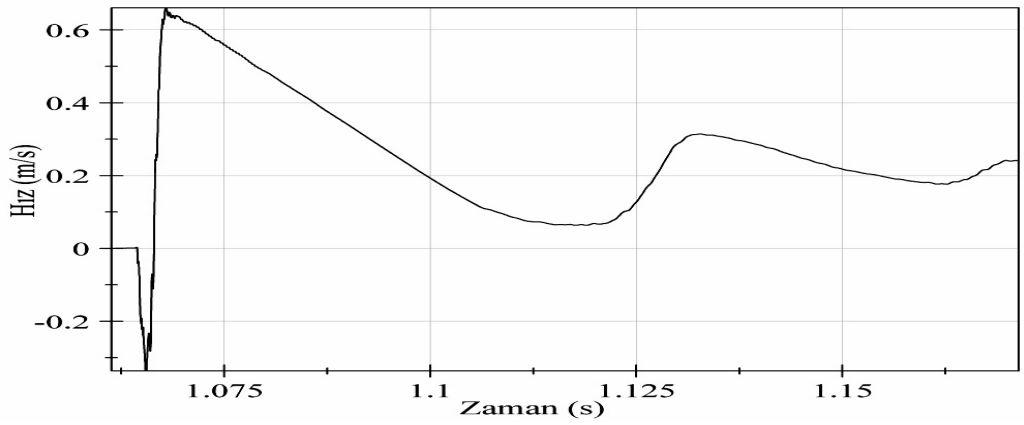
Şekil 5.48. SC10 Deney elemanın 89. düşme(göçme) ivme-zaman grafikleri
a) Sol ivmeölçer b) Sağ ivmeölçer



(a)

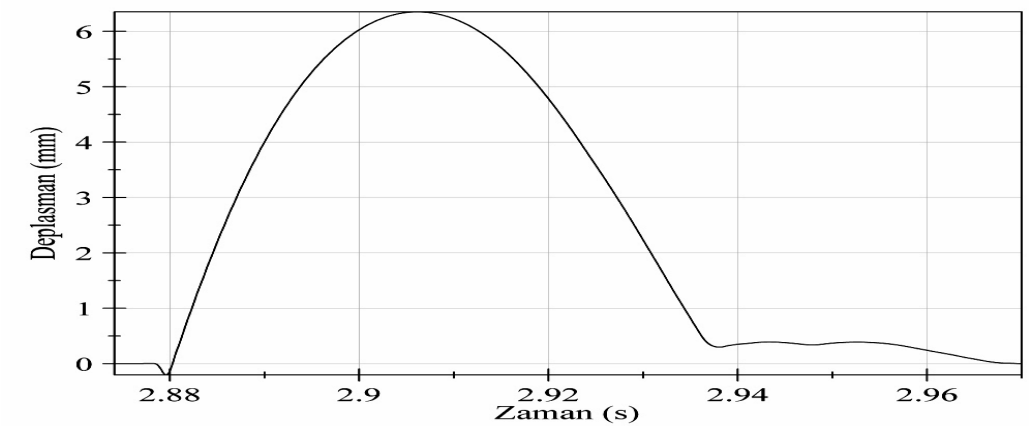


(b)

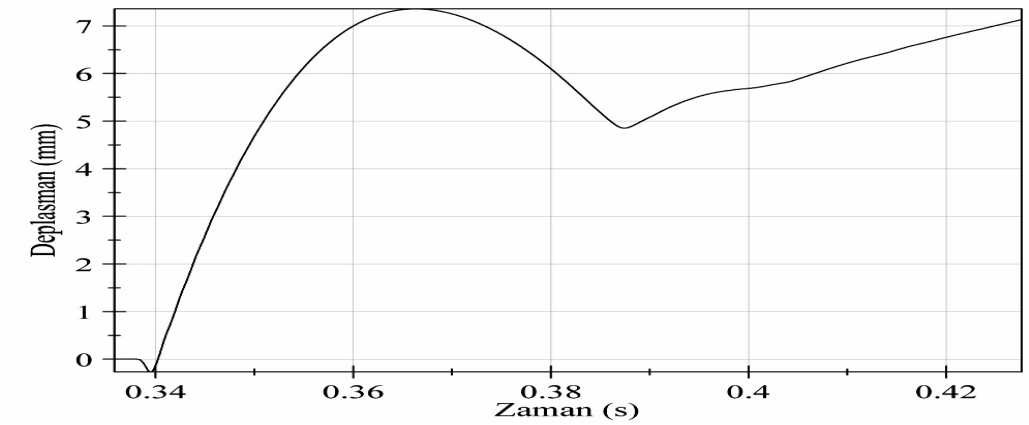


(c)

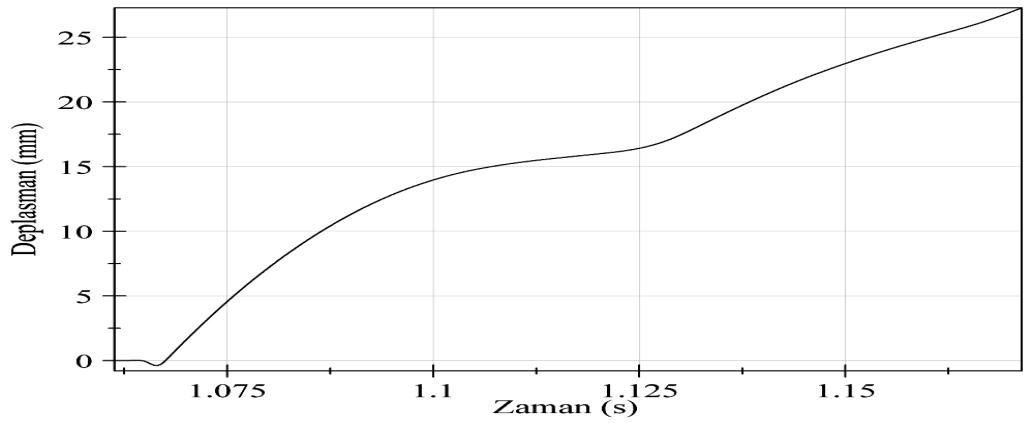
Şekil 5.49. SC10 Deney elemanı ilk çarpma anı hız-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 79. düşme c) 89. düşme



(a)

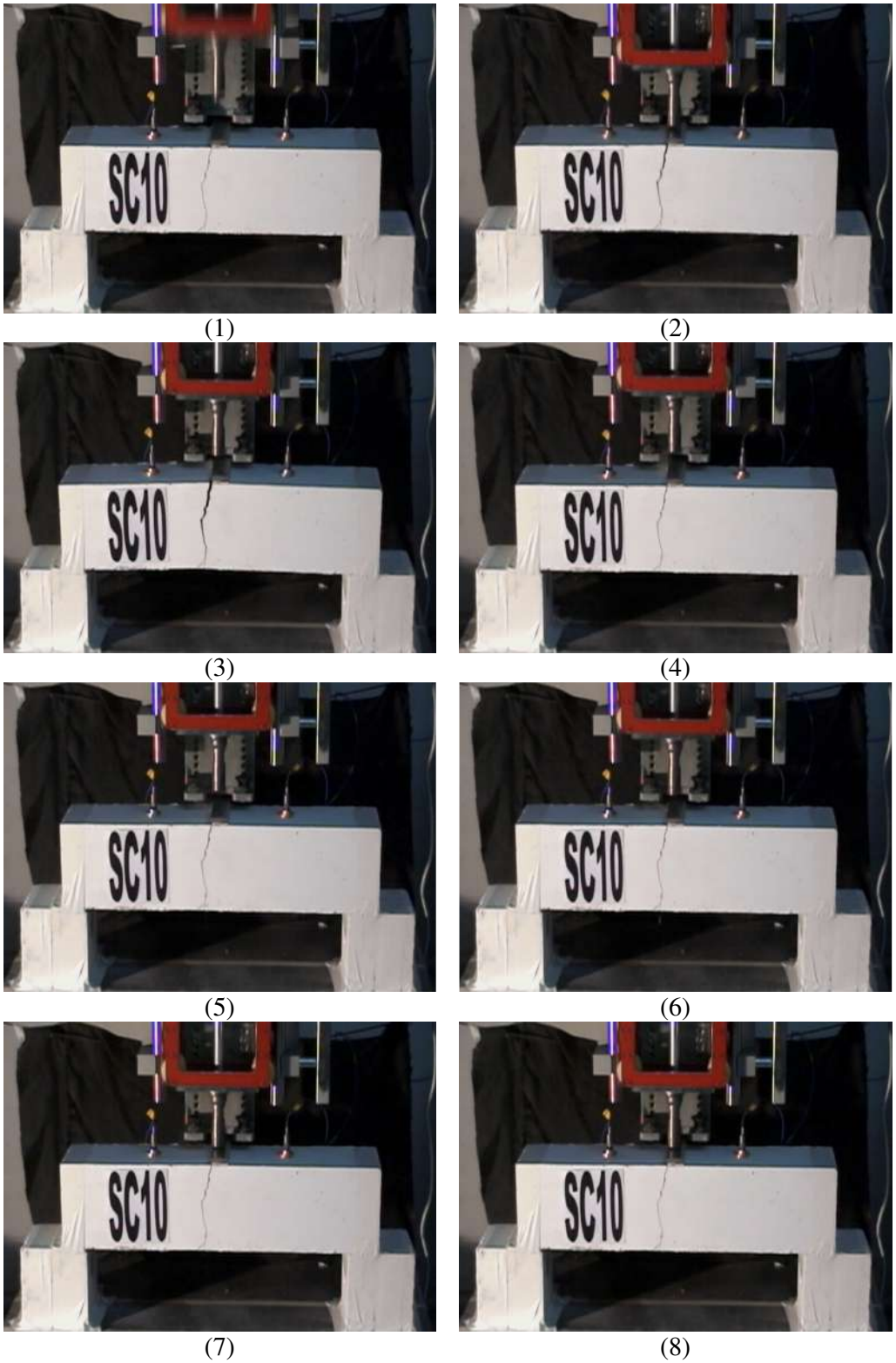


(b)



(c)

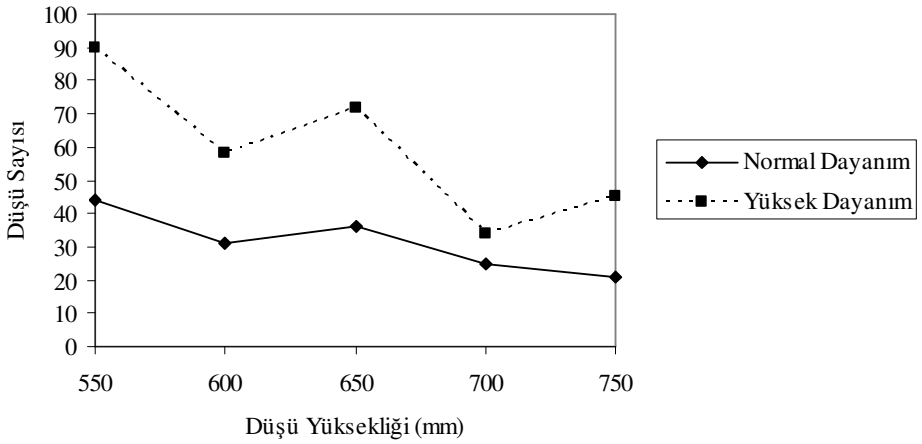
Şekil 5.50. SC10 Deney elemanı ilk çarpma anı deplasman-zaman grafikleri
a) 2. düşme b) 79. düşme c) 89. düşme



Resim 5.40. SC10 Deney elemanı göçme durumu

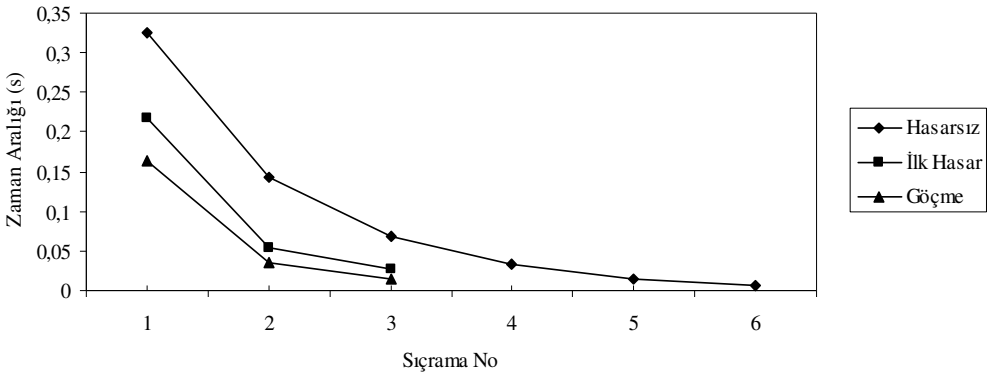
5.12. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneyler tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçlar hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Toplam düşme sayısı, deney elemanlarının ilk hasarı alması ve göçme biçimi düşme yüksekliği ve beton dayanımı ile yakından ilişkilidir. Düşme sayısının düşme yüksekliği ve beton dayanımına göre değişimi Şekil 5.51'de grafik olarak gösterilmiştir.

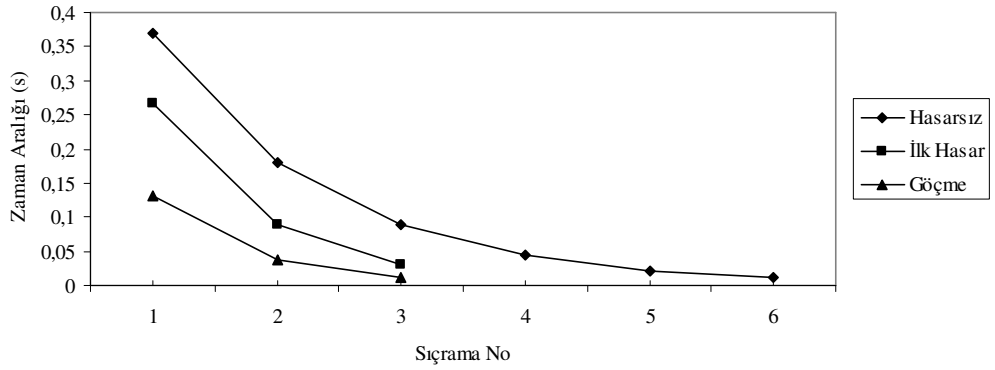


Şekil 5.51. Düşme sayısı, düşme yüksekliği ve beton dayanımının karşılaştırması

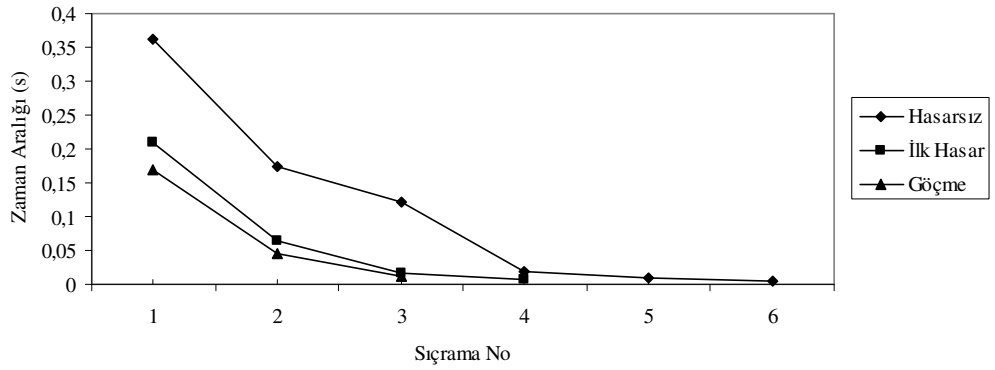
Deneyler tamamlandıktan sonra, çekicin deney elemanı üzerindeki hareketi gözlemlenmiştir. Çarpma etkisi çekice her düşmede bir sıçrama hareketi kazandırmaktadır. Bu sıçrama hareketi azalarak sönümlenmektedir. Deneylerden elde edilen grafiklerde sıçrama hareketi ve sönümlenme çok net görülmektedir. Bu hareket tamamlandıktan sonra hareket boyunca meydana gelen sıçrama hareketleri arasındaki zaman değeri sıçrama sayısıyla karşılaştırılmış ve bu işlem hasarsız, ilk hasar ve göçme durumları için ayrı ayrı belirlenmiştir. Grafiksel olarak Şekil 5.52 ile Şekil 5.61 arasında verilmiştir.



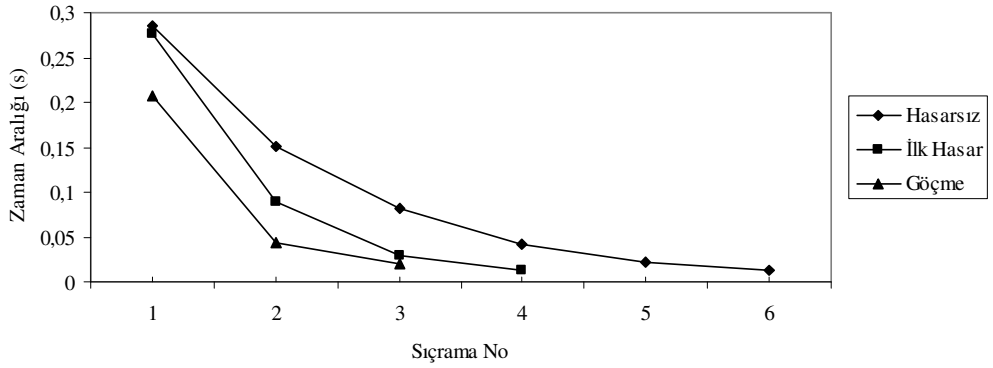
Şekil 5.52. SC1 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



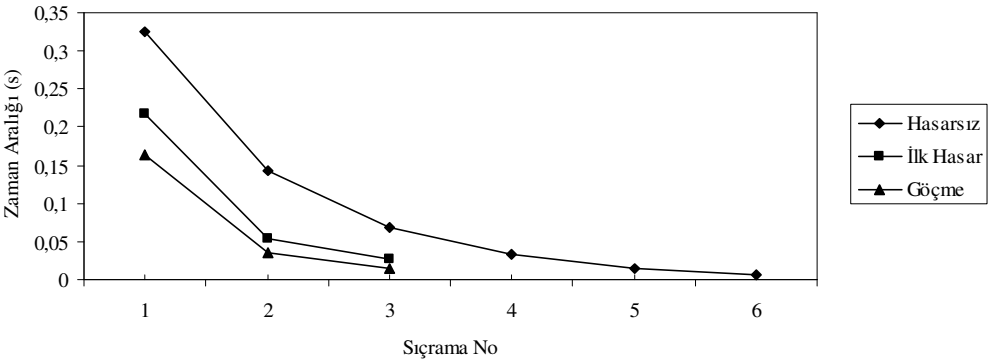
Şekil 5.53. SC2 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



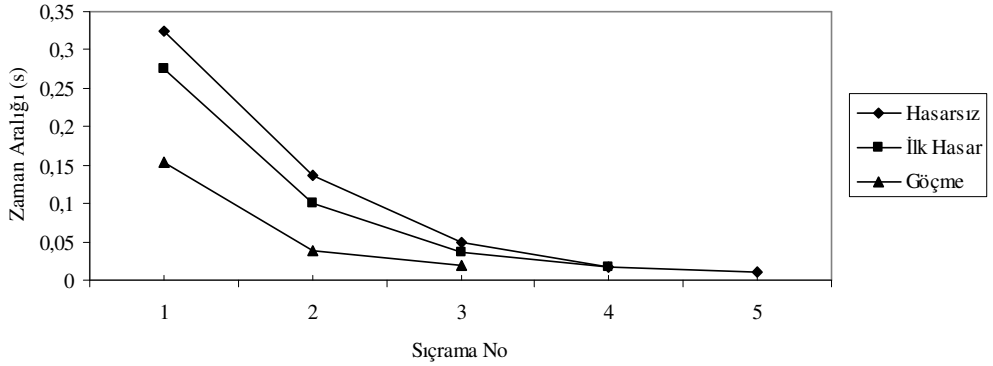
Şekil 5.54. SC3 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



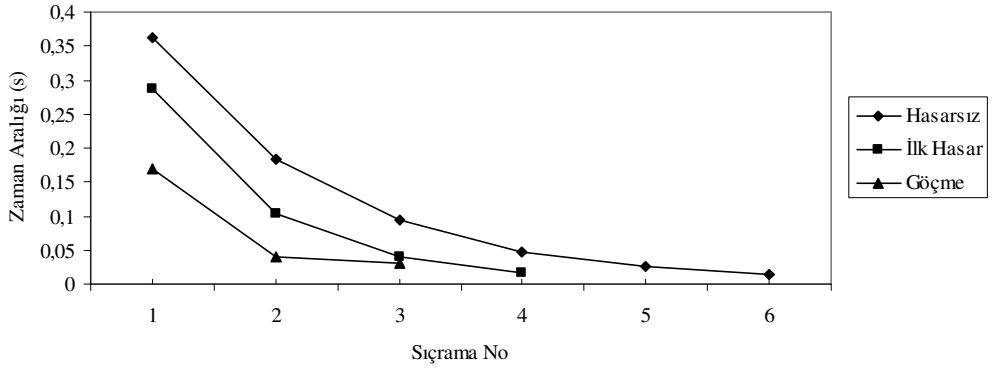
Şekil 5.55. SC4 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



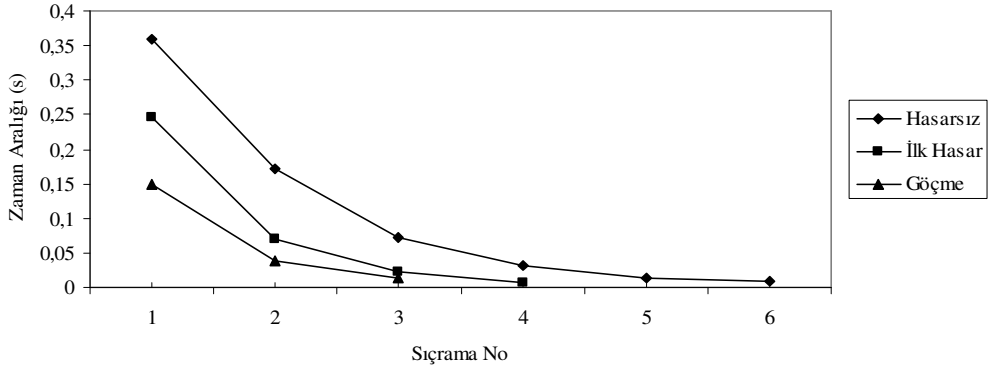
Şekil 5.56. SC5 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



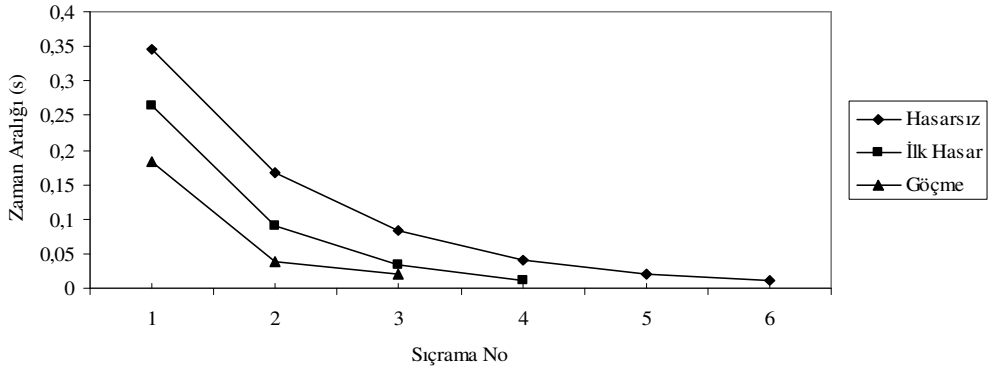
Şekil 5.57. SC6 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



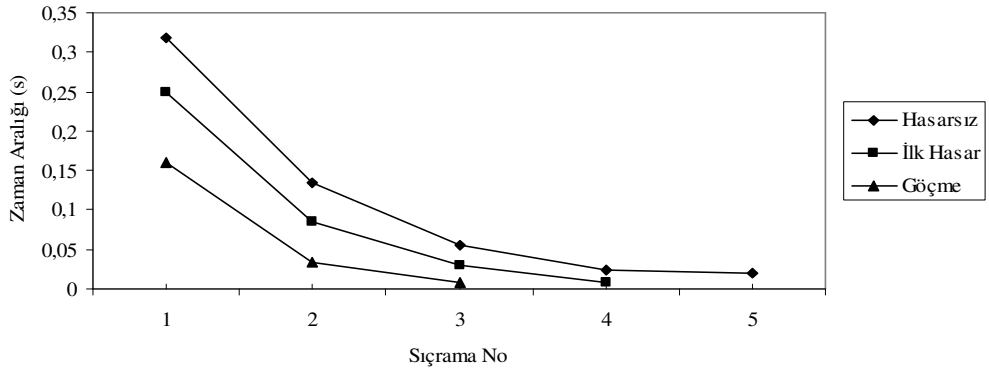
Şekil 5.58. SC7 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



Şekil 5.59. SC8 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



Şekil 5.60. SC9 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi



Şekil 5.61. SC10 Deney elemanı sıçrama-zaman aralığı ilişkisi

Sıçrama-zaman aralığı grafikleri incelendiğinde sıçrama sayısının düşme yüksekliğine bağlı olarak değiştiği fakat zaman aralıklarının benzer olduğu görülmüştür. Bu durum bize beton yapısının tüm deney elemanlarında birbirine yakın özelliklerde olduğunu göstermektedir.

Çekicin deney elemanı ile ilk etkileşiminde meydana gelen ivme, yerçekimi ile aynı doğrultuda olup elemanda aşağı yönlü bir deformasyon oluşturmuştur. Deformasyon grafiklerinden görüldüğü gibi deplasman önce eksi değer almakta fakat bu değer elemanın hasarsız, ilk hasar ve göçme durumlarında oldukça küçük değerde kalmaktadır. Bu deplasman değeri elemanın göçme haline kadar çok küçük bir artış göstermiştir. Kiriş elemanın çekme bölgesi CFRP ile güçlendirildiği için eleman çekicin çarpma yönüne ters olarak hareket etmeye çalışmaktadır. Bu kamera ile alınan görüntülerde ve deformasyon grafiklerinden net bir şekilde görülmektedir.

Deney elemanlarına monte edilen ivmeölçerlerden alınan değerlerle çizilen grafiklerden: eleman hasar almadan önce çekicin sıçrama tekrarı ilk düşmelerde fazla iken düşme sayısı arttıkça sıçrama tekrarının da azaldığını görülmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi düşme sayısı arttıkça gözle görülmeyen fakat varlığını bildiğimiz ve artan bir şekilde devam eden iç çatlaklar oluşmaktadır. Çatlaklar deney elemanının dış yüzeyine ulaştığında görülmektedir. Çatlaklar elemanın üst kısmından başlamakta ve CFRP yapıştırılmış alt yüzeye doğru ilerlemektedir. CFRP kullanılmadan yapılan

deneysel çalışmalarda ise tam tersi bir çatlak gelişimi gözlenmiştir. Bununla birlikte ilk hasar alma için gerekli düşme sayısı artmakta ve deney elemanının göçmesi için gerekli düşme sayısı da önemli oranda artmaktadır. Deney elemanın göçme şekli ise CFRP kullanılmayan elemanlara göre farklılık göstermektedir. CFRP kullanılmayan elemanlarda göçme ani gerçekleşmiş ve çatlak oluşan noktadaki yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmıştır. CFRP ile güçlendirilmeyen deney elemanları deney sonrasında kırılma yüzeyinden iki parçaya ayrılarak tamamen göçmüş ve sistem stabilitesini kaybetmiştir. CFRP kullanılan deney elemanlarında ise kırılma düzlemi oluşumunu tamamlayarak beton kirişi iki parçaya ayırmasına rağmen eleman ayakta kalmaya devam etmektedir. CFRP şerit beton yüzeyden ayrılmadan sistemin stabilitesini korumasını sağlamış ve tamamen göçmesine engel olmuştur. Bütün deneylerde CFRP ile güçlendirilen kiriş elemanlarda agrega yüzeyi ile matris birbirinden ayrılmasına rağmen CFRP epoksi ve beton tabakası birbirinden ayrılmamaktadır. Normal dayanımlı elemanlarda genellikle agrega matris ayrımı agrega yüzeylerinin matristen ayrılması ile gerçekleşmiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda ise ince malzeme yoğunluğu fazla olması nedeni ile agregalar matristen ayrılmadan kırılmışlardır. İvme grafikleri, sıçrama tekrarı, düşme yüksekliği ve beton dayanımı ile direk bağlantılıdır. Bu durum elemanın enerji yutma kapasitesini göstermektedir.

Deneylerden elde edilen ivme değerleri ile bu değerlerin integralinin alınması ile elde edilen hız ve deplasman değerlerinin maksimum ve minimum değerleri hasarsız ilk düşme, ilk hasarın gözlendiği düşme ve göçmenin gerçekleştiği düşmeler için Çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Deneylerden elde edilen maksimum ve minimum ivme, hız ve deplasman değerleri

		Hasarsız			İlk Hasar			Göçme		
		İvme m/s^2	Hız m/s	Deplas. mm	İvme m/s^2	Hız m/s	Deplas mm	İvme m/s^2	Hız m/s	Deplas mm.
SC1	Min.	-277,78	-0,69	-0,06	-224,81	-0,73	-0,77	-248,92	-0,87	-1,66
	Max.	277,23	0,41	4,65	273,13	0,55	6,52	278,06	0,34	4,87
SC2	Min.	-239,81	-0,63	-0,50	-239,10	-0,76	-1,04	-265,12	-0,90	-1,33
	Max.	276,88	0,48	5,30	254,98	0,66	9,01	249,75	0,37	4,22
SC3	Min.	-275,81	-0,61	-0,55	-245,19	-0,70	-0,73	-232,89	-0,73	-1,06
	Max.	268,23	0,50	5,66	270,07	0,60	7,21	258,47	0,43	3,88
SC4	Min.	-162,34	-0,41	-0,30	-219,65	-0,82	-0,68	-277,71	-0,83	-12,21
	Max.	259,65	0,37	2,58	252,18	0,68	8,31	278,01	0,50	4,93
SC5	Min.	-156,55	-0,65	-0,57	-158,65	-0,75	-9,66	-277,78	-0,85	-23,82
	Max.	270,67	0,49	4,51	273,00	0,52	5,24	278,09	0,19	0,0
SC6	Min.	-273,88	-0,30	-0,22	-211,17	-0,40	-0,29	-272,92	-0,68	-1,08
	Max.	278,09	0,84	28,42	257,09	1,04	30,47	278,09	0,69	13,20
SC7	Min.	-263,62	-0,56	-0,42	-263,91	-0,22	-0,17	-277,01	-0,37	-0,49
	Max.	270,02	0,53	4,34	258,22	1,07	41,6	272,01	0,87	27,15
SC8	Min.	-277,78	-0,37	-11,49	-270,82	-0,75	-1,42	-277,78	-0,70	-1,15
	Max.	278,09	0,49	4,32	266,72	0,61	7,49	273,00	0,57	8,04
SC9	Min.	-248,91	-0,53	-1,13	-207,04	-0,72	-0,86	-270,11	-0,71	-15,10
	Max.	236,53	0,44	2,45	252,86	0,53	3,79	261,80	0,27	0,93
SC10	Min.	-262,42	-0,30	-0,20	-259,87	-0,36	-0,26	-269,44	-0,33	-0,39
	Max.	270,00	0,56	6,35	264,25	0,66	7,35	257,39	0,66	27,27

6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZ

6.1. Genel Bilgi

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, yaygın olarak kullanılan ticari bir sonlu elemanlar programı ile oluşturulan bilgisayar modelinden elde edilen ivme, hız ve deplasman değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu nedenle kapasitesi ve yetenekleri çalışmamıza uygun olan, mühendislik uygulamalarında ve akademik çalışmalarda yaygın olarak tercih edilen Abaqus sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Abaqus sonlu eleman yazılımı kullanılarak bu çalışmada incelenen deneysel çalışmanın bir modeli oluşturulmuştur.

Abaqus'ün kalbi çözücü modülleridir. Abaqus/Standard ve Abaqus/Explicit Abaqus'ün komple ve birbirine entegre çözücüleridir. Abaqus/Standard genel amaçlı sonlu elemanlar modülüdür. Kullanıcıya çok değişik uygulamalarda çözüm olanağı sağlar. Bunun yanında birçok yapısal olmayan uygulamalarda da kullanılabilir. Abaqus/Explicit açık (explicit) dinamik sonlu elemanlar çözücüsüdür. Abaqus/CAE(Complete Abaqus Environment) Abaqus'ün tüm modelleme, çözümü takip etme, çözümü yönetme ve sonuçları inceleme özelliklerine sahip tüm ön ve son işlemlerin yapıldığı ara yüzüdür[1].

Teknolojik gelişmeler ile birlikte, çarpma olaylarında kontak etkileşimleri farklı bilimsel çalışmalarda çözülmesi gereken önemli detaylar haline gelmiştir[12]. Dinamik özellikte olan deneysel çalışmanın analizi için, Abaqus yazılımının bir parçası olan Abaqus/Standart kullanılmıştır. Bu ürün geçici dinamik olaylar ile patlama ve benzeri tarzdaki olayların analizine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu özelliği ile çarpma tarzındaki ani değişiklikler içeren karmaşık olayların modellenmesinde çok fazla kullanılmaktadır[12, 15].

Abaqus programı, birçok mühendislik uygulamasında tercih edilen, gelişmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Bu program öncelikli olarak dıştan etki eden yükler altındaki yapıların ve katıların davranışlarının modellenmesin de kullanılmaktadır.

Statik ve dinamik problemlerin çözümünde oldukça yetenekli bir programdır. Programla 2 boyutlu ve 3 boyutlu tasarım yapmak mümkün olup, sürekli ortamların şekillendirilmesinde çok geniş imkânlar sunmaktadır.

Programın çok geniş bir eleman kütüphanesi vardır. Bu da bize tasarladığımız her şeyi modellememize imkân sağlamaktadır. Parçaların arasında oluşan temas durumlarının modellenmesinde oldukça yeteneklidir. Ayrıca programın malzeme kütüphanesi de oldukça geniş olup malzeme özelliklerini girerek elastik, elastik-plastik tanımlama yapmaya imkân vermektedir. Böylelikle beton, köpük, piozoelektirik malzemeler ve daha birçok malzeme model oluşturulurken tanımlanır ve kullanılır.

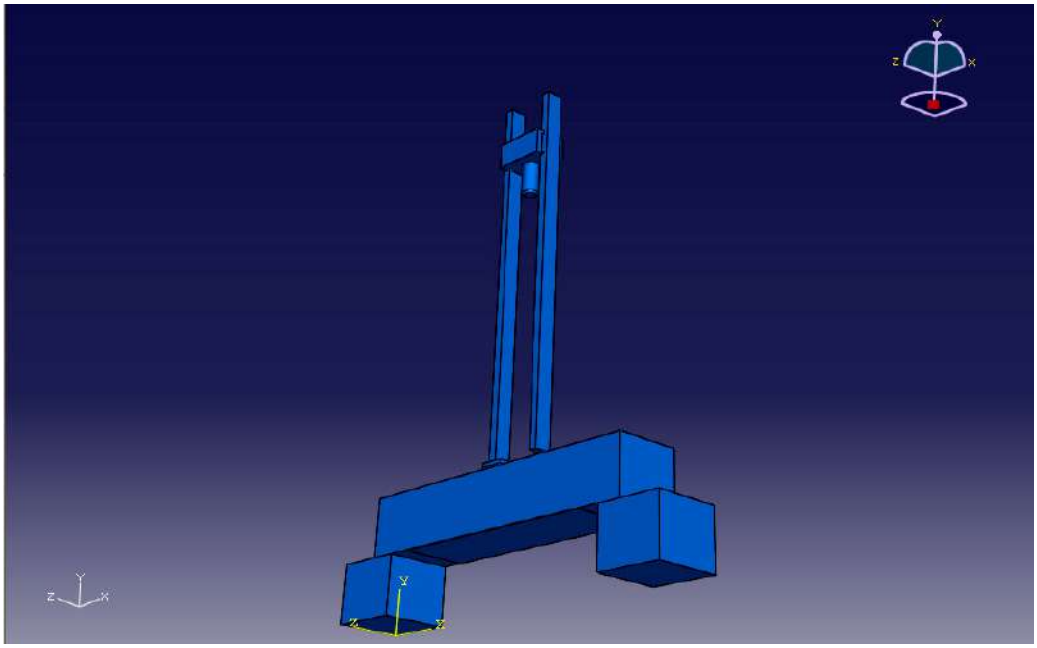
Abaqus programı, modelleme, analiz, çözüm yönetimi ve sonuç değerlendirmesi işlemlerini bir arada tek bir kullanıcı ara yüzünde sunar. Abaqus analiz modülleri için de tek bir ara yüz sunar. Model dosyaları bilgisayar tipinden bağımsızdır. Aynı dosya, Windows, Linux ve Unix tarafından kullanılabilmektedir. Uygulamaya yönelik özelleştirilebilir

Programda tanımlanan değerlerin birimleri, uzunluk-metre, kütle-kilogram, zaman-saniye, kuvvet-Newton, enerji-joule olarak girilmektedir.

6.2. Modelin Oluşturulması

Abaqus programının modelleme ara yüzü sayesinde deneyde kullandığımız düzeneğin benzeri oluşturulmuştur (Şekil 6.1).

Programla 3 boyutlu modelleme yapılmıştır. Deney elemanının boyutları birebir tanımlanmıştır. Modellenen deney elemanı, deney düzeneğinde olduğu gibi mesnetlere yerleştirilmiş ve mesnetlerde altlarından sabitlenmiştir. Çekiç sabitlenmiş iki kızak miline yataklanmıştır. Çekiç deneylerde kullanılan geometriye benzer bir geometride ve kütlesi 5,25 kg olacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 6.1. Abaqus programı ile oluşturulan model

Bilindiği gibi vurucu çekiç numune üzerine monteli olan bir çelik plaka ile etkileşime geçmekte ve yükü numune üzerine aktarmaktadır. Deneylerde ivmeölçerlerin değer okumasını sağlamak için çelik plaka ile beton deney elemanı arasına kauçuk malzeme yerleştirilmiştir. Bilgisayarda yapılan analizde de çelik plaka ve kauçuk malzemesi birebir geometriye sahip olacak şekilde modellenmişlerdir.

6.3. Malzeme Özellikleri

Deney elemanı ile birebir örtüşen model oluşturulduktan sonra programın ikinci adımı olan malzeme özelliklerinin tanımlanması yapılmıştır. Malzeme davranışı, bir modeldeki en belirsiz ve aynı zamanda tasarımın performansını etkileyen en kritik unsurlardan biridir. Bir analiz için uygun malzeme modellerini seçmek ve kullanmak çok önemlidir. Malzeme modeli seçilirken, analizin amacı, yüklemenin doğası, mevcut test verileri gibi etkenlerin dikkate alınması gerekmektedir. Malzemeler elastik malzeme olarak tanımlanmış ve buna göre değerler girilmiştir. Normal dayanımlı beton özellikleri Çizelge 6.1'de, yüksek dayanımlı beton özellikleri

Çizelge 6.2'de, çelik malzeme özellikleri Çizelge 6.3'de, kauçuk malzeme özellikleri Çizelge 6.4'de ve CFRP malzemesinin özellikler Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Normal dayanımlı beton malzemesine ait özellikler

Özellik	**Birim**	**Değer**
Yoğunluk	kg/m³	2400
Elastisite Modülü	Pa	2,8E+10
Poisson Oranı	-	0,30

Çizelge 6.2. Yüksek dayanımlı beton malzemesine ait özellikler

Özellik	**Birim**	**Değer**
Yoğunluk	kg/m³	2400
Elastisite Modülü	Pa	3,4E+10
Poisson Oranı	-	0,30

Çizelge 6.3. Çelik malzemesine ait özellikler

Özellik	**Birim**	**Değer**
Yoğunluk	kg/m³	7800
Elastisite Modülü	Pa	2,1E+11
Poisson Oranı	-	0,30

Çizelge 6.4. Kauçuk malzemesine ait özellikler

Özellik	**Birim**	**Değer**
Yoğunluk	kg/m³	1230
Elastisite Modülü	Pa	22E+6
Poisson Oranı	-	0,45

Çizelge 6.5. CFRP malzemesine ait özellikler

Özellik	**Birim**	**Değer**
Yoğunluk	kg/m³	230
Elastisite Modülü	Pa	2,8E+10
Poisson Oranı	-	0,4

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra oluşturulan model üzerinde bulunan parçalara atanmıştır. Modeli oluşturulan malzemeler belirlendikten sonra analiz aşamasına geçilmiştir.

6.4. Analiz Çalışması

Yapılan analizler deneylerde olduğu gibi 750 mm, 700 mm, 650 mm, 600 mm, 550 mm düşme yükseklikleri alınmıştır. Analize başlamadan önce analiz dinamik olduğu için hareketin başlayıp tamamlandığı ana kadar geçen zaman adımı belirlenerek programda tanımlanır.

Abaqus çözümlerinde iki adet zaman tanımı kullanır. Step time: Tek bir çözüm adımının zamanıdır. Total time: Abaqus'de o model için tanımlanmış tüm çözüm adımlarının zamanlarının toplamına denk gelen zamandır.

Zaman, programın özelliğinden dolayı iki adımda tanımlandı. Birinci adımda çekicin düşmeye başladığı andan deney elemanına temas etmeden hemen önceye kadar geçen zaman aralığı tanımlanmıştır. İkinci adımda ise temas anından başlayarak hareket sönümleninceye kadar devam eden zaman aralığı tanımlanmıştır.

Zaman aralıkları belirlenirken zaman adımlarına bölünmüştür. Birinci adımda herhangi bir temas olmadığı için adım sayısı küçük tutulmuş ve adım değeri büyük tutulmuştur. Fakat temasın gerçekleştiği ikinci adımda çekiç üzerindeki enerjinin deney elemanına aktarılmasıyla eleman üzerinde oluşan gerilmelerden dolayı

analizin daha yavaş bir şekilde devam etmesi gerekmektedir. Bu nedenle adım sayısı büyük alınmış ve adım aralığı da oldukça küçük alınmıştır.

Analiz için dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulanmamış tüm sisteme yerçekimi kuvveti uygulanmıştır. Çekiç hariç tüm sistem tutulu olduğu için analiz başladığı anda çekiç yerçekimi kuvvetinin etkisiyle deneyde olduğu gibi serbest düşme hareketine başlamıştır. Her bir çözüm adımı kuvvet, sınır koşulları, temas ve çıktı istekleri gibi bilgiler içerir.

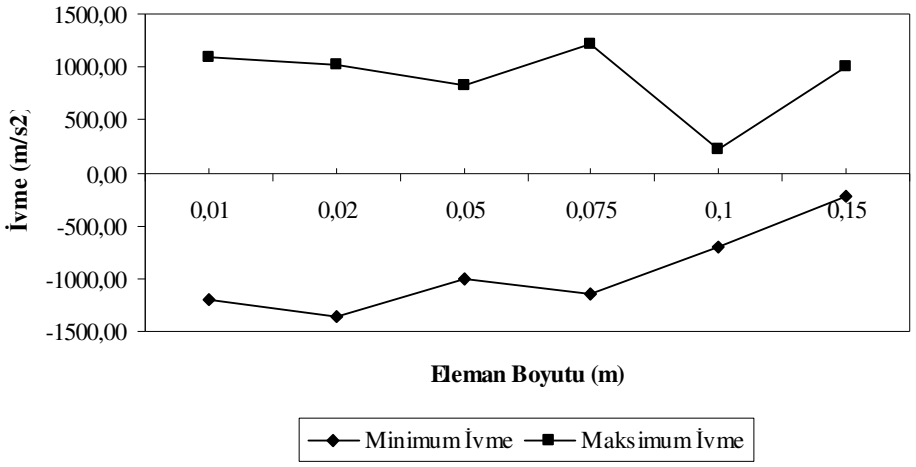
Sonlu elemanlar yöntemi ile analizin temelini oluşturan çözüm ağı, fiziksel sisteme ait geometrinin sonlu sayıda, geometrisi belli olan parçaya bölünerek matematiksel olarak ifade edilmesidir. Ayrıklaştırılmış geometri, düğüm noktaları ve düğüm noktalarından tanımlanan elemanlardan oluşur. Sonlu elemanlar analizi için geometrinin mutlaka ayrıklaştırılması (mesh edilmesi) gerekir.

Uygun eleman tipi modelimizin geometrisine bağlıdır. Eleman tipi parça üzerindeki çözüm ağını oluşturmadan önce veya sonra parçaya atanabilir. Modelin değişik bölgeleri değişik eleman tiplerinden oluşabilmektedir. Sınır koşulları ve yükleme gibi sonlu elemanlar modeli girdileri çözüm ağına değil, atandıkları geometriye bağlıdır. Bu yüzden çözüm ağının yoğunluğu veya eleman tipi üzerine parametrik çalışmalar yürütmek oldukça basittir[1].

Sonlu elemanın parçaları şekil olarak, deney elemanı için hexahedral(altı yüzlü) eleman ve çekiç için ise tetrahedral(üç yüzlü) eleman seçilmiştir. Seçilen elemanlarla modelin sonlu elemanlara ayrılma şekli olarak tarama yöntemi seçilmiştir. “Swept meshing” olarak tanımlanan yöntem, bir yüzeyden oluşturulan çözüm ağının kaynak kabul edilerek kalınlık boyunca hedef yüzeye kadar ötelenmesi ile elde edilmektedir[1]. Böylelikle elemanlar arasındaki düğüm noktalarındaki bağlantı maksimum seviyeye çıkarılmış ve modelde eleman yerleşmeyen bölge kalmamıştır.

Sonlu eleman şekli belirlendikten sonra eleman boyutu çözümün doğruluğu için ön plana çıkmaktadır. Eleman boyutu ne kadar küçük değerde olursa çözümün

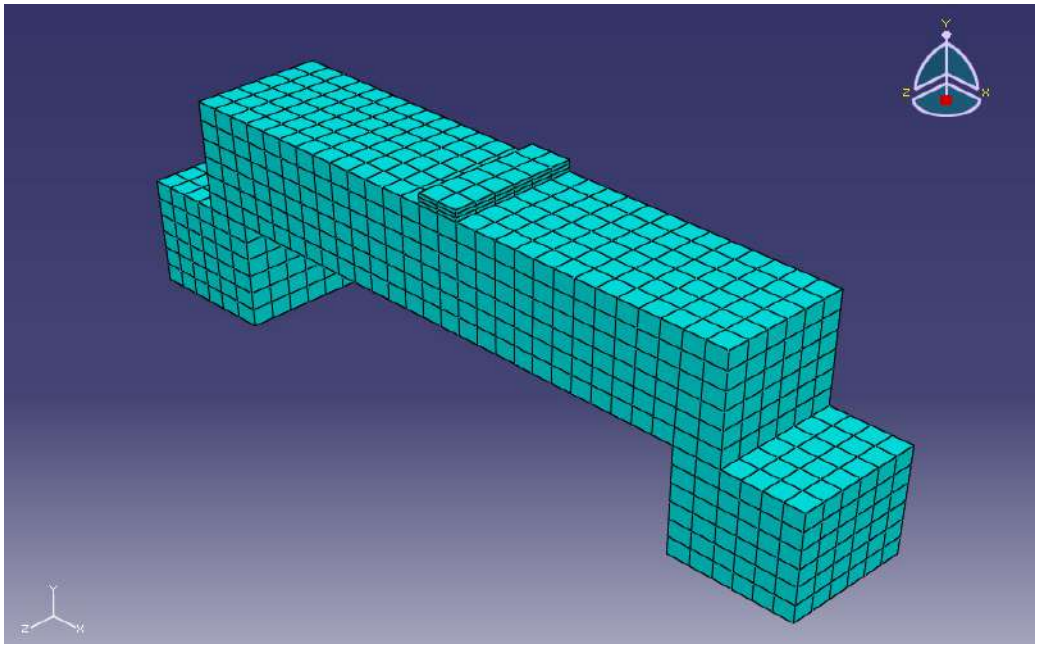
doğruluğuna o kadar yaklaşılır. Fakat bunu sağlayabilmek için çok özel dizayn edilmiş bilgisayar sistemleri gerekmektedir. Bunun maliyetli olması ve imkânlarımızın kısıtlı olmasından dolayı öncelikli olarak pilot bir çalışma üzerinde 5 adet eleman boyutu belirlenmiş ve analiz yapılmıştır. Elde edilen ivme değerleri bir grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 6.2). Bu grafiğe bakarak değerlerin en az değişim gösterdiği bölgedeki eleman boyutlarından biri seçilmiştir.



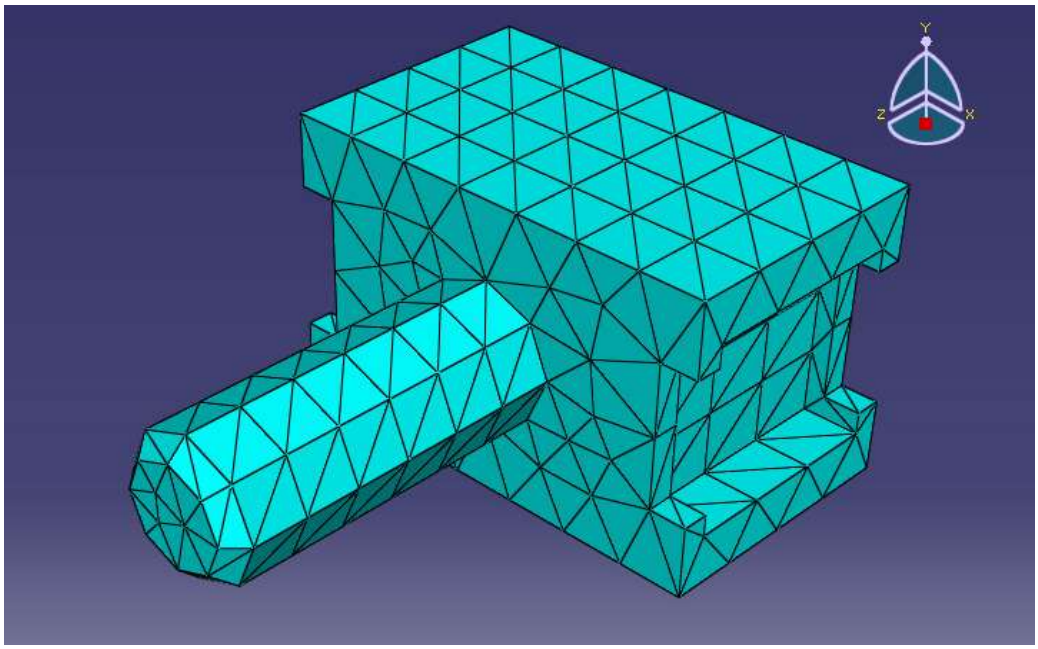
Şekil 6.2. Sonlu eleman boyutlarına göre ivme değerlerindeki değişim

Elde edilen grafikten anlaşılacağı gibi eleman boyutu 0,02 m ile 0,05 m arasında seçildiğinde elde edilen sonuçlar tutarlı olabilecektir. Bu sonuçlar dikkate alınarak mesh boyutu 0,025 m seçilmiştir. Seçilen eleman tipine ve boyutuna göre sonlu elemanlara bölünmüş deney elemanı Şekil 6.3'de çekiç ise Şekil 6.4'de gösterilmiştir.

Analize başlanmadan önce programın analiz yaparken kullandığı yöntemlerden bahsetmek gerekmektedir. Sonlu eleman programında, dinamik problemler için, hareket denklemleri farklı zaman adımları için zamana göre entegre edilmektedirler. Hareket denklemlerinde statik dengenin genel ifadesi Eş. 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Deney elemanı modelinin sonlu elemanlara bölünmesi



Şekil 6.4. Çekiç modelinin sonlu elemanlara bölünmesi

$$P - I = 0 \tag{6.1}$$

Eş. 6.1'de I, düğüm noktalarına etkiyen iç kuvvetler(eleman gerilmelerinden dolayı), P her bir düğüm noktasına etkiyen dış kuvvetleri ifade etmektedir.

Hareket denklemlerinde dinamik dengenin genel ifadesi ise Eş. 6.2'de verilmiştir.

$$P - I = M\ddot{u} \tag{6.2}$$

Eş. 6.2'de M, kütle, $\ddot{u}$ ise yapının ivmesini temsil etmektedir. Statik denge ile dinamik denge arasındaki ayırt edici fark, atalet kuvvetlerinin eklenmesidir.

Analiz adımlarında; bir analiz için yük, bir veya birden fazla adımda uygulanabilir. Artırım ise, analiz adımının bir parçasıdır. Yapının doğrusal olamayan cevabını yakalayabilmek için statik analizlerde, bir analiz adımında uygulanan toplam yük, küçük parçalara bölünür. Küçükten başlayarak, adım adım artırılarak yapıya uygulanır. Dinamik problemlerde ise hareket denklemelerini entegre etmek için toplam zaman dilimi, küçük zaman adımlarına bölünür.

Abaqus/Standard doğrusal olmayan denge denklemlerinin çözümü için, artırım-tekrarlama çözüm tekniğine dayalı Newton-Raphson yöntemini kullanmaktadır. Dinamik analizlerde artırım büyüklüğü sonuçların doğruluğunu etkilemektedir. Genellikle her bir artırımda yakınsamanın sağlanması için birkaç tekrar gerekmektedir. Genellikle her bir analiz adımı da birkaç artırımda geçilmektedir.

Dinamik problemlerin çözümü artırımların ara noktaları için dengenin sağlanması prensibine dayanır. Denge, belirli zaman noktalarında (artırımın başında ve sonunda) sağlanmaktadır. $t+\Delta t/2$ için dinamik dengenin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir ve hata miktarı, zaman artırım büyüklüğünü kontrol etmek için kullanılır. Otomatik zaman artırımı (veya değişimi) Abaqus'de çok iyi bir şekilde çalışmaktadır. Eğer kullanıcının iyi bir nedeni yoksa değiştirilmesi tavsiye edilmez [1].

Atalet kuvvetlerinin (d'Alembert kuvvetleri) önemli ve zamanla değiştiği problemler dinamiktir. Atalet kuvvetleri, yapının kütlesi ve ivmesi ile orantılıdır. Dinamik problemlerinin çözümü, hareket denklemlerinin zaman içinde entegrasyonunu gerektirir. Eğer kuvvet değişimi küçük ve atalet kuvvetleri küçük ise cevap, sanki statik olarak kabul edilebilir. Bazen, büyük ataletsel kuvvetlere karşı, zamana göre değişim küçük olduğu için statik çözümleme yapılır (Örnek: merkezkaç yüklemeler) Bazen dinamik titreşim problemleri frekans sahasında daha etkin bir şekilde çözümlenebilmektedir[1].

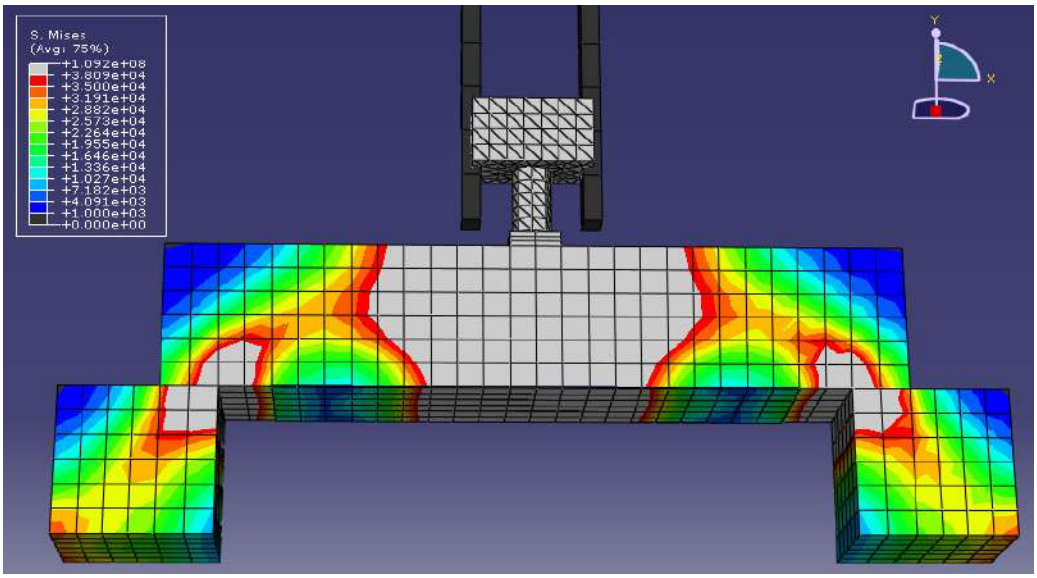
6.5. Analiz Sonuçlarının Deney Sonuçları İle Karşılaştırılması

Her bir deney elemanına karşılık gelecek şekilde malzeme özellikleri ve deney koşulları oluşturularak analizler yapılmıştır. Yapılan analizler ile ivme-zaman, hız-zaman, deplasman-zaman grafikleri ve çarpma etkisi ile eleman üzerinde oluşan gerilme dağılımı elde edilmiştir. Sonuçlar, deneylerdeki ölçümlerden elde edilen değerlerle çizilen grafiklerle aynı grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte analiz sonucunda elde edilen çekicin deney elemanına ilk temasında deney elemanı üzerinde meydana gelen gerilme dağılımı da bu bölümde sunulmuştur.

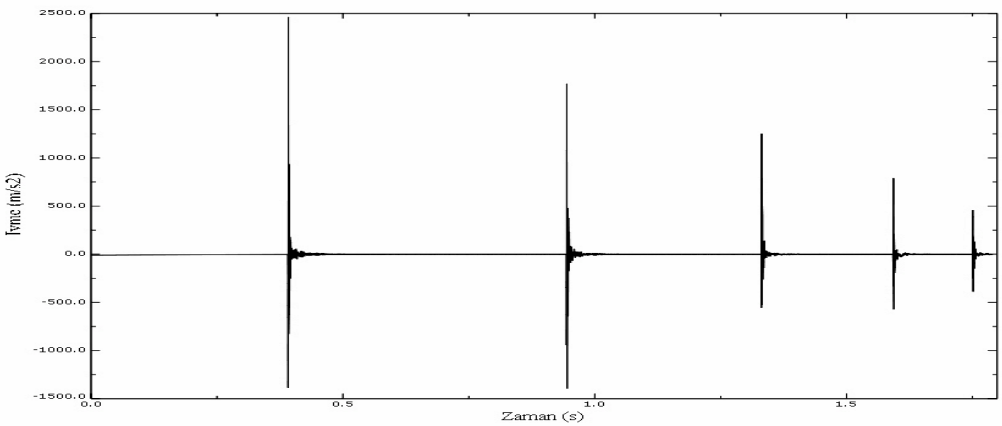
6.5.1. SC1 Deney elemanı ile 1. analizin karşılaştırması

SC1 elemanı normal dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 750 mm'dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 1. analizde çekicin düşme yüksekliği 750 mm olarak alınmış ve analiz yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.5'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.6.a'da Abaqus programından elde edilen ivme değerleri, Şekil 6.6.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.7'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.8'de ilk çarpma anı Abaqus programından

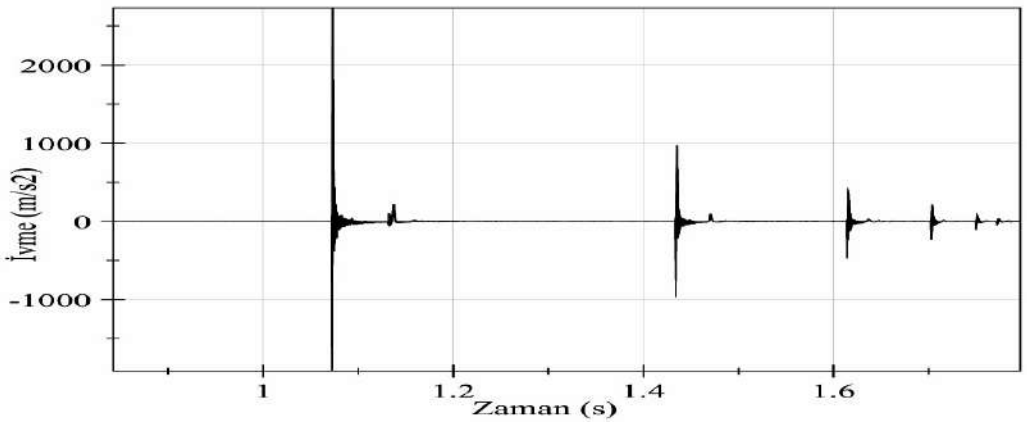
elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.9'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.5. 750 mm için Abaqus gerilme dağılımı

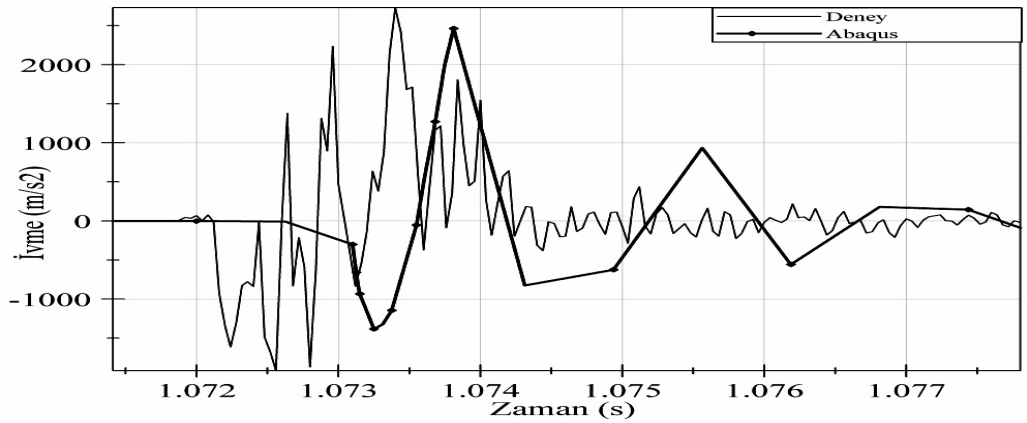


(a)

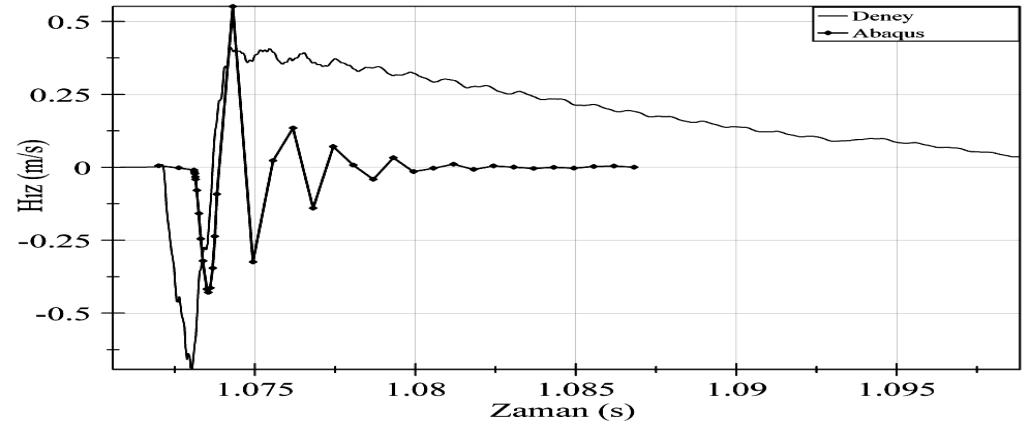


(b)

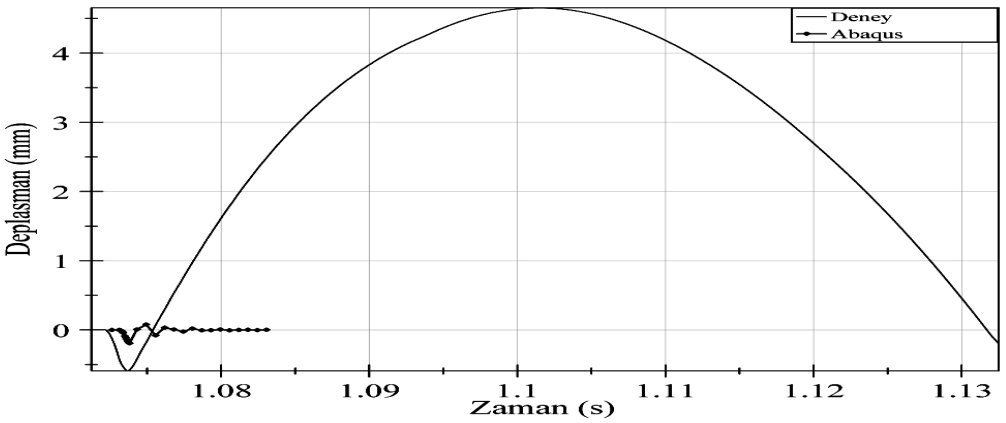
Şekil 6.6. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.7. SC1 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



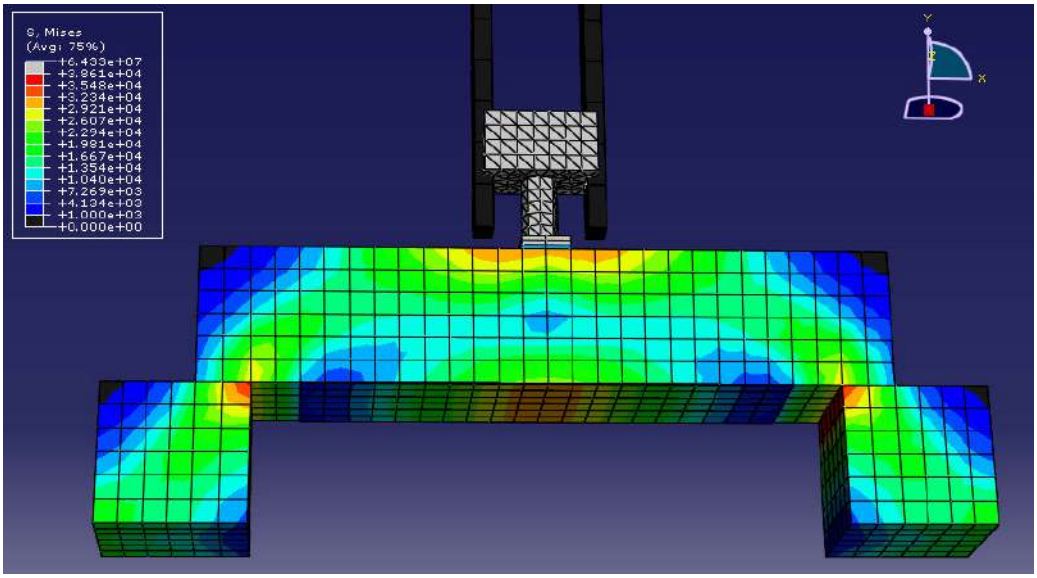
Şekil 6.8. SC1 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması



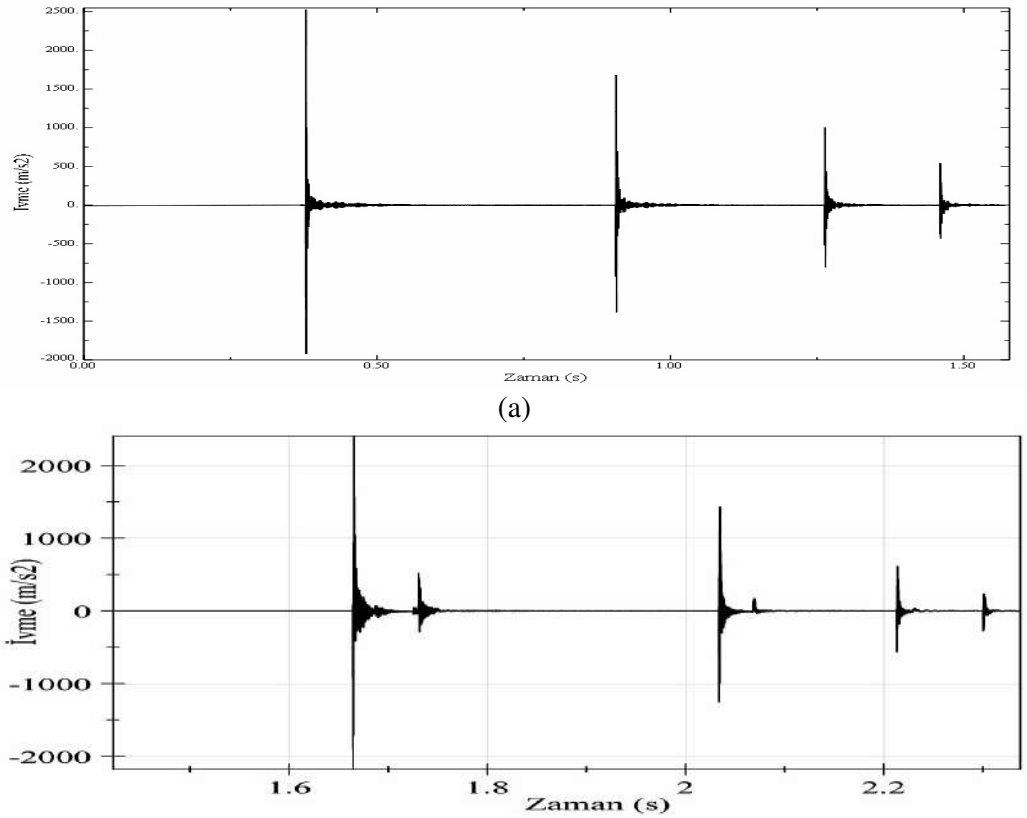
Şekil 6.9. SC1 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

6.5.2. SC2 Deney elemanı ile 2. analizin karşılaştırması

SC2 elemanı normal dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 700 mm'dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 2. analizde çekicin düşme yüksekliği 700 mm olarak alınmış ve analiz yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.10'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.11.a'da Abaqus programından elde edilen ivme değerleri, Şekil 6.11.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.12'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.13'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.14'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



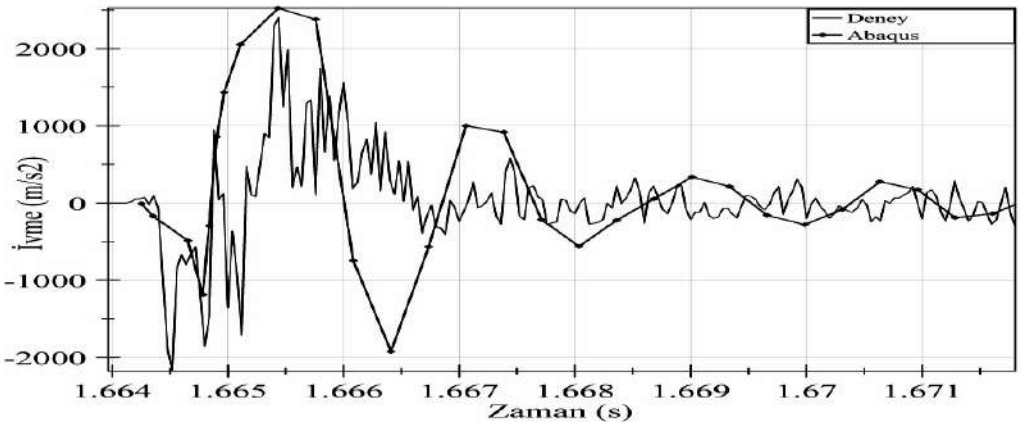
Şekil 6.10. 700 mm için Abaqus gerilme dağılımı



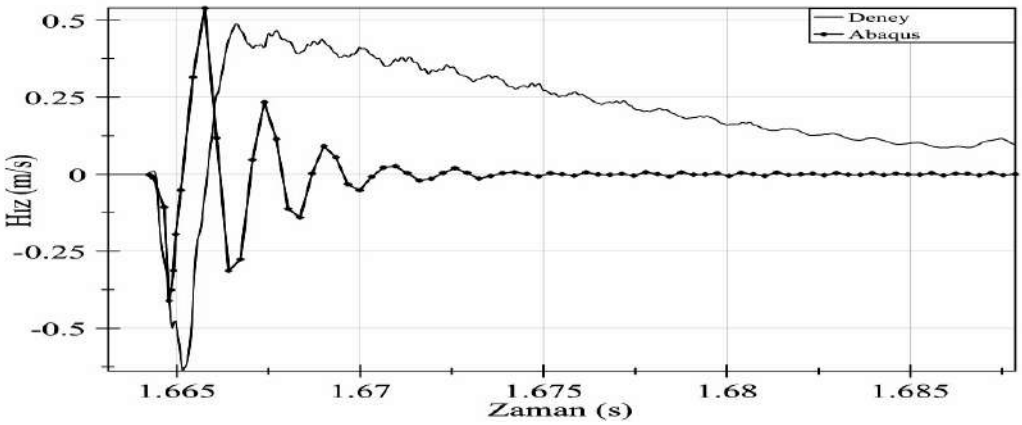
(a)

(b)

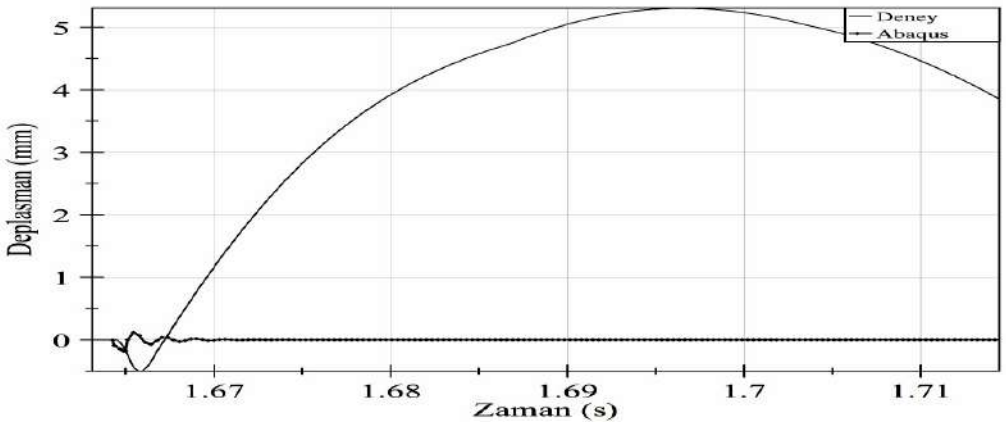
Şekil 6.11. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.12. SC2 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



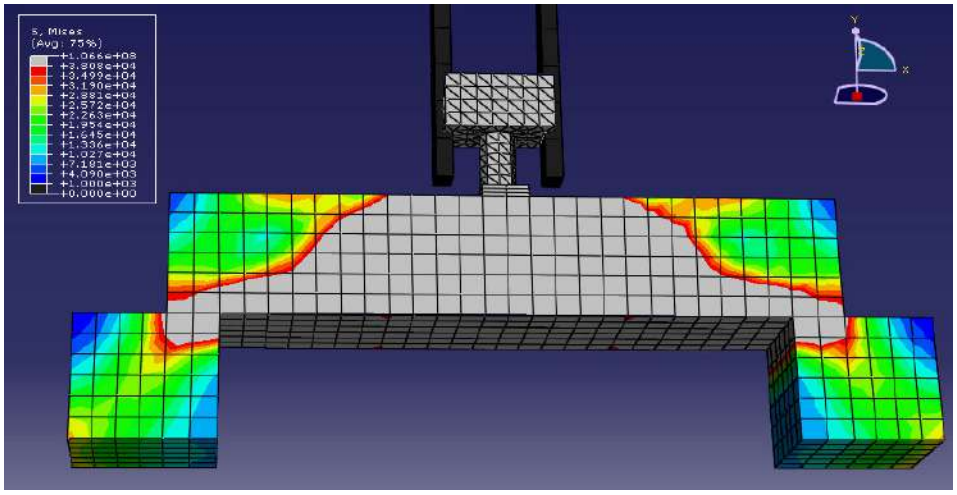
Şekil 6.13. SC2 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması



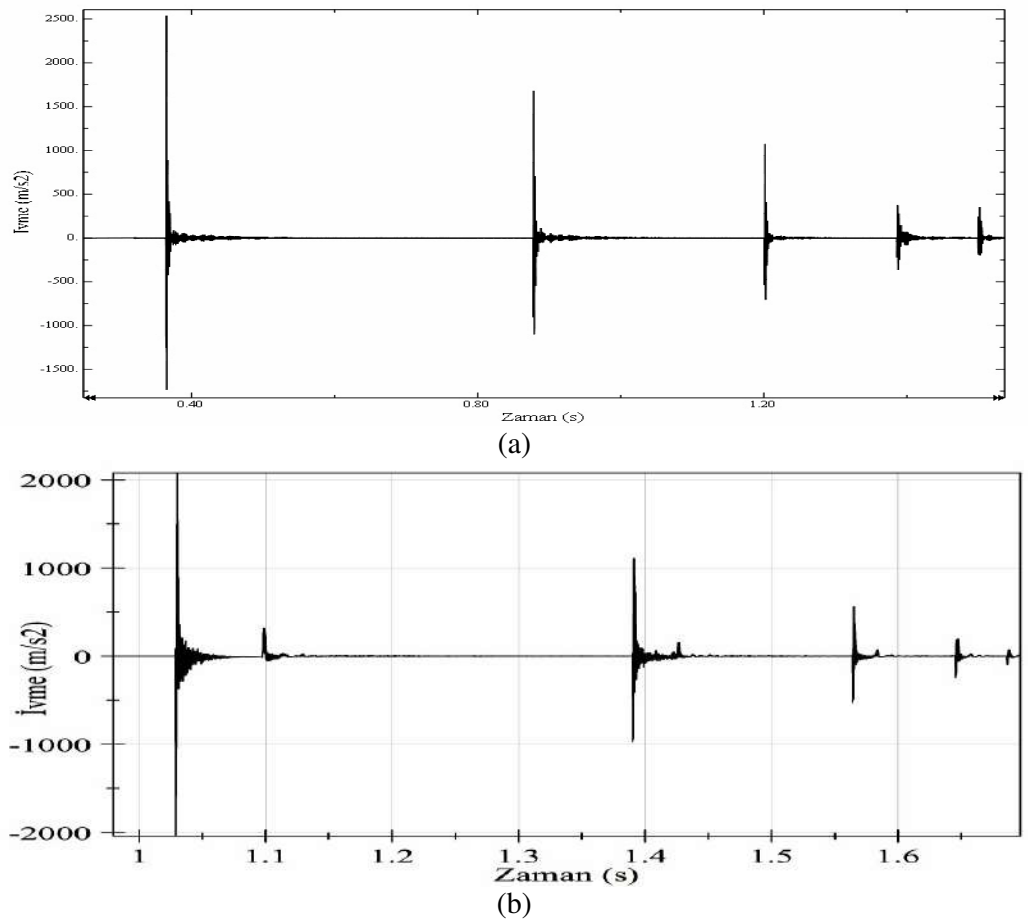
Şekil 6.14. SC2 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

6.5.3. SC3 Deney elemanı ile 3. analizin karşılaştırması

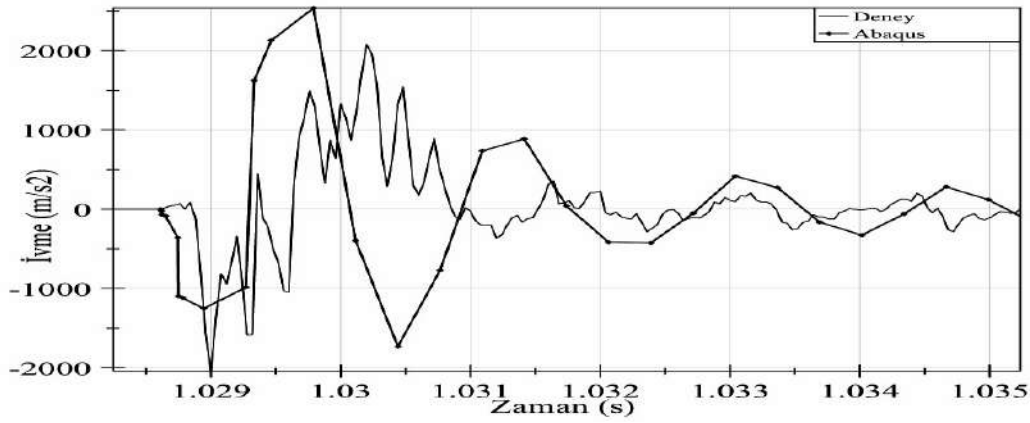
SC3 elemanı normal dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 650 mm dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 3. analizde çekicin düşme yüksekliği 650 mm olarak alındı ve analiz yapıldı. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.15'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.16.a'da Abaqus programından elde edilen ivme değerleri, Şekil 6.16.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.17'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.18'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.19'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



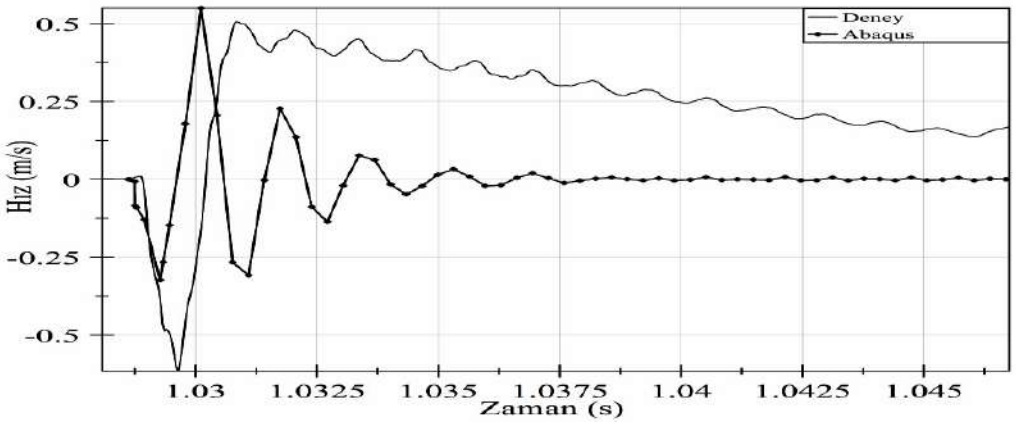
Şekil 6.15. 650 mm için Abaqus gerilme dağılımı



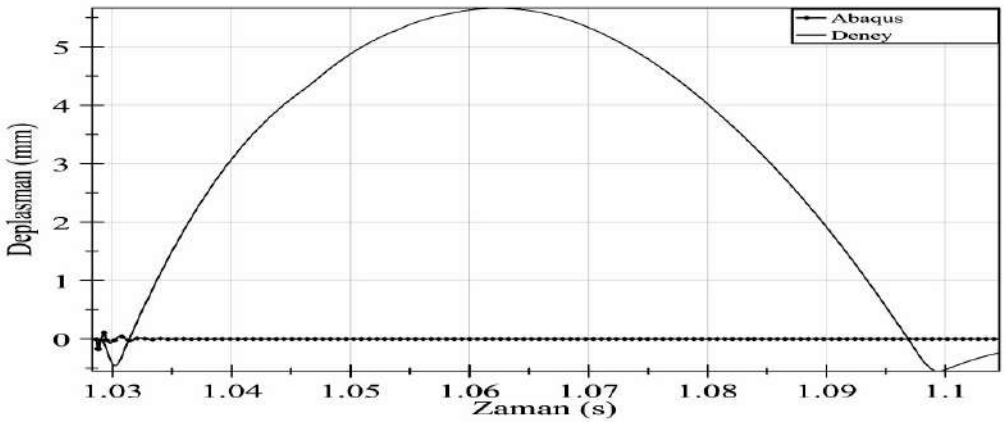
Şekil 6.16. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.17. SC3 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



Şekil 6.18. SC3 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması

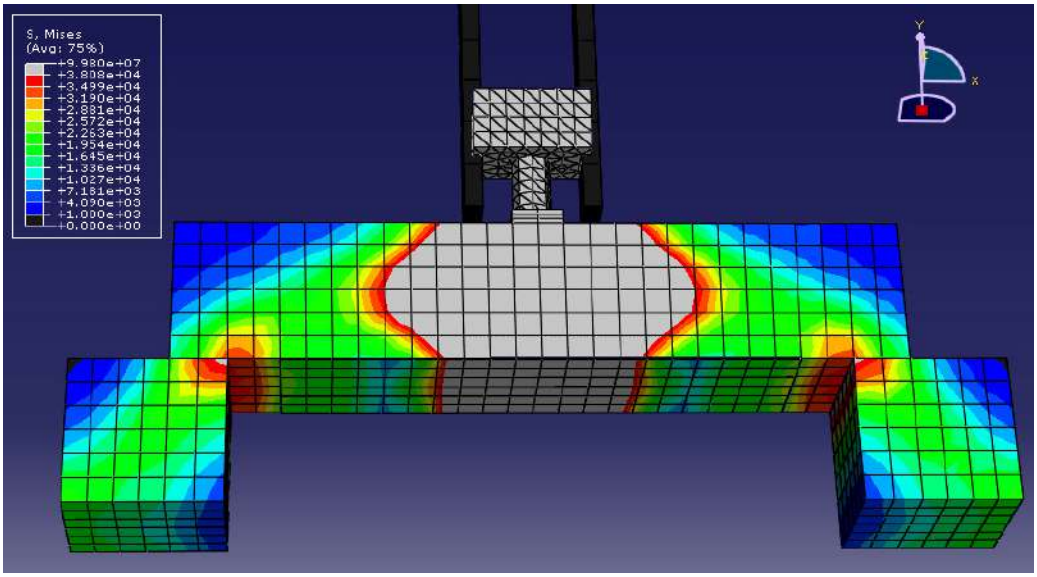


Şekil 6.19. SC3 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

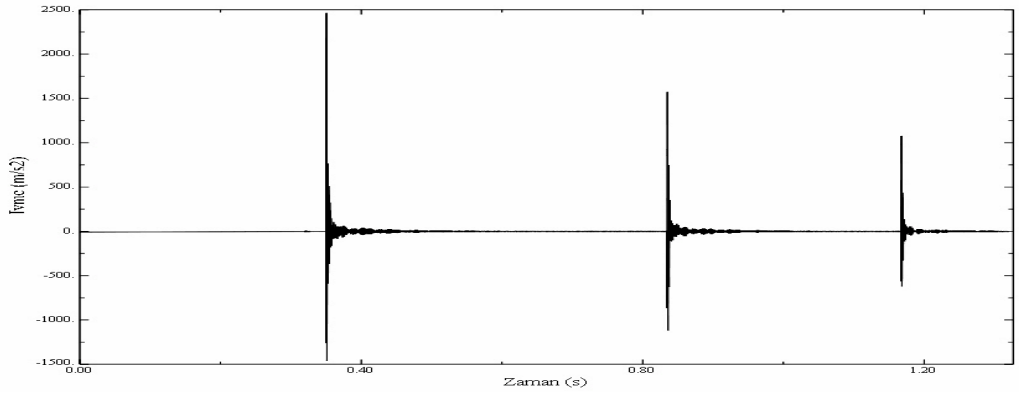
6.5.4. SC4 Deney elemanı ile 4. analizin karşılaştırması

SC4 elemanı normal dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 600 mm dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 4. analizde çekicin düşme yüksekliği 600 mm olarak alındı ve analiz yapıldı. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.20'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.21.a'da Abaqus programından elde edilen

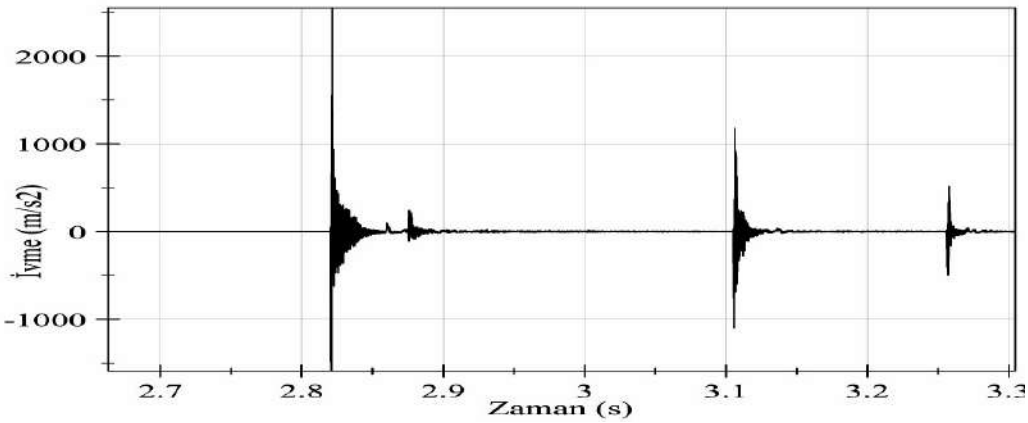
ivme değerleri, Şekil 6.21.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.22'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.23'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.24'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.20. 600 mm için Abaqus gerilme dağılımı

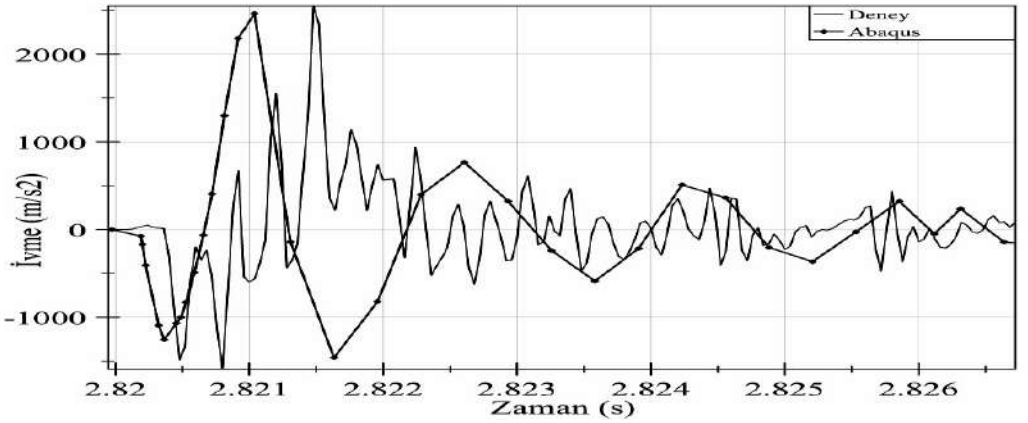


(a)

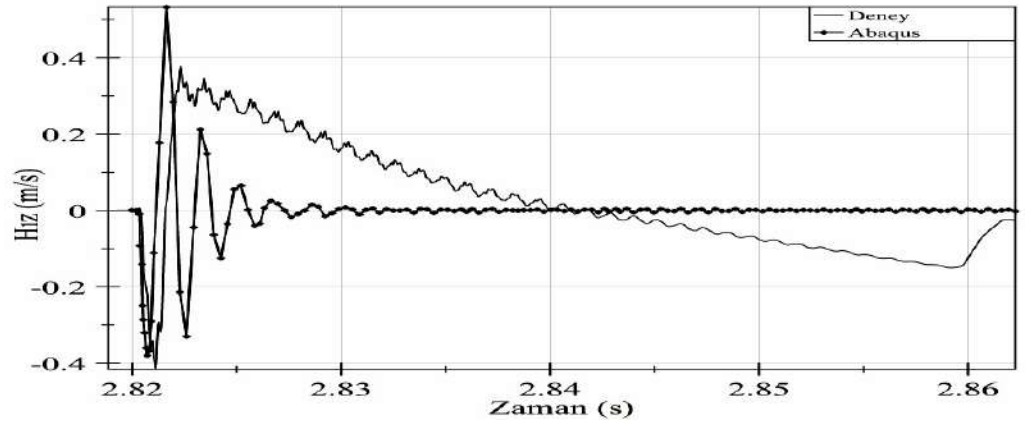


(b)

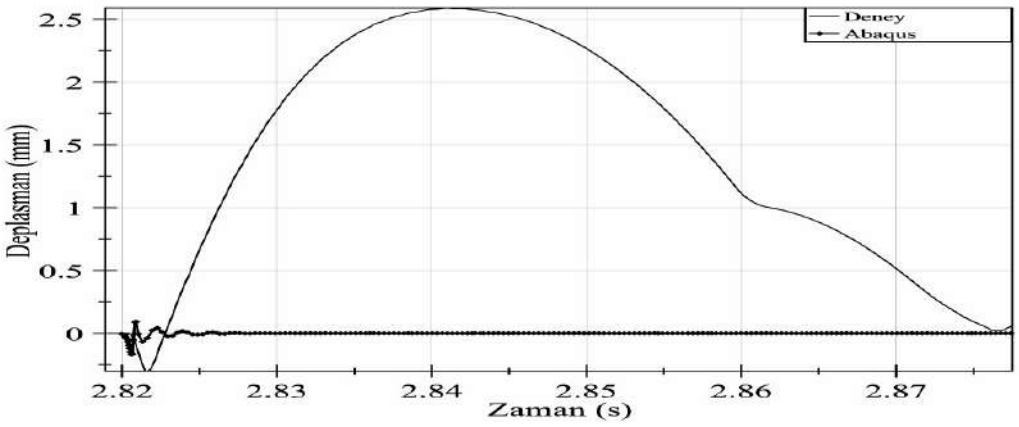
Şekil 6.21. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.22. SC4 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



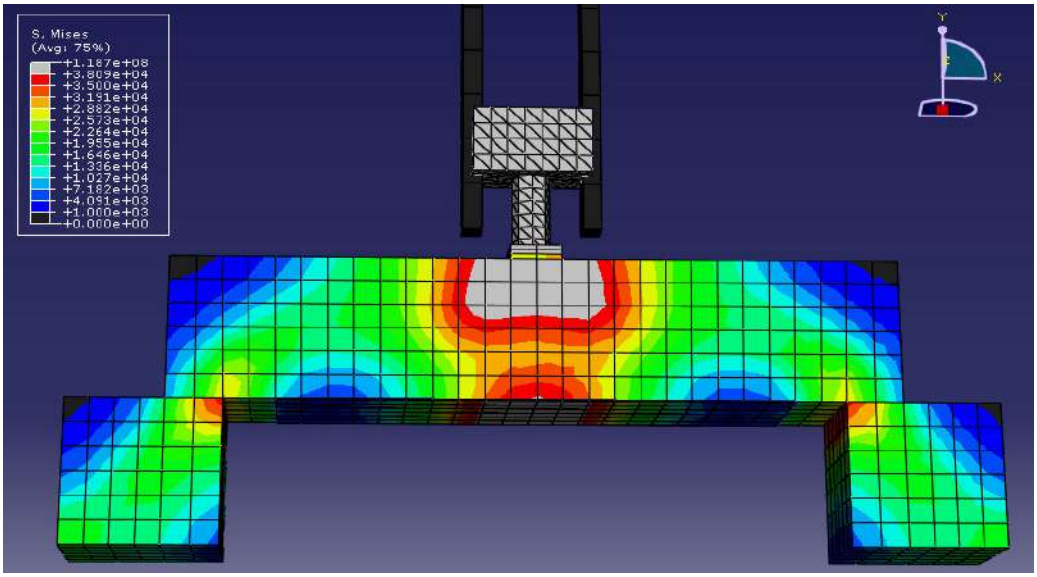
Şekil 6.23. SC4 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması



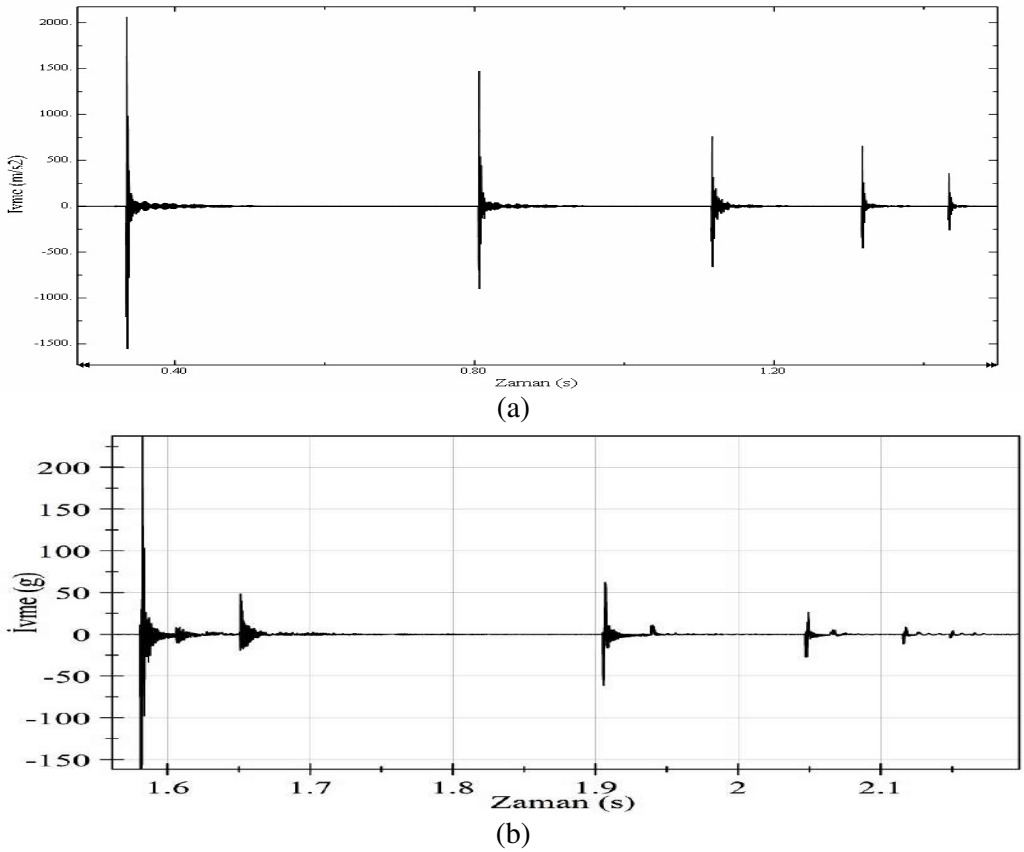
Şekil 6.24. SC4 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

6.5.5. SC5 Deney elemanı ile 5. analizin karşılaştırması

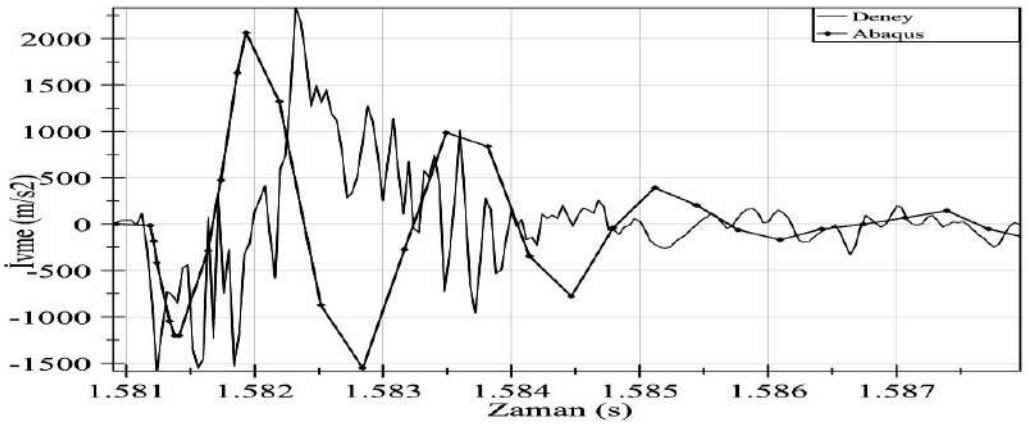
SC5 elemanı normal dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 550 mm dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 5. analizde çekicin düşme yüksekliği 550 mm olarak alındı ve analiz yapıldı. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.25'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.26.a'da Abaqus programından elde edilen ivme değerleri, Şekil 6.26.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.27'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.28'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.29'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



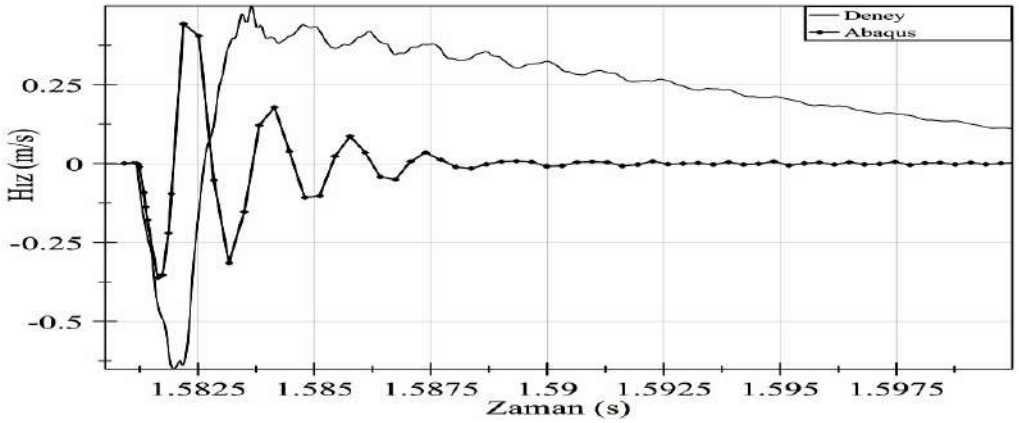
Şekil 6.25. 550 mm için Abaqus gerilme dağılımı



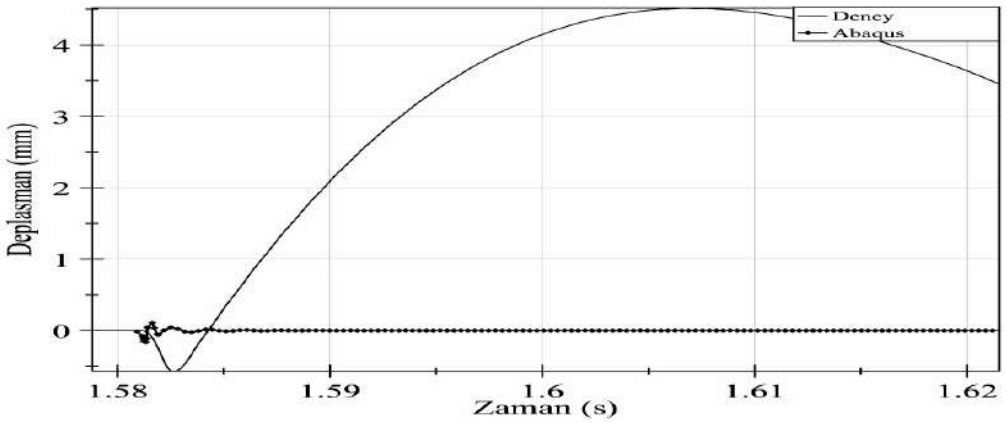
Şekil 6.26. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.27. SC5 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



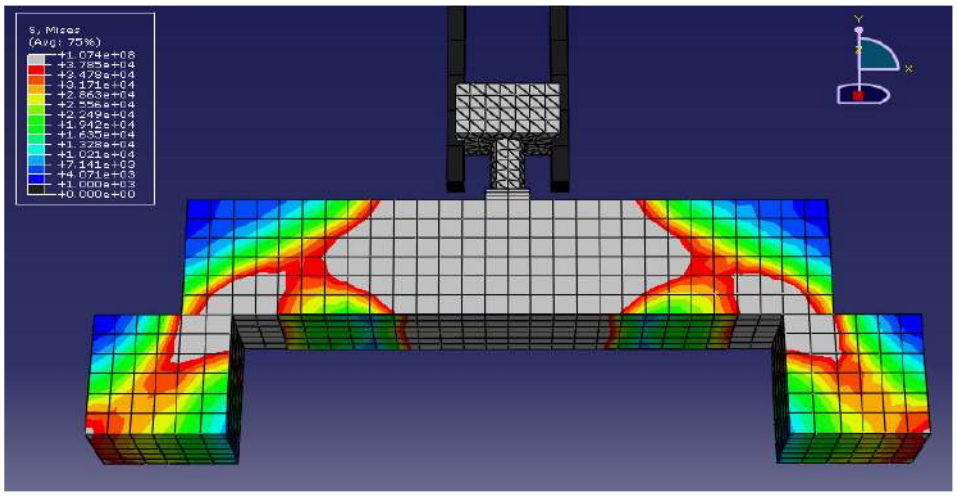
Şekil 6.28. SC5 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması



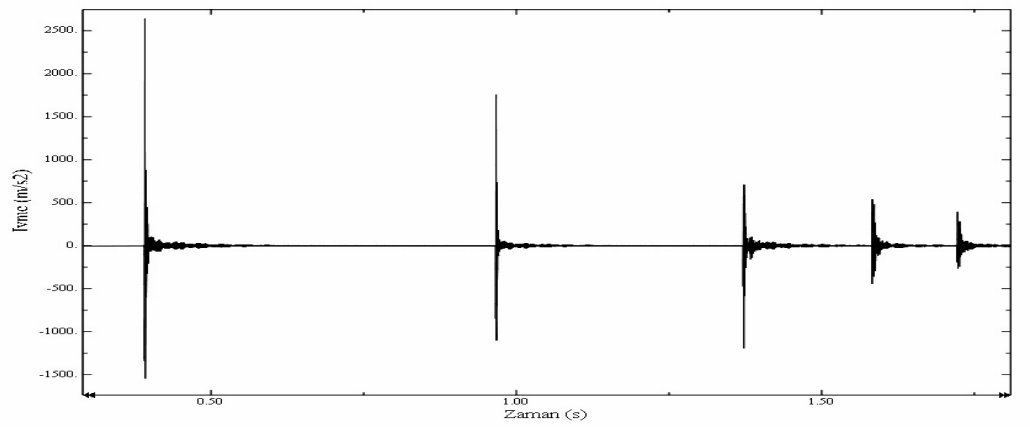
Şekil 6.29. SC5 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

6.5.6. SC6 Deney elemanı ile 6. analizin karşılaştırması

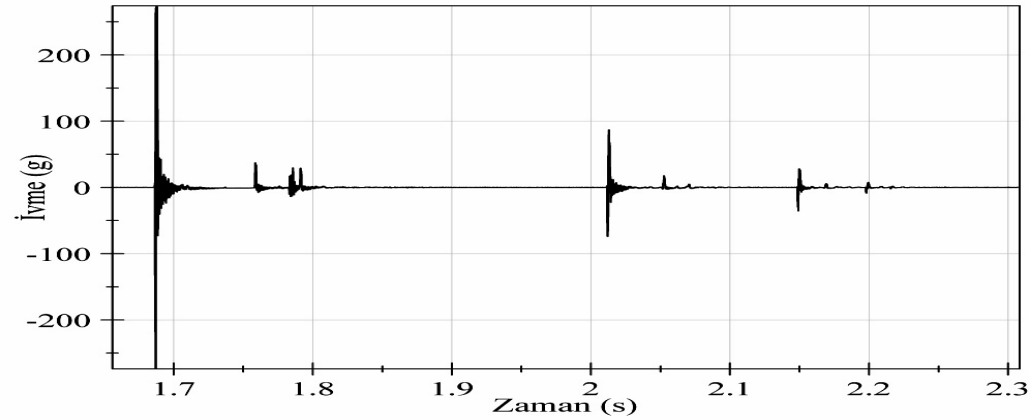
SC6 elemanı yüksek dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 750 mm dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 6. analizde çekicin düşme yüksekliği 750 mm olarak alındı ve analiz yapıldı. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.30'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.31.a'da Abaqus programından elde edilen ivme değerleri, Şekil 6.31.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.32'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.33'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.34'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.30. 750 mm için Abaqus gerilme dağılımı

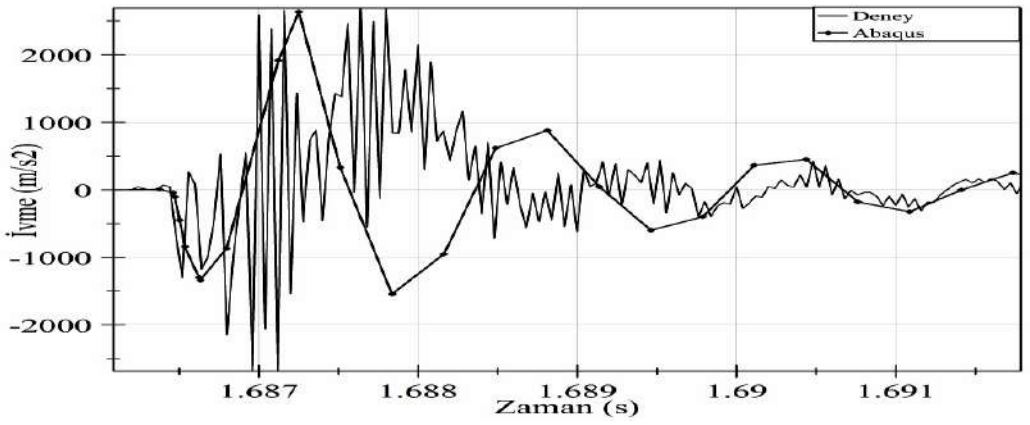


(a)

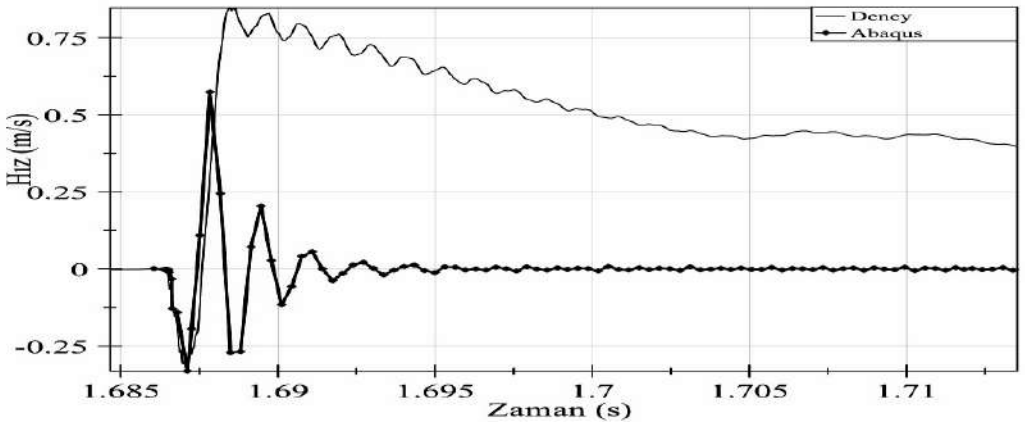


(b)

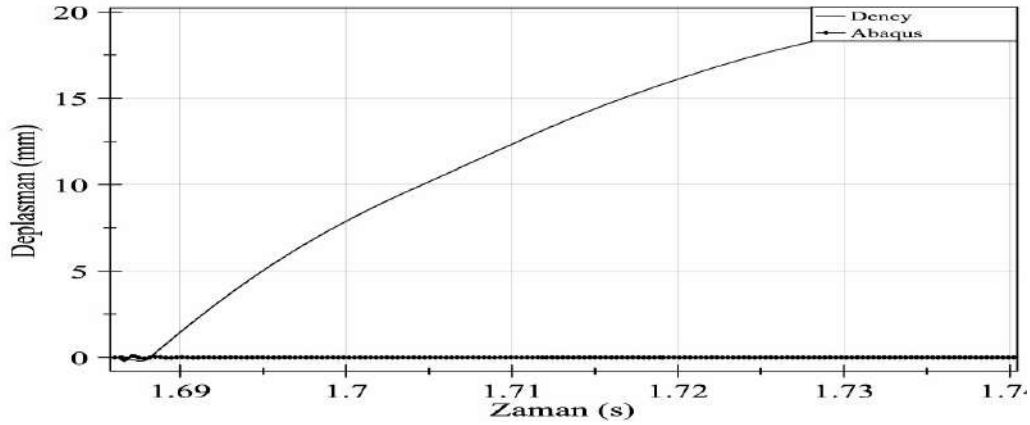
Şekil 6.31. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.32. SC6 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



Şekil 6.33. SC6 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması

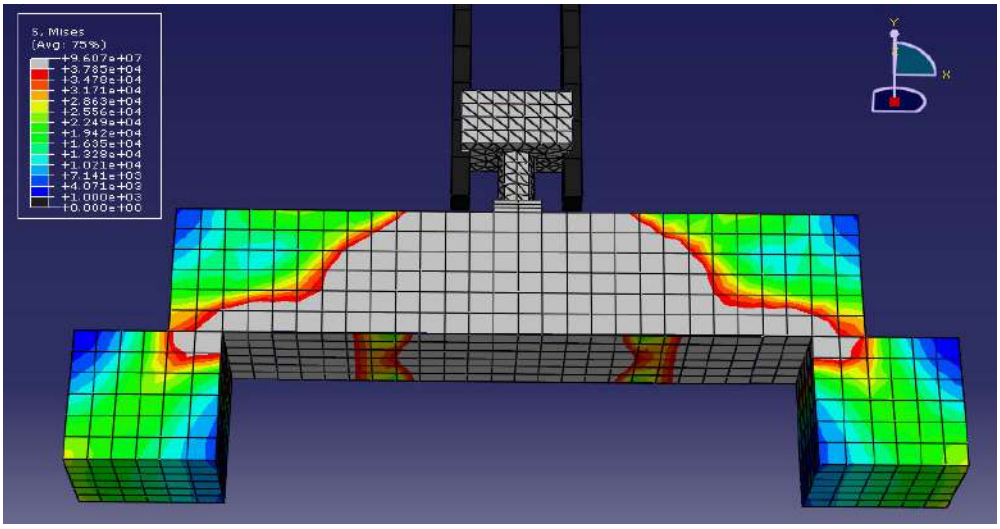


Şekil 6.34. SC6 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

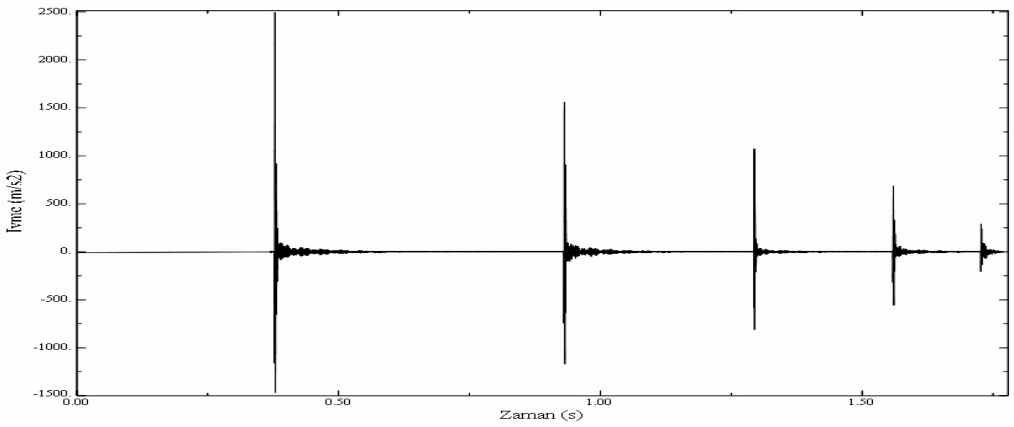
6.5.7. SC7 Deney elemanı ile 7. analizin karşılaştırması

SC7 elemanı yüksek dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 700 mm dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 7. analizde çekicin düşme yüksekliği 700 mm olarak alındı ve analiz yapıldı. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.35'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.36.a'da Abaqus programından elde edilen

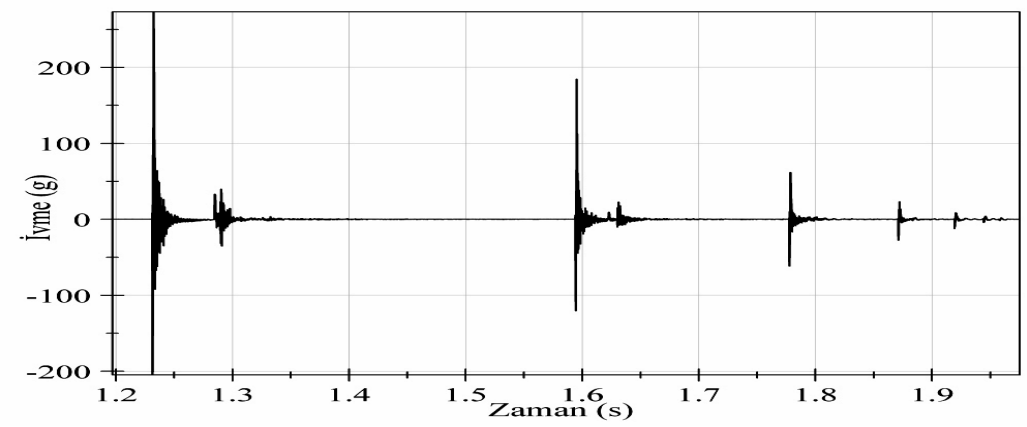
ivme değerleri, Şekil 6.36.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.37'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.38'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.39'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.35. 700 mm için Abaqus gerilme dağılımı

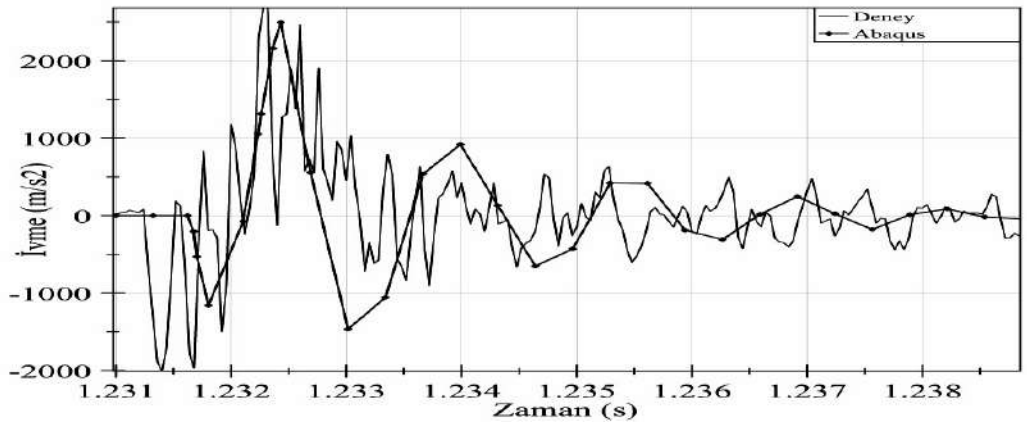


(a)

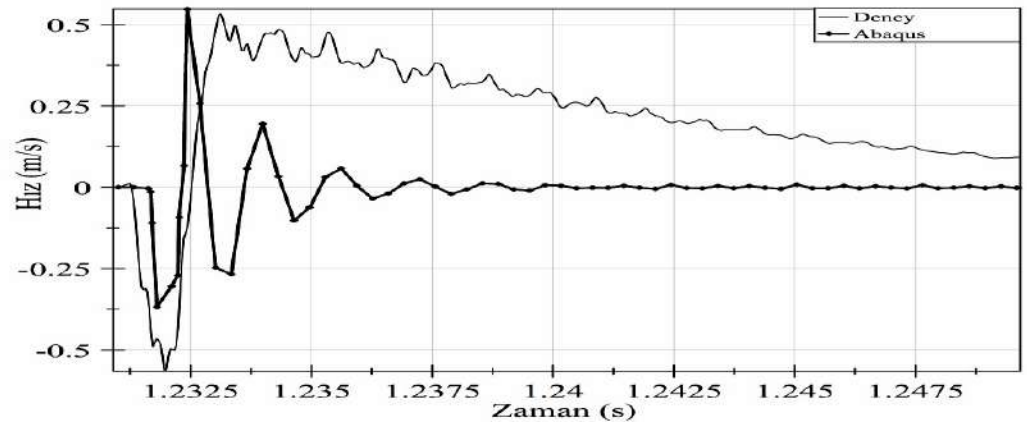


(b)

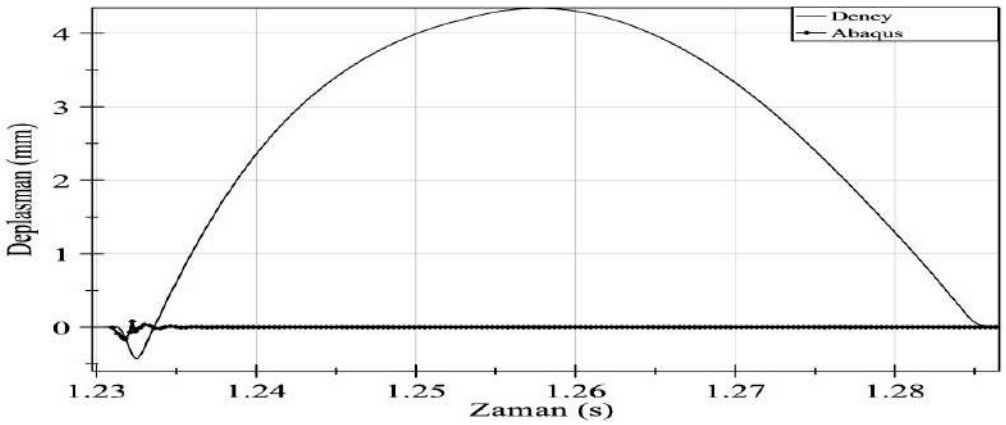
Şekil 6.36. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.37. SC7 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



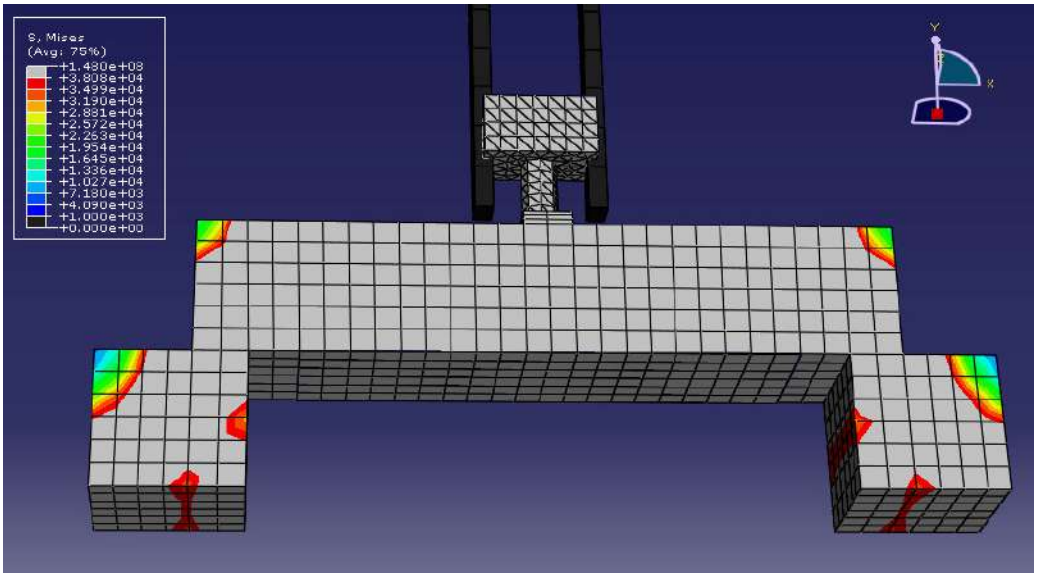
Şekil 6.38. SC7 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması



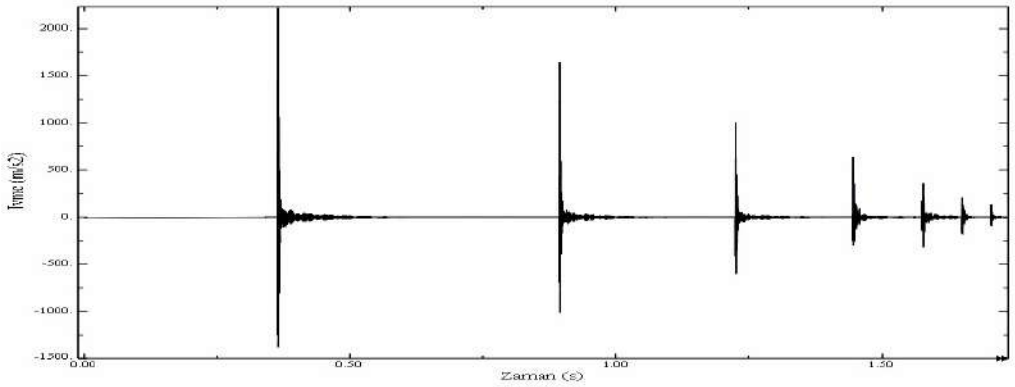
Şekil 6.39. SC7 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

6.5.8. SC8 Deney elemanı ile 8. analizin karşılaştırması

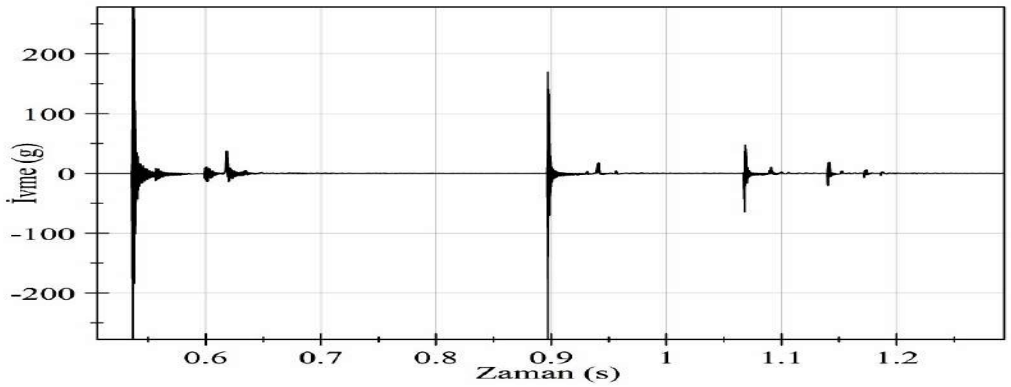
SC8 elemanı yüksek dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 650 mm dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 8. analizde çekicin düşme yüksekliği 650 mm olarak alındı ve analiz yapıldı. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.40'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.41.a'da Abaqus programından elde edilen ivme değerleri, Şekil 6.41.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.42'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.43'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.44'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.40. 650 mm için Abaqus gerilme dağılımı

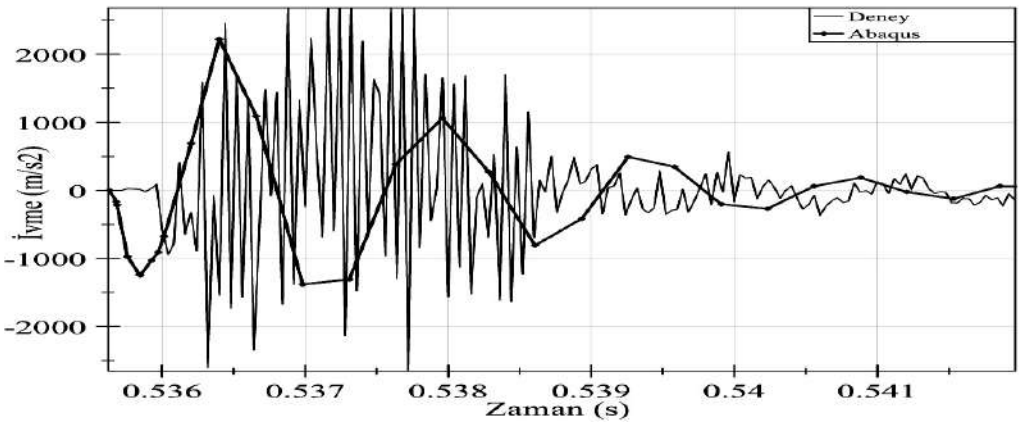


(a)

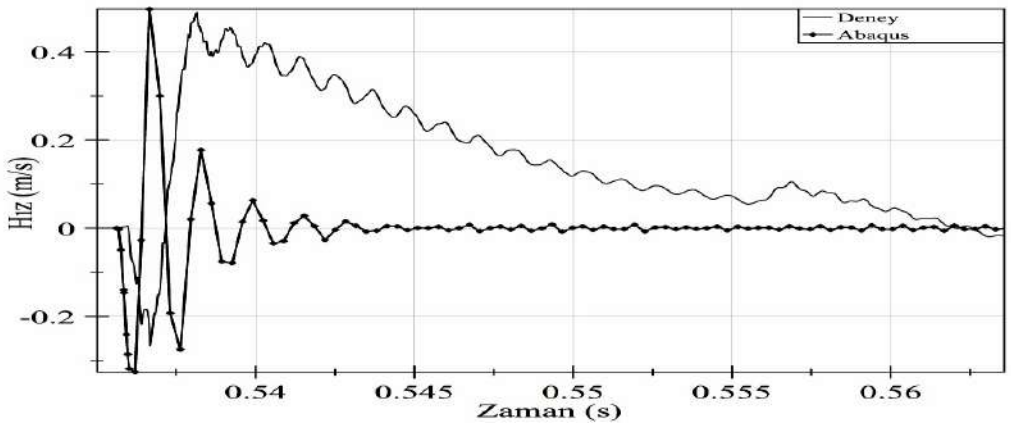


(b)

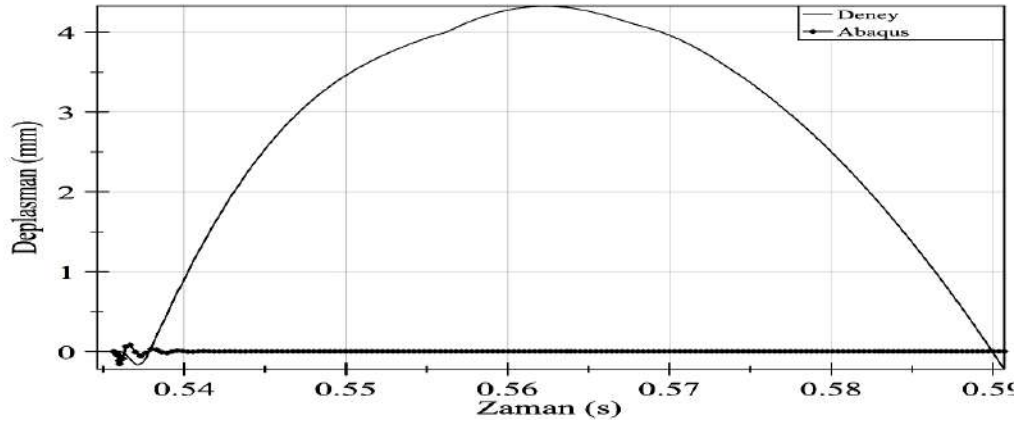
Şekil 6.41. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.42. SC8 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



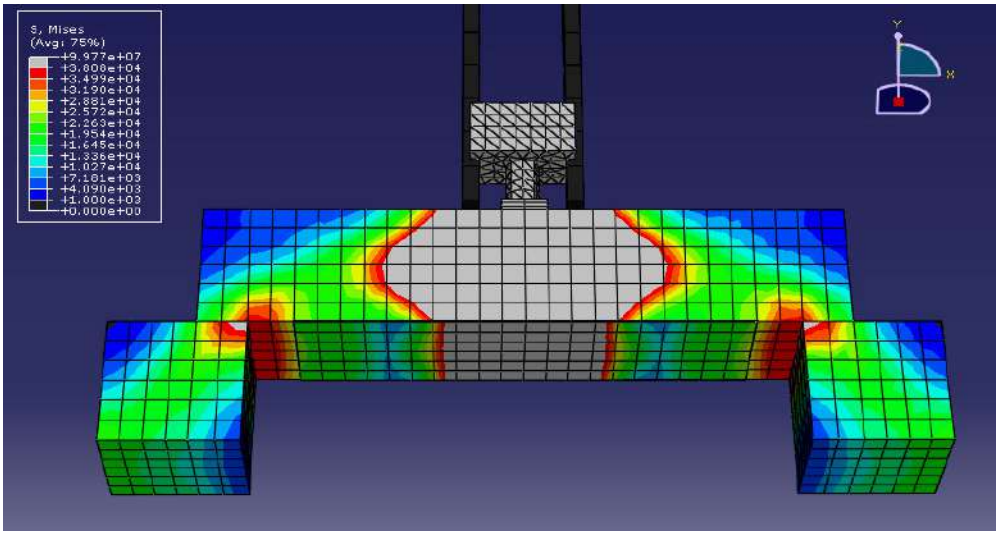
Şekil 6.43. SC8 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması



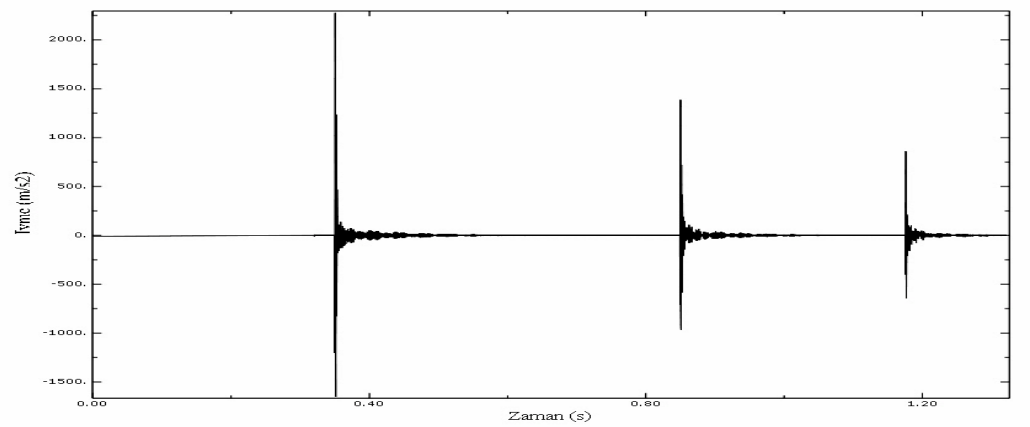
Şekil 6.44. SC8 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

6.5.9. SC9 Deney elemanı ile 9. analizin karşılaştırması

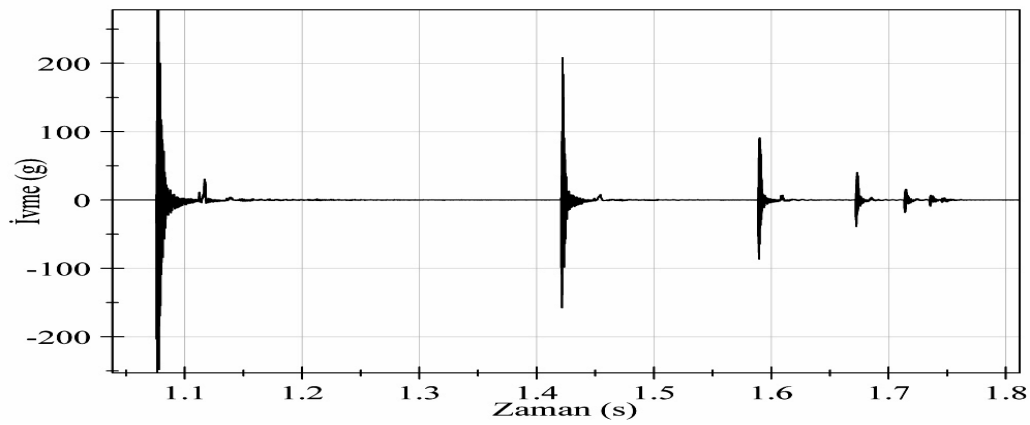
SC9 elemanı yüksek dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 600 mm dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 9. analizde çekicin düşme yüksekliği 600 mm olarak alındı ve analiz yapıldı. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.45'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.46.a'da Abaqus programından elde edilen ivme değerleri, Şekil 6.46.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 6.47'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.48'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.49'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.45. 600 mm için Abaqus gerilme dağılımı

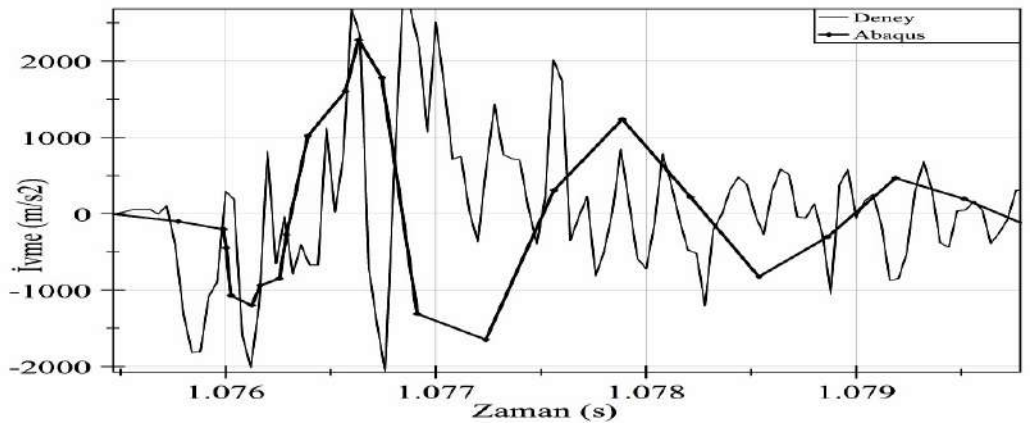


(a)

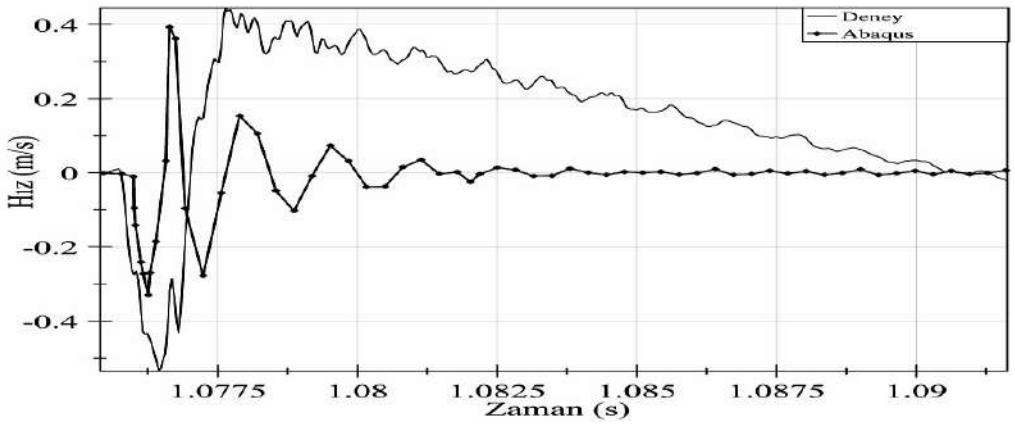


(b)

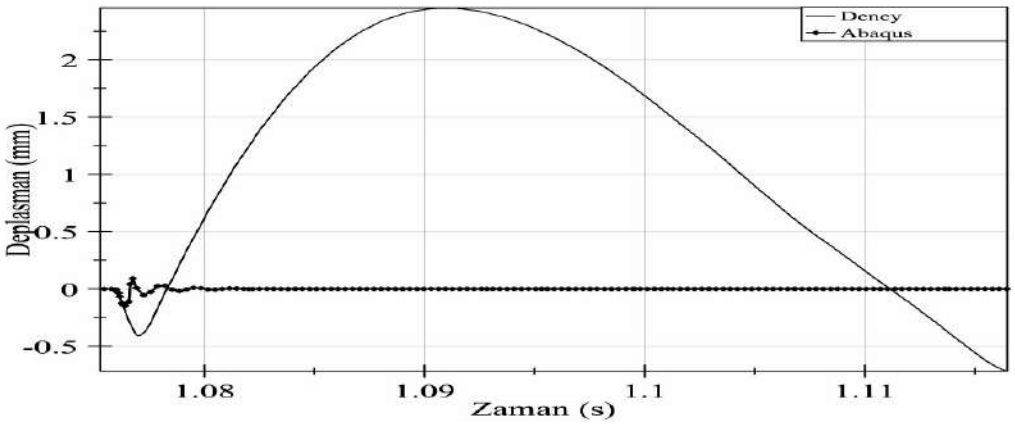
Şekil 6.46. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.47. SC9 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



Şekil 6.48. SC9 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması

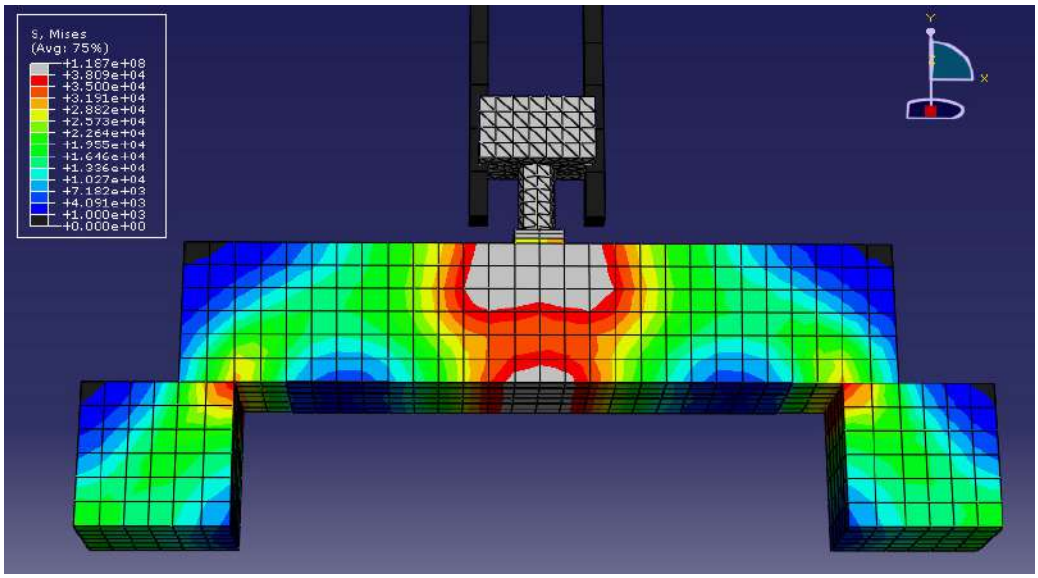


Şekil 6.49. SC9 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

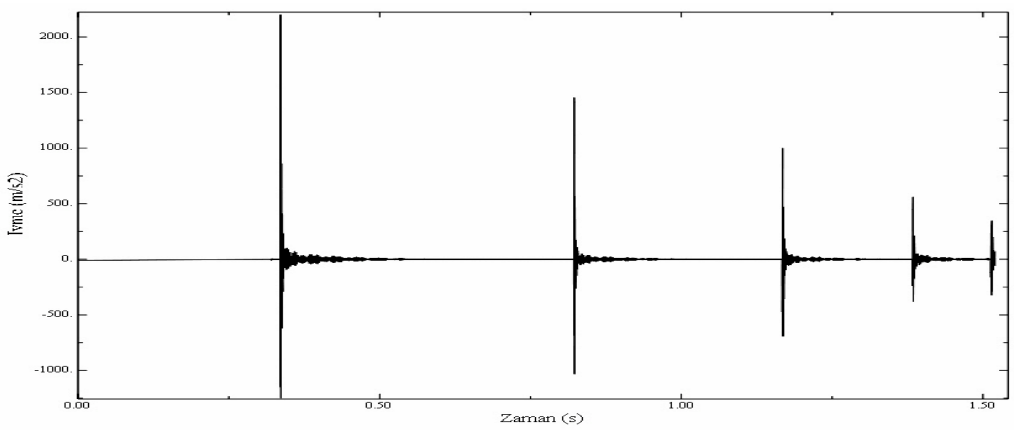
6.5.10. SC10 Deney elemanı ile 10. analizin karşılaştırması

SC10 elemanı yüksek dayanımlı betondan yapılmış olup deney yüksekliği de 550 mm dir. Abaqus sonlu eleman programı ile yapılan 10. analizde çekicin düşme yüksekliği 550 mm olarak alındı ve analiz yapıldı. Analiz sonucu elde edilen ivme, hız ve deplasman grafikleri, deneylerden elde edilen grafiklerle üst üste aynı grafik üzerinde birleştirilmiştir. Böylelikle sonuçların grafikler üzerinden görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.50'de çekicin deney elemanına çarptığı andaki gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 6.51.a'da Abaqus programından elde edilen ivme değerleri, Şekil 6.51.b'de deneyden elde edilen ivme değerleri grafik olarak

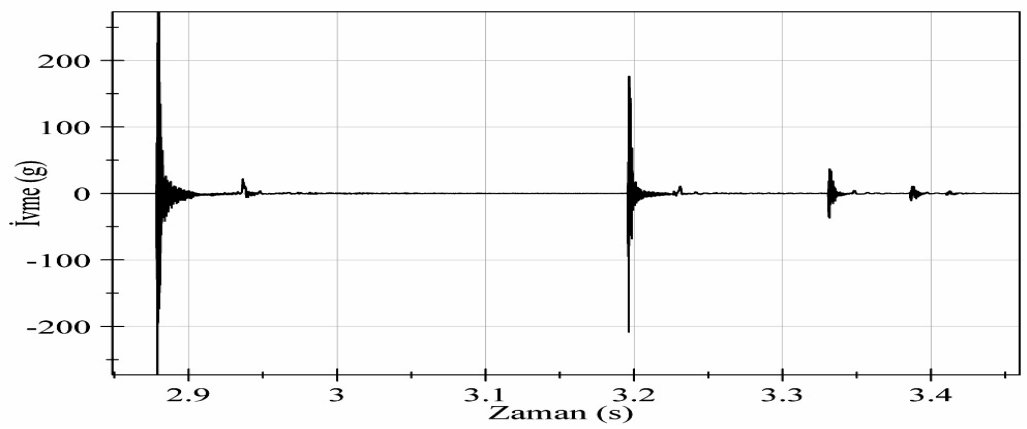
gösterilmektedir. Şekil 6.52'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen ivme değerleri ile deneyden elde edilen ivme değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.53'de ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen hız değerleri ile deneyden elde edilen hız değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.54'da ilk çarpma anı Abaqus programından elde edilen deplasman değerleri ile deneyden elde edilen deplasman değerlerinin aynı grafik üzerinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.50. 550 mm için Abaqus gerilme dağılımı

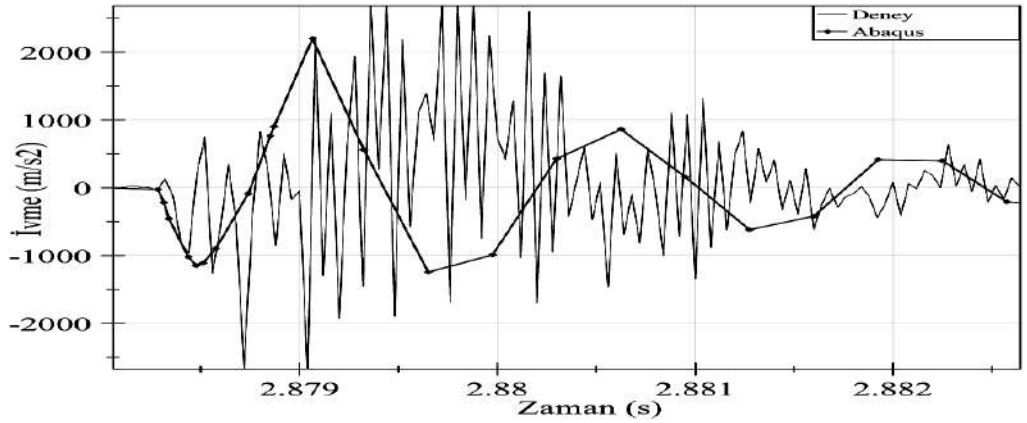


(a)

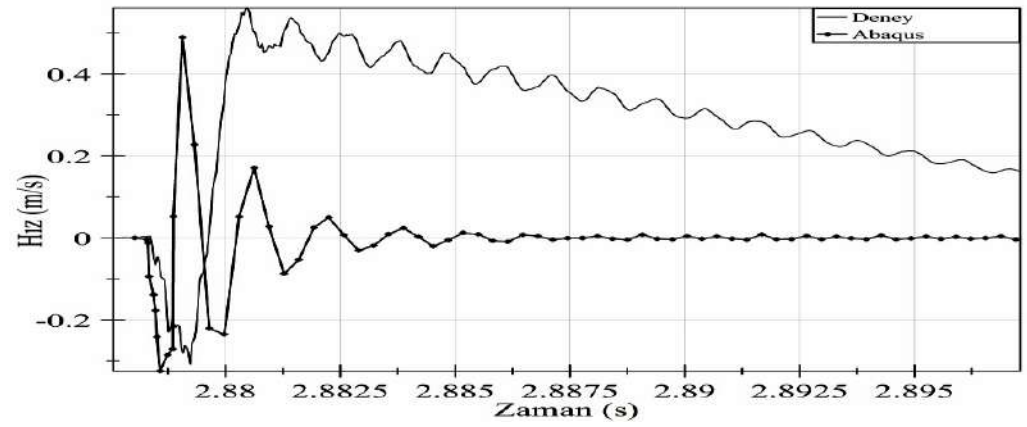


(b)

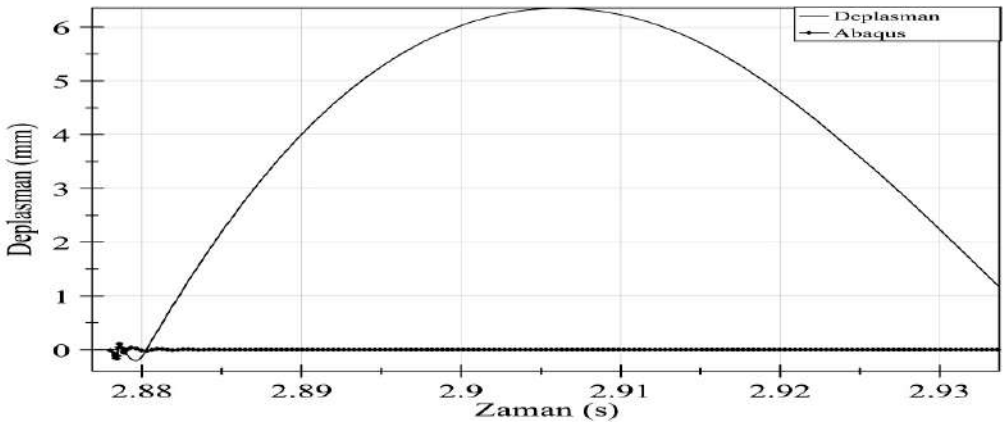
Şekil 6.51. İvme değerleri a) Abaqus analizi b) Deney sonucu



Şekil 6.52. SC10 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı ivme değerleri karşılaştırılması



Şekil 6.53. SC10 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı hız değerleri karşılaştırılması



Şekil 6.54. SC10 Deney ile Abaqus ilk çarpma anı deplasman değerleri karşılaştırılması

6.6. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde Abaqus analizi sonucunda elde edilen ivme-zaman, hız-zaman, deplasman-zaman grafikleri ve gerilme dağılımları deney sonuçları ile karşılaştırılmış elde edilen temel bulgular özetlenmiştir. Karşılaştırma işlemi sayısal değerlerin maksimumları üzerinde yapılmış ve elde edilen temel bulgular bu bölümde sunulmuştur.

Yapılan sonlu eleman modellemesinin bazı önemli kabuller içerdiği unutulmamalıdır. Sonlu eleman modeli oluşturulmaya çalışılan deney düzeneği, deney elemanı ve gerçekleşen fiziksel olay doğası gereği birçok belirsizlik içeren ve modellenmesi oldukça karmaşıktır.

Beton deney elemanı için, doğası gereği homojen olmayan, anizotrop ve lineer olmayan bir model oluşturulması gerekliliği bulunmaktadır. Ayrıca beton deney elemanının çekme yüzeyine yapıştırılan CFRP şerit, beton kiriş ile tam bağlı olarak modellenmiş ve aradaki temas yüzeyi modellenmemiştir. Temas problemleri, doğası gereği lineer olmayan problemlerdir. Modellemesi yapılan çarpma testi, çok kısa bir zaman aralığında gerçekleşmektedir. İki temas eden sürekli ortam arasında gerilme transferinin çok kısa sürede gerçekleştiği ve gerilme şiddetinin çok kısa sürede

değişime uğradığı fiziksel olaylardır. Bu nedenle analiz edilmeleri için gerekli olan zaman adımlarının ve analiz adımlarının çok titizlikle belirlenmesi gerektiği ve bazen bu adımların çok sayıda olması nedeniyle çok fazla bilgisayar kapasitesi ve zamanı gerektiren analizler olduğu unutulmamalıdır.

Bu çalışma kapsamında yapılan sonlu eleman modelinde, deney elemanının doğasında var olan lineer olmayan analiz gereksinimleri göz ardı edilerek bilgisayar zamanından tasarruf edilmeye çalışılmıştır. Deney elemanı beton olmasına rağmen lineer elastik olarak modellenmiş ve yapıştırılan CFRP şerit ile beton eleman arasındaki temas problemi basitleştirilerek CFRP şerit, beton kütleye tam aderans ile bağlanmıştır. Bütün analiz olanakları deney şekli olan çarpma yüklemesinin gerçeğe uygun olarak modellenmesi için kullanılmıştır. Analizlerde, gerçekte olduğu gibi çarpma anının modellenmesi için gerekli özen gösterilmiş ve non-lineer dinamik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, özetlenen temel yaklaşımlar ışığında elde edilen analiz sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması ve yorumlanmasının daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen ivme-zaman ve hız-zaman grafikleri incelendiğinde deneylerden elde edilen grafikler ile genel davranışlarının ve maksimum değerlerinin oldukça iyi uyum gösterdiği görülmektedir. Ancak analiz sonuçları deney sonuçlarına göre çok daha az noktadan oluştuğu için grafiklerde ancak maksimum sıçrama ve genel şekilleri uyumlu olmaktadır. Deneylerden dinamik data toplayıcı ile çok daha fazla data alındığı için deneysel grafikler çok daha fazla noktadan oluşmaktadır. Analitik grafiklerdeki nokta sayısı analiz için seçilen zaman adım aralığı ile yakından ilişki olup grafiklerin şekilleri bu değişken ile yakından ilişkilidir. Çekicin deney elemanı üzerinde hareketini tamamlayıncaya kadar geçen sürede yaptığı sekme sayısı ile analizlerden elde edilen sekme sayısı paralellik göstermektedir.

Deneysel çalışmada elde edilen grafikler ile sonlu eleman analiz sonucunda elde edilen grafikler bilgisayar ortamında üst üste getirilerek karşılaştırılmıştır. Ancak analiz sonucunda elde edilen deplasman değerleri deneysel deplasman değerlerinden

çok daha küçük olduğu görülmüştür. Bu aradaki farka modellemede yapılan kabullerin neden olduğu düşünülmektedir. Sonlu eleman modeli deney elemanına göre çok daha rijit olarak modellenmiştir. Yapılan kabuller içinde de kısaca özetlendiği gibi nonlineer olan beton eleman çekmede çatlayan, basınçta ezilen bir malzemeden üretilmiş ve eleman lineer elastik olarak modellenmiştir. Ayrıca belirli bir gerilme altında deplasmana izin vermesi gereken ve kendide deformasyon yapan CFRP şerit, beton elemana tam rijit bağlı olarak modellendiği ve aradaki temas parametreleri ihmal edildiği için deney elemanının bilgisayar modelinden gerçekte olduğundan daha rijit davrandığı düşünülmektedir.

Analiz sırasında elde edilen gerilme dağılımı grafikleri incelendiğinde çarpma olayının meydana gelmesiyle birlikte, numune üzerinde hızlı bir gerilme yığılımı ortaya çıkmakta ve bu gerilme kalıcı olmaktadır. Elastik modüllerin farklılığından dolayı çekiç üzerindeki gerilmeler, numune üzerinde ortaya çıkan gerilmelerden çok fazla olmuştur. Gerilme yığılımlarının, darbe etkisiyle tekrarlı şekilde uygulanması ile numunelerde çatlak hattı ortaya çıkmaktadır. Deney elemanlarının testleri sırasında aldıkları hasar ve test sonucunda beton elemanda oluşan kırılma düzlemi sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme dağılım konturları ile uyumludur. Gerilme yığılımlarının meydana geldiği bölgelerde gerçek testlerde hasar ve kırılma düzlemi meydana gelmiştir.

Sonuç olarak çarpma etkisi ile beton üzerinde ortaya çıkan etkiler Abaqus sonlu eleman programı kullanılarak tasarımcılara fikir verebilecek ve ön tasarımda yararlanabilecekleri düzeyde bilgisayarda modellenebilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen ivme, hız ve deplasman-zaman eğrileri ve çatlak oluşum hattı, sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir.

6.7. Enerji Dengesi Prensibi İle Kinetik Enerji Değerlerinin Hesaplanması

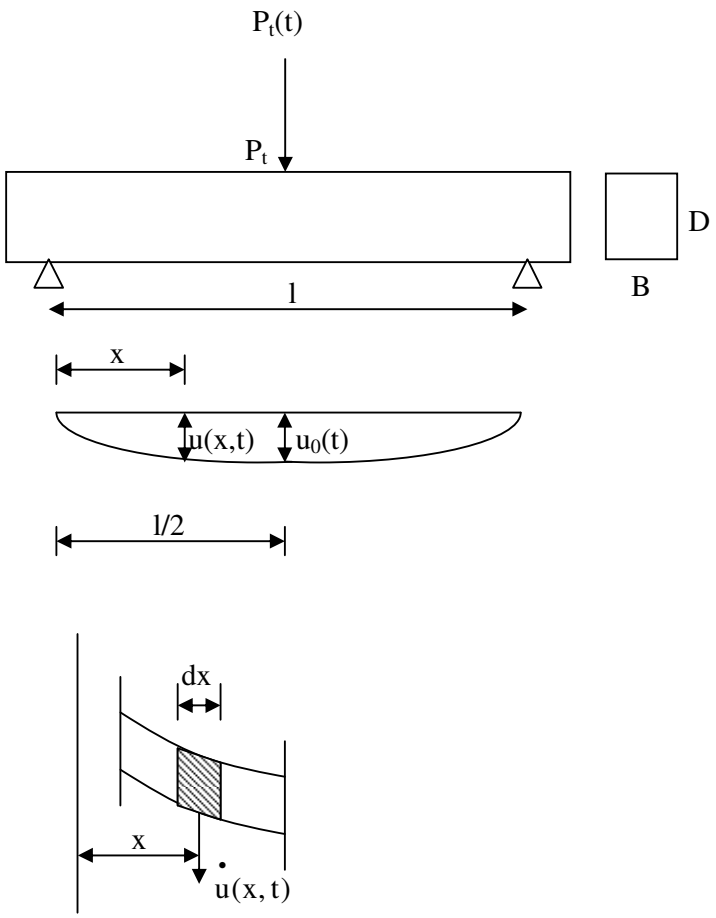
Yapılan deneyler ve analizlerden sonra elde edilen sonuçlarla deney elemanlarının enerji yutma kapasiteleri hesaplanmıştır. Enerji dengesi prensibi dış etkilerin kiriş üzerindeki etkilerini değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu model sadece elastik kirişlerde kullanılabilir. Bu nedenle analizde kirişin değerlendirilmesinde yükün tepe noktasına kadar olan kısmı kullanılmalıdır. Yükün en tepe noktasındaki anında çekicin tüm enerjisini kaybedip kirişe aktardığı kabul edilmektedir. Çekiçteki mevcut enerji kiriş üzerinde iki farklı formda ortaya çıkmaktadır. Bunlar, kinetik enerji ve eğilme enerjisi olarak. Bu enerji formlarından, kirişteki gerilmeleri yükselten eğilme enerjisi analizin ilk hedefidir. Aşağıda, eğilme enerjisi kinetik enerjiden ayrılmıştır[5].

Yapılan Kabuller:

1. Kirişin yükün tepe noktasında elastik olduğu
2. Kirişin sadece birinci modda yer değiştirme yaptığı
3. İlk temas anında çekicin enerjisini kaybettiği ve kirişin kinetik ve eğilme enerjisini absorbe ettiği
4. İlk sıçrama alınmış ve diğer sıçramalar göz ardı edilmiştir.
5. Deney düzeneğinin çeşitli parçalarındaki elastik deformasyonlardaki enerji kayıpları göz ardı edilmiştir.
6. Kirişteki yerdeğiştirme sinüsoidal kabul edilmiş ve

$$u(x,t) = u_0(t)\sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \tag{6.3}$$

Eş. 6.3 ile ifade edilmiştir.



Şekil 6.55. Kabul edilen kiriş deplasmanı

Eşitliklerde kullanılan simgeler

u(x,t) : Kiriş üzerinde mesnetten x uzaklıkta t zamanındaki yerdeğiştirme

$u_0(t)$: Kirişin orta noktasındaki t zamanındaki yerdeğiştirme

$\Delta E_0(t)$:Çekiç üzerinde t anındaki toplam enerji kaybı

T(t) : t anıda kirişteki kinetik enerji

U(t) : t anında kirişteki eğilme enerjisi

ρ : Betonun özgül ağırlığı

l : Mesnet açıklığı

B : Kirişin genişliği

D :Kirişin yüksekliği

$\Delta E_0(t)$i t anında çekiçteki enerji kaybı, momentum-anlık etki(impulse) ilişkisi kullanılarak elde edilebilir. Bunun için Eş. 6.4 kullanılabilir.

$$\Delta E(t) = \frac{1}{2} m_h \left[2a_h h - \left(\sqrt{2a_h h} - \frac{1}{m_h} \int P_t(t) dt \right)^2 \right] \tag{6.4}$$

$\Delta E_0(t)$ değerinin tamamını kirişe aktardığı kabul edilmiştir. Enerji denge eşitliğindeki diğer terimler göz ardı edildiğinde

$$\Delta E_0(t)=T(t)+U(t) \tag{6.5}$$

Eşitliği elde edilir.

Eş. 6.3'den herhangi bir noktadaki yer değiştirme değeri ile hız belirlenmektedir.

$$\dot{u}(x,t) = \dot{u}_0(t) \sin \frac{\pi x}{l} \tag{6.6}$$

Herhangi bir noktadaki eğim

$$u'(x,t)=u_0(t)\left[\frac{\pi}{l}\right]\cos\left[\frac{\pi x}{l}\right] \tag{6.7}$$

ve herhangi bir noktadaki eğrilik ise

$$u''(x,t)=-u_0(t)\left[\frac{x}{l}\right]^2 \sin\left[\frac{\pi x}{l}\right] \tag{6.8}$$

Kinetik enerjinin Belirlenmesi(T(t))

Şekil 6.55'de yerçekimi kuvveti ile hareket eden kütlenin kinetik enerjisi dT,

$$dT=\frac{1}{2}(\text{kütle})(\text{hız})^2$$

$$=\frac{1}{2}(\rho BDdx)\dot{u}^2(x,t) \tag{6.9}$$

$$T(t)=\int dT \tag{6.10}$$

$$=\int\frac{1}{2}BD\dot{u}^2(x,t)dx \tag{6.11}$$

Eş. 6.6'dan $\dot{u}(x,t)$ değeri Eş. 6.11'de yerine konulur ve basitleştirilirse

$$T(t)=\frac{\rho BDl}{4}\dot{u}_0^2(t) \tag{6.12}$$

Eğilme Enerjisinin Belirlenmesi(U(t))

Şekil 6.55'de yerçekimi kuvveti ile hareket eden kütlenin eğilme enerjisi dU,

$$dU=\frac{1}{2}EI(u''(x,t))^2dx \tag{6.13}$$

$$U(t)=\int dU \tag{6.14}$$

$$=\frac{1}{2}\int EI(u''(x,t))^2dx \tag{6.15}$$

Eş. 6.8'den u"(x,t) değeri Eş. 6.15'de yerine konulur ve basitleştirilirse

$$U(t)=\frac{\pi^4EI}{4l^3}u_0^2(t) \tag{6.16}$$

Toplam Enerji

Eş. 6.12 ve Eş. 6.16, Eş. 6.5'de yerine konursa

$$\Delta E_0(t) = \frac{\rho BDL}{4}\dot{u}_0^2(t) + \frac{\pi^4 EI}{4l^3}u_0^2(t) \tag{6.17}$$

Eş. 6.17 daha da basitleştirilirse

$$\Delta E_0(t) = A\dot{u}_0^2(t) + Bu_0^2(t) \tag{6.18}$$

$$A=\frac{\rho BDL}{4} \tag{6.19}$$

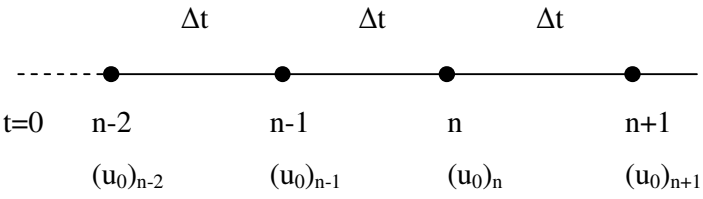
$$B=\frac{\pi^4 EI}{4l^3} \tag{6.20}$$

Eş. 6.18 nonlineer denklem olup $u_0(t)$ ve $\dot{u}(t)$ çözülmek zorundadır. Bunu için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır[5].

Sonlu Farklar Yöntemi

Bu yöntemde, diferansiyel denklemde zaman ekseni boyunca her noktada sırası ile tatmin edici sonuca ulaşıncaya kadar deneme yapılır. Eğer yerdeğiştirmeler $(u_0)_n$, $(u_0)_{n-1}$ ve $(u_0)_{n+1}$ bu sıraya göre zaman t , (t-Δt) ve (t+Δt) Şekil 6.56'dan n'inci noktanın solundaki noktadaki

$$\text{Eğim}=[(u_0)_n-(u_0)_{n-1}]/\Delta t \tag{6.21}$$



Şekil 6.56. Sonlu farklar yöntemi şekilsel gösterimi

$$\text{n'inci noktanın sağındaki eğim}=[(u_0)_{n+1}-(u_0)_n]/\Delta t \tag{6.22}$$

Buradan n'inci noktadaki ortalama eğim

$$(\dot{u}_0)_n = \frac{1}{2}\left[\frac{(u_0)_{n+1} - (u_0)_{n-1}}{\Delta t}\right] \tag{6.23}$$

Eş. 6.23, Eş. 6.18'de yerine konulup $(u_0)_{n+1}$ çözülürse

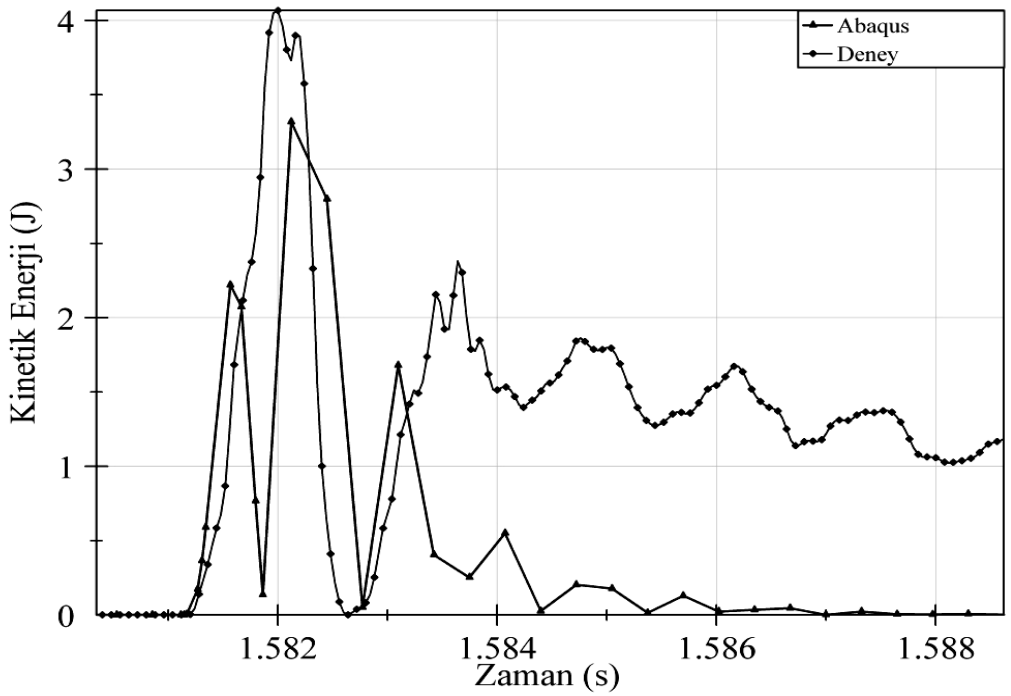
$$(u_0)_{n+1} = \sqrt{\frac{4}{A}\left[(\Delta E_0)_n - B(u_0)_n^2\right]\Delta t^2} + (u_0)_{n-1} \tag{6.24}$$

Burada, zaman ekseni boyunca önceki iki noktadaki yerdeğiştirme bilinirse ve sorulan noktadan bir önceki enerji girilirse Eş. 6.24'den herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme elde edilebilir. Çözüme başlamak için ilk iki nokta $(u_0)_1$ ve $(u_0)_2$ sıfır kabul edilir. Eş. 6.24, 3. noktadan ileriye doğru kullanılabilmektedir.

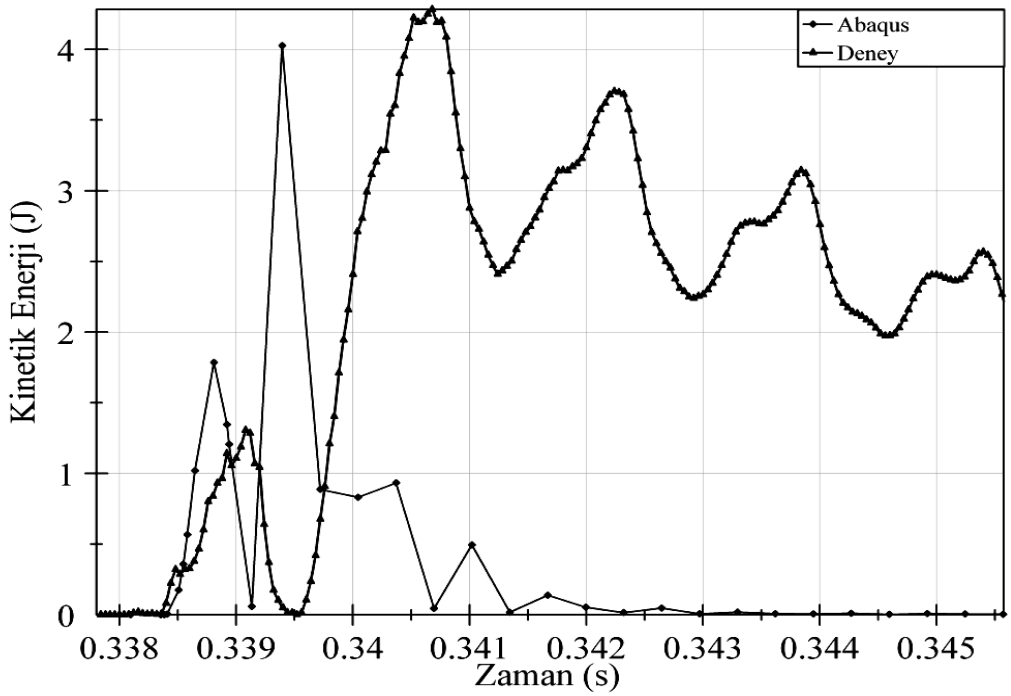
Zaman ekseni boyunca çeşitli noktalarda yerdeğiştirmeler pik yük bilinirse, Eş. 6.23, Eş. 6.12 ve Eş. 6.16 kullanılarak sırasıyla hız, kinetik enerji ve kirişin eğilme enerjisi hesaplanabilir.

6.8. Deney Kinetik Enerji Değerleri İle Abaqus Kinetik Enerji Değerlerinin Karşılaştırılması

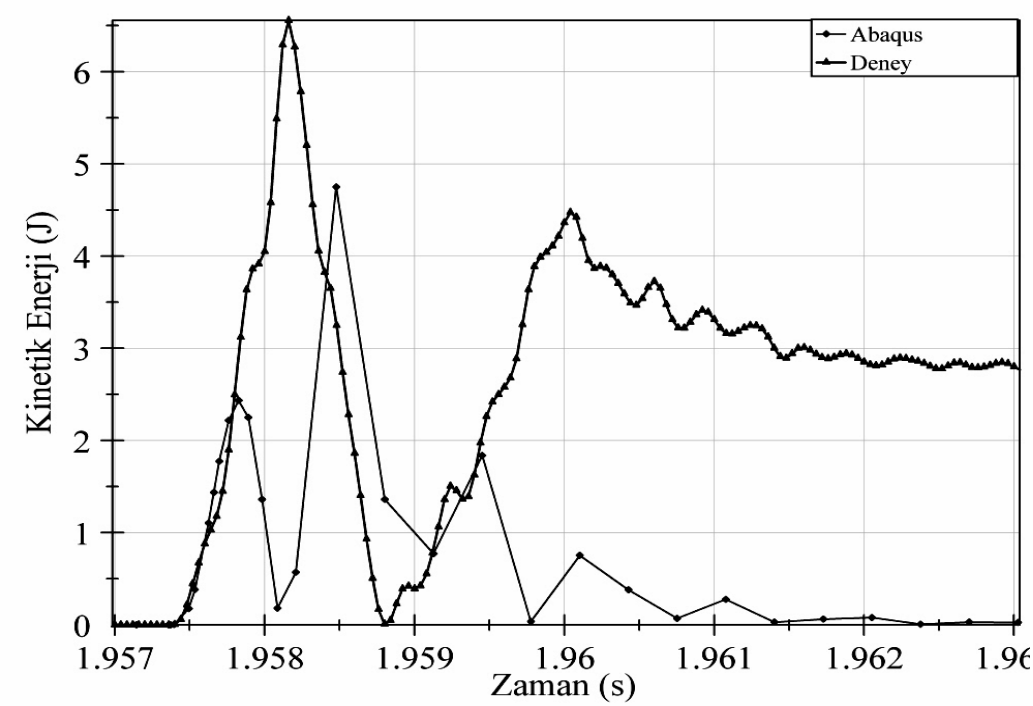
Deneylerde elde edilen ivme değerleri hız değerlerine dönüştürüldükten sonra Eş. 6.12'da yerine konularak kinetik enerji değerleri hesaplanmıştır. Abaqus programından elde edilen kinetik enerji değerleri ile grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Şekil 6.57 ile Şekil 6.66 arasında deneylerden elde edilen hız değerlerine göre hesaplanan kinetik enerji değerleri ile Abaqus programından elde edilen kinetik enerji değerleri aynı grafik üzerinde karşılaştırılmıştır.



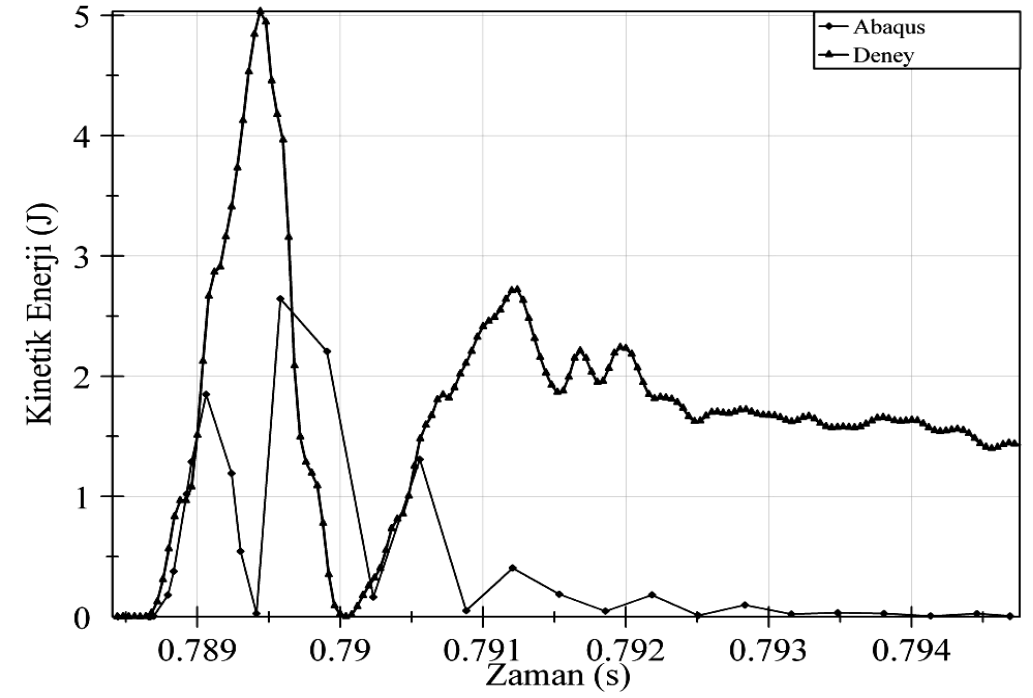
Şekil 6.57. Normal dayanımlı beton, 550 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



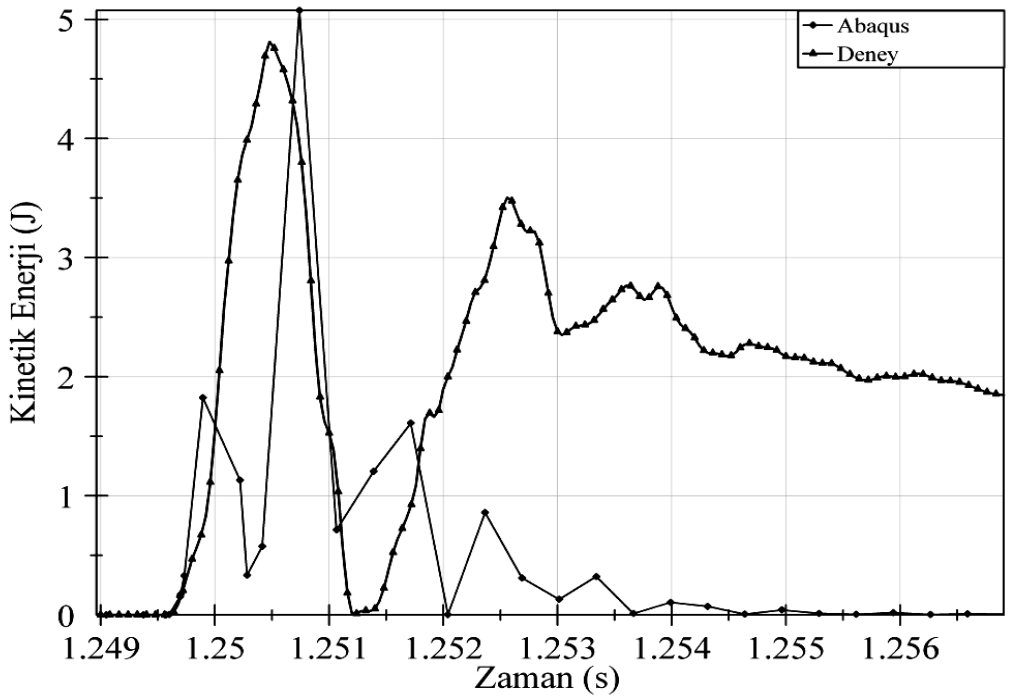
Şekil 6.58. Yüksek dayanımlı beton, 550 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



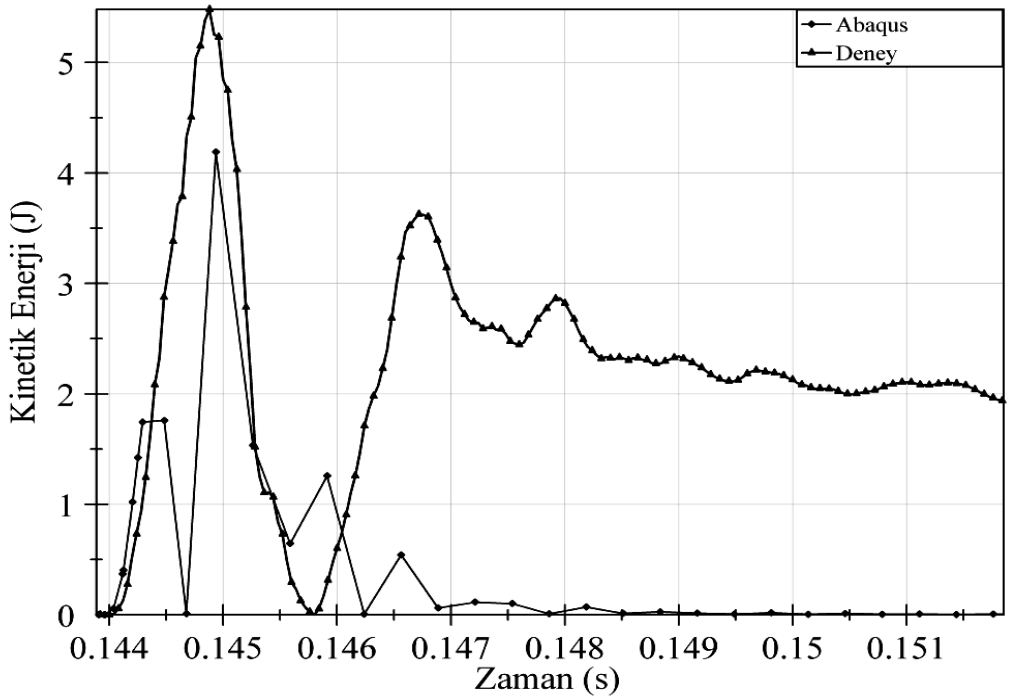
Şekil 6.59. Normal dayanımlı beton, 600 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



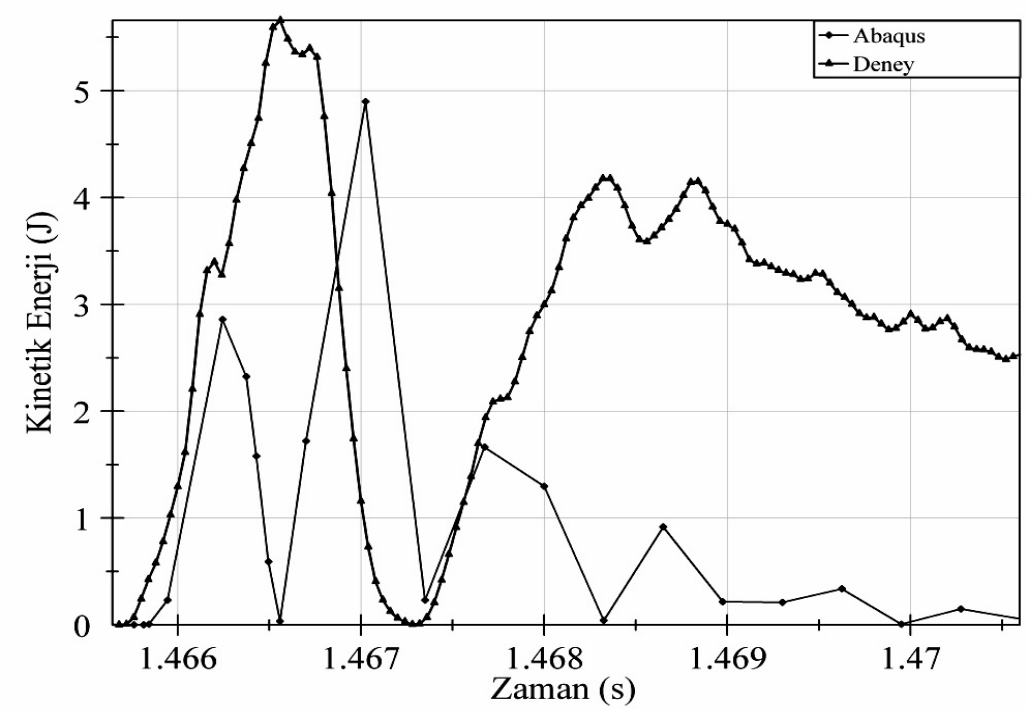
Şekil 6.60. Yüksek dayanımlı beton, 600 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



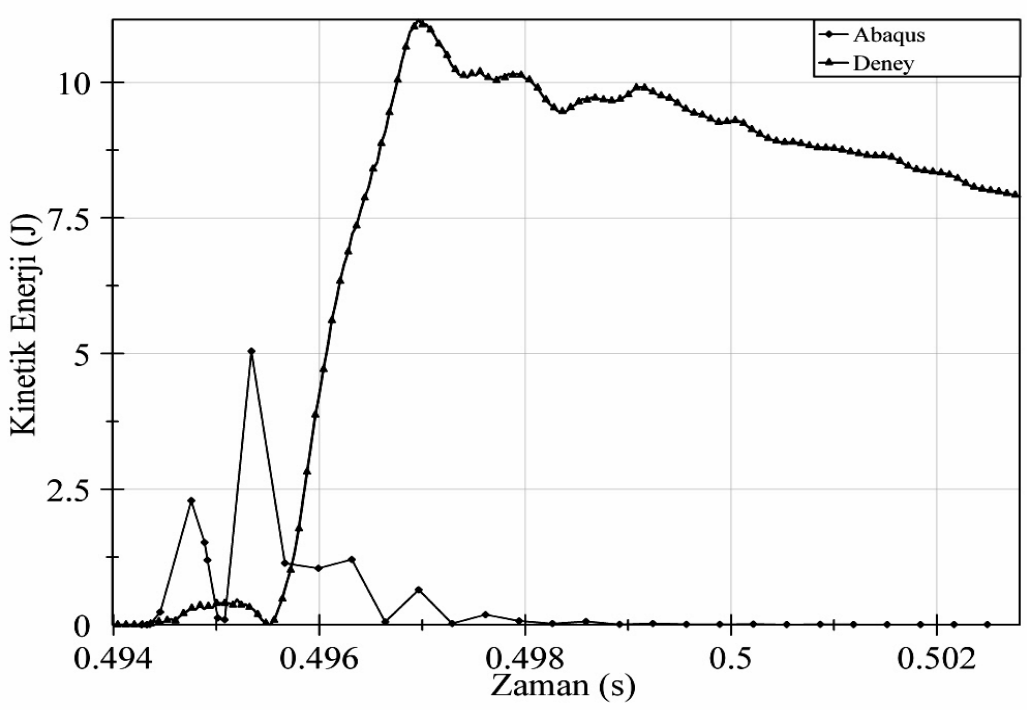
Şekil 6.61. Normal dayanımlı beton, 650 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



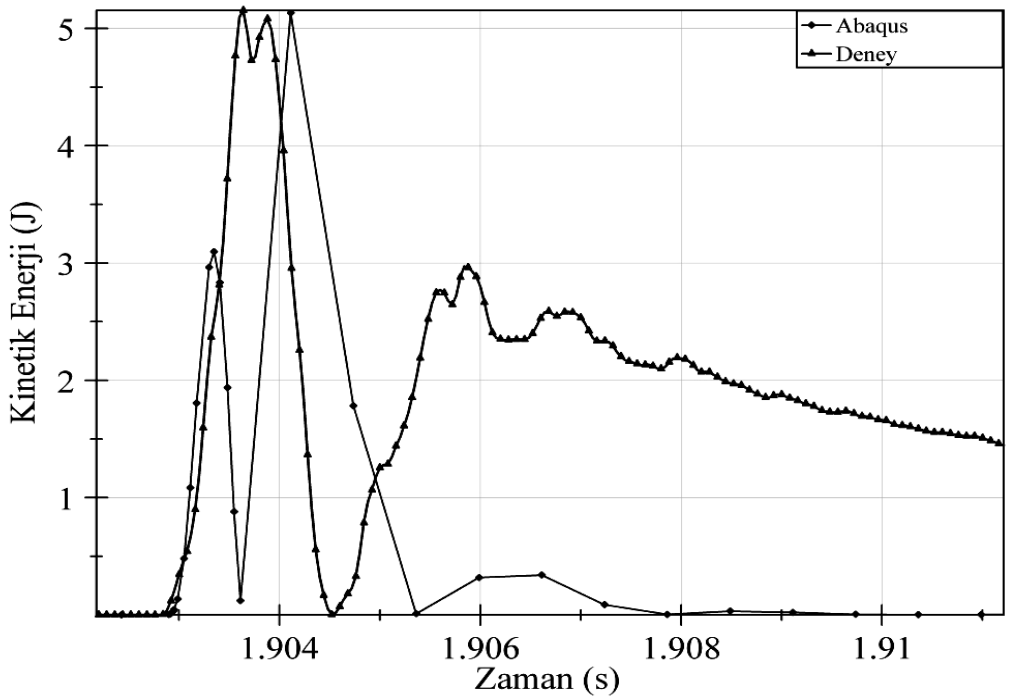
Şekil 6.62. Yüksek dayanımlı beton, 650 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



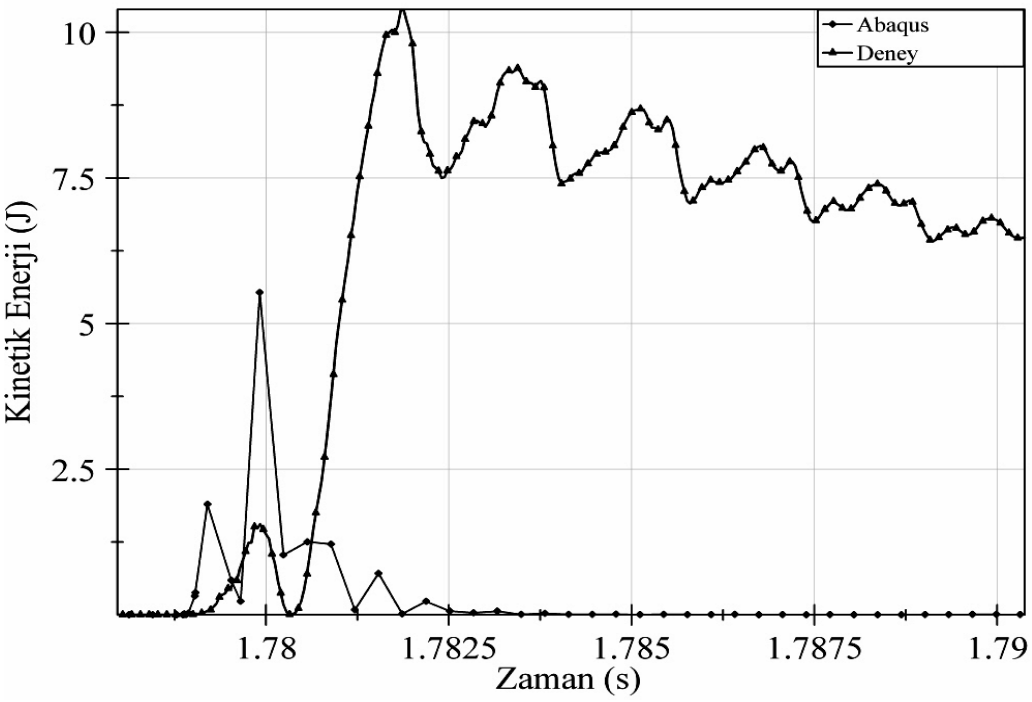
Şekil 6.63. Normal dayanımlı beton, 700 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



Şekil 6.64. Yüksek dayanımlı beton, 700 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



Şekil 6.65. Normal dayanımlı beton, 750 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması



Şekil 6.66. Yüksek dayanımlı beton, 750 mm yükseklik için kinetik enerji değerleri karşılaştırması

Şekil 6.57 ile Şekil 6.66 arasında şekillerde edilen grafiklerin karşılaştırılmasında görülmektedir ki enerji değerleri ve grafiksel şekiller paralellik göstermektedir. Elde edilen değerlerin maksimum olanları Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Kinetik enerji maksimum değerleri

Deney Elemanı	Yükseklik (mm)	Kinetik Enerji (J)	
		Deney Değerleri	Abaqus Değerleri
SC1	750	5,16	5,14
SC2	700	5,66	4,90
SC3	650	4,81	5,07
SC4	600	6,55	4,74
SC5	550	4,06	3,32
SC6	750	10,40	5,54
SC7	700	11,16	5,04
SC8	650	5,48	4,19
SC9	600	5,03	2,65
SC10	550	4,28	4,02

Çizelge 6.6'da görüldüğü gibi beton dayanımı ve çekicin düşme yüksekliği kinetik enerji değerlerinin değişimini etkilemektedir. Tabloda ki değerlerden yüksek dayanımlı betonla üretilen deney elemanlarının, normal dayanımlı deney elemanlarına göre daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Değerlerdeki lineerlikten sapma yapan değerler ise bize betonun homojen olmadığını ve aynı beton karışımı kullanılmasına rağmen farklı özellikler sergilediğinin bir göstergesi olduğu düşünülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında çekme yüzeyinde CFRP şeritler ile güçlendirilen beton kirişlerin serbest ağırlık düşürme test düzeneği ile çarpma etkisi altında test edilmesiyle çarpma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında incelenen değişkenler ağırlık düşürme yüksekliği ve beton basınç dayanımıdır. İki farklı beton basınç dayanımına sahip deney elemanı grubuna 5 farklı yükseklikten sabit ağırlıklı çekiç düşürülerek çarpma davranışları incelenmiştir. Deney elemanlarına çekme yüzeyinde uygulanan güçlendirme detayı tüm deney elemanları için özdeş olarak uygulanmıştır. 150 mm genişliğindeki CFRP şerit 500 mm uzunluğunda kiriş alt çekme yüzeyine yapıştırılmıştır. Değerlendirmeler, deney elemanlarını göçmeye götüren düşü sayısı, ivme-zaman, hız-zaman, deplasman zaman değerleri, bir düşüde meydana gelen sıçrama adedi ve her sıçrama arasındaki zaman aralığı karşılaştırılması, çatlak şekli ve çatlak gelişimi incelenerek yapılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında çarpışma testinin simülasyonunun yapılabileceği bir sonlu eleman yazılımı kullanılarak deneyler bilgisayar ortamında modellenmiştir. Sonlu eleman modellemesi için yaygın olarak kullanılan ve nonlineer dinamik analiz yapabilen Abaqus yazılımından yararlanılmıştır. Sonlu eleman analizi ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak bilgisayar modelinin deneysel sonuçlara uyumu incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalar ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Tüm dünyada çok yaygın olarak kullanılan bir inşaat malzemesi olan betonun çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranışı henüz bir standardı olmayan ve belirli bir test prosedürü mevcut bulunmayan bir yükleme türüdür. Bu konudaki deneysel verilerin son derece sınırlı olması ve standart bir test prosedürünün olmaması nedeniyle genelleştirilmesi oldukça zordur. Son yıllarda onarım ve güçlendirme çalışmalarının yaygınlaşması ve artması ile betonarme yapıların onarım ve güçlendirmesi için karbon takviyeli elyaf kumaşlar yaygın olarak kullanmaya başlanmıştır. Bu malzemenin beton üzerinde yaptığı etkilerin araştırıldığı, statik ve dinamik karakterini nasıl değiştirdiği konusunda oldukça fazla çalışma yapılmaktadır. Ancak yapılan literatür çalışmasında CFRP şeritler

ile güçlendirilmiş beton elemanların çarpma yüklemesi altındaki davranışını inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu konudaki deneysel verilerin bu nedenle son derece önemli olduğu düşünülmektedir. Yapılan testlerde son yıllarda betonun çarpma davranışını incelemekte en fazla yoğunlukla kullanılan serbest ağırlık düşürme test düzeneği kullanılmıştır. Bu çalışmanın elde edilen önemli sonuçlarından biri de çalışmanın yürütüldüğü birime çarpma test düzeneğinin kazandırılmasıdır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan test düzeneği çeşitli boyutlardaki deney elemanlarına değişken değerlerde ağırlığı 2500 mm yüksekliğe kadar olan bir yükseklikten düşürülerek test yapılabilme olanağı sağlamaktadır. Ayrıca çarpma testi ölçümlerine uygun dört kanalı bir veri toplama sistemi, ivme ölçerler ve yük ölçerde bu proje kapsamında test edilmiştir.

- Yapılan deneyler sonucunda deney elemanlarını göçmeye götüren düşü sayısı karşılaştırılmıştır. Düşü sayısı beton dayanımına göre ve düşü yüksekliğine göre lineer olarak kabul edilebilecek bir değişim göstermektedir. Fakat literatür incelemesinde karşılaştığımız araştırmalarda görüldüğü gibi lineerlik bazı deney elemanlarında bozulmuştur. Normal dayanımlı beton ile hazırlanan elemanlardan SC4 elemanı, yüksek dayanımlı beton ile hazırlanan SC7 ve SC9 elemanları lineerliği bozmuştur. Bunun birinci ve en önemli nedeninin betonun yapısal olarak homojen bir malzeme olmayışı olduğu düşünülmektedir. Betonun yapısındaki ana bileşen olan agrega ile ince malzemelerin oluşturduğu matris arasındaki etkileşim ve agreganın yapı içindeki dağılımının homojen olmaması deney elemanlarının özdeşliğini bozmaktadır. Ayrıca deney elemanlarına CFRP şeritler ile uygulanan güçlendirme detayı ne kadar özdeşte olsa uygulamadaki en ufak bir farklılık deney elemanlarının farklılaşmasına neden olmaktadır. CFRP şeridin yapışma yüzeyindeki en ufak bir farklılığın düşü sayılarındaki bu farklılaşmaya neden olabileceği düşünülmektedir.
- Sıçrama-zaman aralığı grafikleri incelendiğinde; sıçrama sayısı düşme yüksekliğine bağlı olarak değişmekte fakat zaman aralıkları örtüşmektedir. Bu durum bize beton yapısının her deney serisinde yer alan elemanlarda birbirine oldukça yakın özelliklerde olduğunu göstermiştir. Sıçrama sayısı hasarsız ilk düşüde daha fazla, ilk hasarın yaşandığı çevrimde daha az ve göçmenin meydana

geldiği çevrimde ise en düşük sayıda gerçekleşmektedir. Bu bulgu uygulanan düşü sayısının artması ile deney elemanlarının içerisinde meydana gelen hasarın ve içsel çatlakların giderek arttığının önemli bir göstergesidir. Normal dayanımlı deney serisinde ilk ağırlık düşürme çevriminden sonra düşü sayısı yüksek dayanımlı seriye göre daha hızlı azalmıştır. Bu bulgu normal dayanımlı deney serisinde içsel hasarın daha hızlı oluştuğunun bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

- Deney elemanlarında artan düşü sayısı ile meydana gelen çatlaklar gözle görülebilir duruma geldiğinde çatlakların elemanın üst kısmından başlayarak meydana geldiği ve CFRP yapıştırılmış alt yüzeye doğru ilerlediği görülmüştür. CFRP ile güçlendirilmeden test yapılan deneysel çalışmalarda ise tam tersi bir çatlak gelişimi gözlenmiştir. CFRP ile güçlendirilmiş deney elemanlarında ilk hasar alma için gerekli düşü sayısı artmakta ve deney elemanının göçmesi için gerekli düşü sayısı önemli oranda artmaktadır. Deney elemanlarının göçme şekli ise CFRP kullanılmayan elemanlara göre farklılık göstermektedir. CFRP kullanılmayan elemanlarda göçme ani meydana gelmekte ve çatlak oluşan noktadaki yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmaktadır. CFRP kullanılan deney elemanlarında ise göçme gerçekleşip kırılma düzlemi deney elemanlarını iki farklı parçaya ayırmasına rağmen eleman ayakta kalmaya devam etmekte ve CFRP hasar almadan eleman yüzeyine tutunmaya devam etmektedir. Bütün deneylerde CFRP ile güçlendirilen beton kiriş elemanlarda agrega yüzeyi ile matris birbirinden ayrılmasına rağmen CFRP şeritler beton yüzeyinden ayrılmamıştır.
- Deney elemanlarında meydana gelen kırılma yüzeyleri incelendiğinde normal dayanımlı elemanlarda genellikle agrega matris ayrımı agrega yüzeylerinin matristen ayrılması ile gerçekleşmiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda ise ince malzeme yoğunluğu fazla olması nedeniyle agregalar matristen ayrılmadan kırılmışlardır.
- Betonda çarpma etkisi altında elde edilen ivme-zaman grafikleri incelendiğinde düşü sayısı arttıkça çekiçte oluşan potansiyel enerjinin çarpma etkisiyle kinetik enerjiye dönüşümüyle malzemenin iç yapısında gözle görülmeyen hasarların

kalıcı olduğu, malzeme yapısına göre düşü sayısına bağlı olarak elastik durumdan plastik duruma geçildiği ve göçmeye ulaşıldığı gözlenmektedir.

- Çekicin deney elemanı ile ilk etkileşiminde meydana gelen ivme, yerçekimi ile aynı doğrultuda olup elemanda aşağı yönlü bir deformasyon oluşturmuştur. Deformasyon grafiklerinden görüldüğü gibi deplasman önce eksi değer almakta fakat bu değer elemanın hasarsız, ilk hasar ve göçme durumlarında oldukça küçük değerde kalmaktadır. Bu deplasman değeri elemanın göçme haline kadar çok küçük bir artış göstermiştir. Kiriş elemanın çekme bölgesi CFRP ile güçlendirildiği için eleman çekicin çarpma yönüne ters olarak hareket etmeye çalışmaktadır. Bu kamera ile alınan görüntülerde ve deformasyon grafiklerinden net bir şekilde görülmektedir.
- Sonlu eleman yazılımı olan Abaqus kullanılarak elde edilen ivme-zaman, hız-zaman, deplasman-zaman grafikleri ve gerilme dağılımları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan sonlu eleman modellemesinin bazı önemli kabuller içerdiği unutulmamalıdır. Sonlu eleman modeli oluşturulmaya çalışılan deney düzeneği, deney elemanı ve gerçekleşen fiziksel olay doğası gereği birçok belirsizlik içeren ve modellenmesi oldukça karmaşıktır. Beton deney elemanı doğası gereği homojen olmayan, anizotrop ve lineer olmayan bir model oluşturulması gerekliliği bulunmaktadır. Ayrıca beton deney elemanının çekme yüzeyine yapıştırılan CFRP şerit beton kiriş ile tam bağlı olarak modellenmiş ve aradaki temas yüzeyi modellenmemiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan sonlu eleman modelinde deney elemanının doğasında var olan lineer olmayan analiz gereksinimleri göz ardı edilerek bilgisayar zamanından tasarruf edilmeye çalışılmıştır. Deneylerde gerçekte olduğu gibi çarpışma anının modellenmesi için gerekli özen gösterilmiş ve non-lineer dinamik bir analiz gerçekleştirilmiştir.
- Sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen ivme ve hız zaman grafikleri incelendiğinde deneylerden elde edilen grafikler ile genel davranışlarının ve maksimum değerlerinin oldukça iyi uyum gösterdiği görülmektedir. Ancak analiz sonuçları deney sonuçlarına göre çok daha az noktadan oluştuğu için grafiklerde ancak maksimum sıçrama ve genel şekilleri uyumlu olmaktadır.

- Çekicin deney elemanı üzerinde hareketini tamamlayıncaya kadar geçen sürede yaptığı sekme sayısı ile analizlerden elde edilen sekme sayısı paralellik göstermektedir.
- Deneysel olarak elde edilen deplasman zaman grafikleri ile sonlu eleman analiz sonucunda elde edilen deplasman-zaman grafikleri şekilsel olarak birbirleri ile uyumlu elde edilmiştir. Ancak analiz sonucunda elde edilen deplasman değerleri deneysel deplasman değerlerinden çok daha küçük olduğu görülmüştür. Nonlineer olan beton eleman çekmede çatlayan ve basınçta ezilen bir malzemeden üretilen eleman lineer elastik olarak modellenmiştir. Ayrıca belirli bir gerilme altında deplasmana izin vermesi gereken ve kendide deformasyon yapan CFRP şerit beton elemana tam rijit bağlı olarak modellendiği ve aradaki temas parametreleri ihmal edildiği için deney elemanının bilgisayar modelinden gerçekte olduğundan daha rijit davrandığı düşünülmektedir.
- Gerilme yığılımlarının, darbe etkisiyle tekrarlı şekilde uygulanması ile numunelerde çatlak hattı ortaya çıkmaktadır. Deney elemanlarının testleri sırasında aldıkları hasar ve test sonucunda beton elemanda oluşan kırılma düzlemi sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme dağılım konturları ile uyumludur. Gerilme yığılımlarının meydana geldiği bölgelerde gerçek testlerde hasar ve kırılma düzlemi meydana gelmiştir.
- Yüksek dayanımlı betonla üretilen deney elemanlarının, normal dayanımlı deney elemanlarına göre daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışmanın CFRP şeritler işe güçlendirilmiş beton elemanların çarpma yüklemesi etkisindeki davranışlarının anlaşılması için bir başlangıç olduğu ancak sonuçların genelleştirilebilmesi için yapılan deney sayısının arttırılması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca çok daha büyük ölçekli ve donatılı betonarme kirişlerin incelenmesinin çalışma sonuçlarını genelleştirmek için önemli olduğu bir gerçektir. Ek olarak yapılabilecek gelecek çalışmalar için düşünülen bazı öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- İlk olarak farklı şekil ve boyuttaki deney elemanları üzerinde çarpma etkisi araştırılmalıdır.
- Kolon kiriş birleşimi vb. yapısal detaylar üzerinde çarpma deneyleri yapılmalıdır.
- Deney düzeneğine eklenecek olan yüksek hızlı bir kamera yardımıyla çatlak gelişiminin hızının tayini belirlenmelidir.
- Çarpma etkisi altındaki beton elemanlar içerisinde meydana gelen iç kuvvetlerden dolayı oluşan ve belirlenemeyen çatlakların, beton iç yapısının mikro düzeyde modellenerek çarpma etkisi altında araştırılmalıdır.
- Güçlendirme için kullanılan CFRP malzemesinin farklı çeşitleri ve eleman üzerinde yapıştırma şekilleri değiştirilerek göçme modları incelenmelidir.
- Deney elemanları hem statik kuvvetler altında hem de dinamik kuvvetler altında deney yapılarak göçme sonrası ortaya çıkan yüzeyler üzerinde matris ve agrega da meydana gelen hasarlar karşılaştırılarak malzeme özellikleri belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

1. Abaqus /Explicit User Manual, Version 6.7 (2007).

2. Arros, J., Doumbalski, N., "Analysis of aircraft impact to concrete structures", ***Nuclear Engineering and Design***, 237: 1241-1249 (2007).

3. Arslan, A., "Mixed-Mode fracture performance of fibre reinforced concrete under impact loading", ***Materials and Structures***, 28: 473-478 (1995).

4. Badr A., Ashour A.F., **"**Modified ACI Drop-Weight Impact Test for Concrete", ***ACI Materials Journal***, 102(4): 249-255 (2005).

5. Banthia, N. P., "Impact resistance of concrete", PhD Thesis, ***The University of British Columbia Department of Civil Engineering***, 40-94,184-195(1987).

6. Barr B., Baghli A., "A repeated drop-weight impact testing apparatus for concrete", ***Magazine of Concrete Research***, 40(144): 167-176 (1988).

7. Barr, B., Bouamrata, A., "Development of a repeated drop-weight impact testing apparatus for studying fibre reinforced concrete materials", ***Composites***, 19: 453-466 (1988).

8. Breen, C., Guild, F., Pavier, M., "Impact of thick CRFP laminates: the effect of impact velocity", ***Composites: Part A***, 36: 205-211 (2005).

9. Delhomme, F., Mommessin, M., Mougin, J. P., Perrotin, P., "Behavior of a structurally dissipating rock-shed: experimental analysis and study of punching effects", ***Internatıonal Journal of Solids and Structures***, 42: 4204-4219 (2005).

10. Erki M.A., Meier U., "Impact Loading of Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates", ***Journal of Composites for Construction***, 3(3): 117-124 (1999).

11. Go´mez-del Rı´o T., Zaera R., Barbero E., Navarro C., "Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature", ***Composites: Part B***, 36: 41-50 (2005).

12. Korotkov, V., Poprygin, D., Ilin, K., Ryzhov, S., "Determination of Dynamic Reaction in Concrete Floors of Civil Structures of Nuclear Power Plant in Accidental Drops of Heavy Objects", ***2004 Abaqus Users' Conference***, Boston, 399-408 (2004).

13. Marar K., Çelik T., Eren Ö., "Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber reinforced concrete", ***Materials Letters***, 47: 297-304 (2001).

14. Nataraja, M. C., Dhang, N., Gupta, A. P., "Statistical variations in impact resistance of steel fiber-reinforced concrete subjected to drop weight test", ***Cement and Concrete Research***, 29: 989-995 (1999).

15. Rambaud, P. B., Timsah, Y., Daudeville, L., Mazars, J., "Finite element modelling of concrete protection structures submitted to rock impacts", ***16th ASCE Engineering Mechanics Conference***, Seattle, 1-12 (2003).

16. Server, W. L., "Impact three-point bend testing for notched and precracked specimens", ***Journal of Testing and Evaluation***, 6: 29-34 (1978).

17. Siewert, T. A., Manahan, M. P., McCowan, M. P., Holt, J. M., Marsh, F. J., Ruth, E. A., "The history and importance of impact testing", ***Pendulum Impact Testing: A Century of Progress ASTM STP 1380***, West Conshohocken PA, 3-15 (1999).

18. Soroushian, P., Elzafraney, M., "Damage effects on concrete performance and microstructure", ***Cement and Concrete Composites***, 26: 853-859 (2004).

19. Suaris, W., Shah, S. P., "Properties of concrete subjected to impact", ***Journal of Structural Engineering***, 109: 1727-1741 (1983).

20. Tang, T., "Behavior of concrete beams retrofitted with composite laminates under impact loading", PhD Thesis, ***The University of Arizona Department Of Civil Engineering And Engineering Mechanics***, 21-68 (2002).

21. Tredgold, T., "Strength of cast iron",: 245-268(1824).

22. White, A.E. and Clark, C.L., "Bibliography of impact testing", ***Department of Engineering Research, University of Michigan***, 4-14 (1925).

23. Zineddin M., Krauthammer T., "Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading", ***International Journal of Impact Engineering***, 34: 1517-1534(2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: KANTAR, Erkan
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 08.01.1972, K.Maraş
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (312) 582 32 20
e-mail	: erkankantar@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri enstitüsü	1998
Lisans	Uludağ Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	1993
Lise	Yenimahalle Teknik Lisesi	1989

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2000-2003	Celal Bayar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
1999-2000	MSB. İzmir İnşaat Emlak Başkanlığı	Kontrol Mühendisi
1994-1999	Celal Bayar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Altan, F., Kantar, E., Canpolat, F., Nohutcu, H., "Sonlu Elemanlar yöntemi ile betonarme plakların burkulma hesabı", İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı V. Sempozyumu . İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi. İSTANBUL.

2. Altan, F., Kantar, E., Canpolat, F., Nohutcu, H., "Plakların burkulma analizi", İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı V. Sempozyumu İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi. İSTANBUL.

3. EREN, A. ve KANTAR, E., "Düşük Hacimli Yolların Sathi Kaplama İle AASHTO*-1986 Metodunu Kullanarak Dizaynı", Teknokrat Dergisi, Manisa İnşaat Mühendisleri Odası, Ocak 1997, Sayı 6, s 26-29

Hobiler

Futbol, Tarih, Tiyatro, Sinema, Koleksiyon