



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**GÜÇLENDİRİLMİŞ KİRİŞ-KOLON
BİRLEŞİMLERİNİN KIRILMA
MEKANİZMALARININ AKUSTİK EMİSYON
YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mustafa MENTEŞOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2019

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**GÜÇLENDİRİLMİŞ KİRİŞ-KOLON
BİRLEŞİMLERİNİN KIRILMA
MEKANİZMALARININ AKUSTİK EMİSYON
YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

Mustafa MENTEŞOĞLU

Danışman: Doç. Dr. Ninel ALVER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Yüksek Lisans Programı

İzmir

2019

Mustafa MENTEŞOĞLU tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Güçlendirilmiş Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Kırılma Mekanizmalarının Akustik Emisyon Yöntemiyle Belirlenmesi” başlıklı bu alıŐma E Lisansüstü Eğitim ve ğretim Yönetmeliği ile E Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve ğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 20.05.2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile baŐarılı bulunmuştur.

Jüri yeleri:

Jüri BaŐkanı : Doç. Dr. Ninel ALVER

Raportör ye : Doç. Dr. Emre ERCAN

ye : Doç. Dr. Hasan Murat TANARSLAN

İmza



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Güçlendirilmiş Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Kırılma Mekanizmalarının Akustik Emisyon Yöntemiyle Belirlenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, döküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

20 / 05 / 2019

Mustafa MENTEŞOĞLU

ÖZET**GÜÇLENDİRİLMİŞ KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN KIRILMA
MEKANİZMALARININ AKUSTİK EMİSYON YÖNTEMİYLE
BELİRLENMESİ**

MENTEŞOĞLU, Mustafa

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ninel ALVER

Mayıs 2019, 137 sayfa

Bu çalışmada, yapısal elemanlara CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer, Karbon Fiber Takviyeli Polimer) güçlendirmesi, çelik ceket ile güçlendirme ve içten ankraj ile çubuk ilave edilmesi gibi çeşitli güçlendirme teknikleri uygulanarak, güçlendirilmiş kiriş kolon birleşimlerinin kırılma mekanizmalarının, kırılmaya neden olan faktörlerin ve hasar durumlarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, 1/1 geometrik ölçekli 10 adet betonarme deney elemanı üretilerek tersinir tekrarlı yükleme altında test edilmiştir. Deney çalışmasında, 3 adet referans eleman, 4 adet CFRP ile güçlendirilmiş deney elemanı, 2 adet içten çubuk ankre edilerek güçlendirilmiş deney elemanı ve 1 adet çelik ceket ile güçlendirilmiş deney elemanı olmak üzere toplamda 10 adet deney elemanı test edilmiştir.

Deney esnasında birleşim bölgesinde meydana gelen çatlaklar tahribatsız muayene yöntemlerinden birisi olan Akustik Emisyon (AE) yöntemi ile incelenmiş; çatlak durumları (büyüklük, enerji) ve çatlak haritaları (çatlak büyüklükleri, çatlak genişlikleri, çatlak ilerleme doğrultuları ve çatlak türleri) dijital ortamda belirlenmiştir ve mekanik sonuçlarla birleştirilerek göçme nedeni ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar sözcükler: Akustik Emisyon, AE-SİGMA, Kırılma Mekanizması, Güçlendirme, CFRP, Kiriş-Kolon Birleşimi

ABSTRACT**DETERMINATION OF FRACTURE MECHANISMS OF
STRENGTHENED BEAM-COLUMN JOINTS WITH ACOUSTIC
EMISSION METHOD**

MENTEŞOĞLU, Mustafa

MSc in Civil Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ninel ALVER

May 2019, 137 pages

In this study, it is aimed to investigate the fracture mechanisms of reinforced beam-column joints, the factors causing fracture and the damage cases by applying various strengthening techniques such as strengthening with CFRP (carbon fiber reinforced polymer), strengthening with steel jacket and adding steel rods as inner anchorage. Within the scope of the study, 10 reinforced concrete test specimens having 1/1 geometric scale were produced and tested under cyclic loading. In the test run, 3 reference elements, 4 elements strengthened with CFRP, 2 test specimens reinforced with internal steel rods and 1 steel-jacketed test specimen were tested.

Cracks occurring in the joint region during the test were investigated by Acoustic Emission (AE) method which is one of non-destructive testing methods; crack size, crack widths, crack propagation directions and crack types were determined in the digital form and were combined with unit deformation measurement results to reveal the cause of failure.

Keywords: Acoustic Emission, AE-SIGMA, Fracture Mechanism, Strengthening, CFRP, Beam-Column Joint

ÖNSÖZ

Betonarme çerçeve elemanlarda kiriş-kolon birleşimi oldukça önem teşkil eden bir bölgedir. Deprem yükleri altında kiriş-kolon birleşimleri büyük kuvvetlere maruz kalmakta ve bu da yapı davranışını oldukça etkilemektedir. Özellikle büyük depremlerde birleşim bölgesinde kesme etkileri yoğunlaşmakta, kesmeye karşı güçsüz bir birleşim, düğüm noktasının ve bazen de bütün yapının ani olarak göçmesine sebep olmaktadır.

Betonarme elemanların dışarısında gerçekleşen gözle görülebilir çatlaklar ile birlikte içerisinde de çatlaklar meydana gelebilir. Beton içerisinde ve gözle görülemeyen mikro büyüklükteki bu çatlakları ve çatlak yayılımlarını belirlemek tahribatsız test yöntemleri ile mümkündür.

Bu çalışma kapsamında tahribatsız test yöntemlerinden biri olan AE (Akustik Emisyon) yöntemi kullanılmıştır. AE ile betonda gelişen mikroçatlakları, kırılma kaynağının lokasyonunu, çatlak büyüklüğü ve enerjisini ve çatlamanın başlangıcını belirlemek mümkündür. Ayrıca AE-SiGMA (Simplified Green's Function for Moment Tensor Analysis) analizi ile çatlak gelişimi, hareketi ve türleri de belirlenebilir. Bu sayede güçlendirilmiş betonarme birleşimdeki kılcal çatlak gelişim mekanizması, betondaki mikroskopik çatlak gelişimi ve sonuç olarak bu çatlakların güçlendirme malzemesinin altındaki ilerleyişi belirlenebilir.

İZMİR

20/05/2019

MUSTAFA MENTEŞOĞLU

İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
TABLolar DİZİNİ	xxv
1. GİRİŞ	1
2.GENEL BİLGİLER	3
2.1 Akustik Emisyon (AE).....	3
2.1.1 AE'nin Tarihçesi.....	3
2.1.2 AE'nin Uygulama Alanları	4
2.1.3 AE'nin Genel Özellikleri	4
2.1.4 AE Yöntemi ve Sinyal Özellikleri	5
2.2 AE-SİGMA (Simplified Green's Function for Moment Tensor Analysis) Yöntemi.....	7
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	25
3.1 Deney Elemanları.....	25

3.2 Malzemeler.....	34
3.2.1 Donatı	34
3.2.2 Beton	35
3.2.3 CFRP	36
3.2.4 Epoksi.....	36
3.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi.....	38
3.4 Deney Düzeneği	39
3.5 Akustik Emisyon Test Sistemi	46
4.DENEY SONUÇLARI	53
4.1 Mekanik Bulgular.....	53
4.2 AE Bulguları	54
4.2.1 Deney Elemanı-1	55
4.2.2 Deney Elemanı-2.....	61
4.2.3 Deney Elemanı-3.....	67
4.2.4 Deney Elemanı-4.....	73
4.2.5 Deney Elemanı-5.....	79
4.2.6 Deney Elemanı-6.....	85
4.2.7 Deney Elemanı-7.....	91
4.2.8 Deney Elemanı-8.....	97

4.2.9 Deney Elemanı-9.....	103
4.2.10 Deney Elemanı-10.....	109
4.2.11 En Az Altı Sensör Tarafından Algılanan Göçme Sonrası Hasar Haritaları	115
4.2.12 İb Değer Analizi ile Numunelerin Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması	121
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	125
5.1 Bulguların Değerlendirilmesi.....	125
5.2 Sonuçlar Ve Öneriler	128
KAYNAKLAR DİZİNİ	131
TEŞEKKÜR.....	135
ÖZGEÇMİŞ	137

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.AE Oluşumu ve Algılanması (Ohtsu, 2015).....	5
Şekil 2.2.AE Ekipmanı ve İşlem Sırası (Ohtsu, 2015)	5
Şekil 2.3. Kaiser Etkisi (NDT Resource Center, 2019)	6
Şekil 2.4.AE parametreleri (Ohno and Ohtsu, 2010).....	7
Şekil 2.5.Kırılma modları (a) mod I (b) mod II (c) mod III (Ohno and Ohtsu, 2010).....	8
Şekil 2.6.Çatlamadan dolayı AE dalgalarının oluşması (Ohtsu vd., 1999) 9	
Şekil 2.7.Moment tansörü bileşenleri	9
Şekil 2.8.AE dalga formu ve SiGMA analizinin iki parametresi (Ohno and Ohtsu, 2010).....	11
Şekil 2.9.AE kaynak yerinin belirlenmesi (Ohno and Ohtsu, 2010)	12
Şekil 2.10.Moment tansörünün öz değerlerinin birleştirilmiş analizi (Ohtsu, 2009)	14
Şekil 2.11. Uddin (2004)'in çalışmasındaki beton eleman yüzeyindeki oyuk ve sensör yerleşimi.....	15
Şekil 2.12. Ohtsu et al. (2007)'nin çalışmasında kiriş üzerine sensör yerleşimi.....	16
Şekil 2.13.Ohtsu and Kawasaki (2010)'nin deneysel çalışmasında silindir elemanlara sensör yerleşimi.....	17

Şekil 2.14. Ohtsu and Kawasaki (2010)'nin deneysel çalışmasında betonarme eleman ve sensör yerleşimi.....	17
Şekil 2.15. Alver vd. (2014) çalışmasındaki güçlendirme şekilleri	19
Şekil 2.16.Yue (2015)'nin çalışmasındaki deney düzeneği ve sensör yerleşimi	20
Şekil 2.17.Selman vd. (2015) çalışmasında (a)güçlendirme şekli (b) sensör yerleşimi	21
Şekil 2.18.Ma and Li (2017)'nin çalışmasındaki deney düzeneği ve sensör yerleşimi	22
Şekil 2.19. Benavent et al. (2010) çalışmasındaki deney düzeneği ve sensör yerleşimi	23
Şekil 3.1.Referans-1 elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları	27
Şekil 3.2.Referans-2 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları	28
Şekil 3.3.Referans-3 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları	28
Şekil 3.4.Deney Elemanı-4'e ait güçlendirme detayı.....	29
Şekil 3.5.Deney Elemanı-5'e ait güçlendirme detayı.....	30
Şekil 3.6.Deney Elemanı-6'ya ait güçlendirme detayı.....	30
Şekil 3.7.Deney Elemanı-7'ye ait güçlendirme detayı.....	31
Şekil 3.8.Deney Elemanı-8'e ait güçlendirme detayı.....	32
Şekil 3.9.Deney Elemanı-9'a ait güçlendirme detayı.....	33

Şekil 3.10.Deney Elemanı-10'a ait güçlendirme detayı	34
Şekil 3.11.MasterBrace SAT 4500 (Epoksi).....	37
Şekil 3.12.Donatı ve kalıpların hazırlanması	38
Şekil 3.13.Beton dökümü.....	39
Şekil 3.14.Deney düzeneği (yükleme çerçevesi)	40
Şekil 3.15.Deney elemanlarına ait yükleme düzeneği	41
Şekil 3.16.Yatay pistonlar	42
Şekil 3.17.(a) Hidrolik güç ünitesi (b) hız kontrol ünitesi	42
Şekil 3.18.Deney Elemanı-1'e uygulanan yük-çevrim grafiği	43
Şekil 3.19.Deney Elemanı-2'ye uygulanan yük-çevrim grafiği	43
Şekil 3.20.Deney Elemanı-3'e uygulanan yük-çevrim grafiği	44
Şekil 3.21.Deney Elemanı-4'e uygulanan yük-çevrim grafiği	44
Şekil 3.22.Deney Elemanı-5'e uygulanan yük-çevrim grafiği	44
Şekil 3.23.Deney Elemanı-6'ya uygulanan yük-çevrim grafiği	45
Şekil 3.24.Deney Elemanı-7'ye uygulanan yük-çevrim grafiği	45
Şekil 3.25.Deney Elemanı-8'e uygulanan yük-çevrim grafiği	45
Şekil 3.26.Deney Elemanı-9'a uygulanan yük-çevrim grafiği	46
Şekil 3.27.Deney Elemanı-10'a uygulanan yük-çevrim grafiği	46
Şekil 3.28.Deney kapsamında kullanılan AE sistemi	47

Şekil 3.29.(1) Beton numune, (2) Sensör, (3) Ön Yükseltici, (4) Süzgeç, (5) Güç Yükseltici, (6) Sayıcılar, Sinyal İşleme Kartı (8 kanallı AE sistem kartı), (7) Bilgisayar	47
Şekil 3.30.Sensörlerin yerleştirilmesi.....	48
Şekil 3.31.Deney elemanları üzerindeki sensörlerin yerleşimi.....	49
Şekil 4.1.Deney elemanlarının yük-deplasman zarf eğrileri.....	54
Şekil 4.2.Deney Elemanı-1'e ait AE parametre analizi bulguları.....	57
Şekil 4.3.Deney Elemanı-1'in 5. ve 7. çevrimler sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları.....	58
Şekil 4.4.Deney Elemanı-1'in 11.yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	59
Şekil 4.5.Deney Elemanı-1'in SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	60
Şekil 4.6.Deney Elemanı-2'ye ait AE parametre analizi bulguları.....	63
Şekil 4.7.Deney Elemanı-2'nin 3. ve 5. yük çevrimi sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	64
Şekil 4.8.Deney Elemanı-2'nin 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	65
Şekil 4.9.Deney Elemanı-2'nin SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	66
Şekil 4.10.Deney Elemanı-3'e ait AE parametre analizi bulguları.....	69
Şekil 4.11.Deney Elemanı-3'ün ileri ve geri 5. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları.....	70

Şekil 4.12.Deney Elemanı-3'ün 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	71
Şekil 4.13.Deney Elemanı-3'ün SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	72
Şekil 4.14.Deney Elemanı-4'e ait AE parametre analizi bulguları.....	75
Şekil 4.15.Deney Elemanı-4'ün 4. ve 9. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	76
Şekil 4.16.Deney Elemanı-4'ün 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	77
Şekil 4.17.Deney Elemanı-4'ün SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	78
Şekil 4.18.Deney Elemanı-5'e ait AE parametre analizi bulguları.....	81
Şekil 4.19.Deney Elemanı-5'in 3. ve 8. Yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	82
Şekil 4.20.Deney Elemanı-5'in 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	83
Şekil 4.21.Deney Elemanı-5'in SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	84
Şekil 4.22.Deney Elemanı-6'ya ait AE parametre analizi bulguları.....	87
Şekil 4.23.Deney Elemanı-6'nın 5. ve 7. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	88
Şekil 4.24.Deney Elemanı-6'nın 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	89
Şekil 4.25.Deney Elemanı-6'nın SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	90

Şekil 4.26.Deney Elemanı-7'ye ait AE parametre analizi bulguları.....	93
Şekil 4.27.Deney Elemanı-7'nin 8. ve 9. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	94
Şekil 4.28.Deney Elemanı-7'nin 14. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	95
Şekil 4.29.Deney Elemanı-7'nin SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	96
Şekil 4.30.Deney Elemanı-8'e ait AE parametre analizi bulguları.....	99
Şekil 4.31.Deney Elemanı-8'in 7. ve 12. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	100
Şekil 4.32.Deney Elemanı-8'in 13. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	101
Şekil 4.33.Deney Elemanı-8'in SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	102
Şekil 4.34.Deney Elemanı-9'a ait AE parametre analizi bulguları.....	105
Şekil 4.35.Deney Elemanı-9'un 5. ve 10. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	106
Şekil 4.36.Deney Elemanı-9'un 12. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	107
Şekil 4.37.Deney Elemanı-9'un SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası	108
Şekil 4.38.Deney Elemanı-10'a ait AE parametre analizi bulguları.....	111
Şekil 4.39.Deney Elemanı-10'un 5. ve 6. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları	112

- Şekil 4.40.Deney Elemanı-10'un 14. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları113
- Şekil 4.41.Deney Elemanı-10'un SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası114
- Şekil 4.42.Deney Elemanı-1 ve Deney Elemanı-2'ye ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivitelerin AE konumlandırma sonuçları116
- Şekil 4.43.Deney Elemanı-3 ve Deney Elemanı-4'e ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivitelerin AE konumlandırma sonuçları117
- Şekil 4.44.Deney Elemanı-5 ve Deney Elemanı-6'ya ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivitelerin AE konumlandırma sonuçları118
- Şekil 4.45.Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-8'e ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivitelerin AE konumlandırma sonuçları119
- Şekil 4.46.Deney Elemanı-9 ve Deney Elemanı-10'a ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivitelerin AE konumlandırma sonuçları120
- Şekil 4.47.Deney elemanlarının Ib değerleri (Deney Elemanı-1, 2, 3, 4 ve 5)122
- Şekil 4.48.Deney elemanlarının Ib değerleri (Deney Elemanı-6, 7, 8, 9 ve 10)123
- Şekil 5.1..Deney elemanlarının karşılaştırmalı kümülatif ve bir vuruş başına düşen AE enerjisi salınımları126

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1.Deney Elemanları ve Güçlendirme Özellikleri	26
Tablo 3.2.Kullanılan donatıların özellikleri.....	35
Tablo 3.3.Deney elemanlarında kullanılan beton karışım oranı	35
Tablo 3.4.Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan CFRP malzemenin mekanik özellikleri	36
Tablo 3.5.Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan epoksi malzemesinin teknik özellikleri	37
Tablo 3.6.Epoksi karışım oranları.....	37
Tablo 3.7.Deney elemanı-3 AE sensör koordinatları (m).....	49
Tablo 3.8.Deney elemanı-2 AE sensör koordinatları (m).....	50
Tablo 3.9.Deney elemanı-3 AE sensör koordinatları (m).....	50
Tablo 3.10.Deney elemanı-4 AE sensör koordinatları (m).....	50
Tablo 3.11.Deney elemanı-5 AE sensör koordinatları (m).....	51
Tablo 3.12.Deney elemanı-6 AE sensör koordinatları (m).....	51
Tablo 3.13.Deney elemanı-7 AE sensör koordinatları (m).....	51
Tablo 3.14.Deney elemanı-8 AE sensör koordinatları (m).....	52
Tablo 3.15.Deney elemanı-9 AE sensör koordinatları (m).....	52
Tablo 3.16.Deney elemanı-10 AE sensör koordinatları (m).....	52

Tablo 4.1.Mekanik bulgular (dayanım ve deplasman)..... 53



1. GİRİŞ

Deprem yükleri altındaki kiriş-kolon birleşimleri büyük kuvvetlere maruz kalmakta ve yapı davranışı oldukça etkilenmektedir. Bu nedenle betonarme çerçeve elemanlarda kiriş-kolon birleşimleri büyük önem taşıyan bir bölgedir. Büyük depremlerde kolon-kiriş birleşim bölgesinde kesme etkileri artmakta, bu artış düğüm noktasının ve yapının ani göçmesine neden olabilmektedir. 1999 yılında Türkiye'nin Kocaeli kentinde meydana gelen depremde yıkılan yapılar bu tip göçmelere en iyi örnektir. Bu nedenle, depreme dayanıklı yapıların oluşturulmasında güçsüz kiriş-kolon birleşimlerinin güçlendirilmesi önemlidir. Bu problemle başa çıkmak için beton mantolama, bulonlu çelik levha ile güçlendirme, oluklu çelik saclarla güçlendirme, dış yüzeyden güçlendirme ve FRP (Fiber Takviyeli Polimer) ile sarmalama gibi çeşitli güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Konuyla ilgili yapılmış çalışmalar, bu güçlendirmelerin birleşimin sünekliliğini, yük ve enerji tüketim kapasitelerini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir.

Mevcut test yöntemleri ile güçlendirilmiş betonarme kiriş-kolon birleşim bölgesinde yük altında oluşan gözle görülmeyen çatlakları, güçlendirme malzemesi ile mevcut beton ara yüzündeki aktiviteleri ve güçlendirme uygulaması nedeniyle betonarme elemanın iç bölgesinde oluşan ve elemanı göçmeye götüren çatlakları tamamen doğru olarak belirlemek mümkün değildir. Bu hasarların yerlerini saptamak, büyüklüğünü belirlemek ve yapının performansı hakkında bilgi sağlamak için en uygun yöntemler tahribatsız test etme yöntemleridir. Tahribatsız test yöntemlerinden birisi de akustik emisyon (AE) yöntemidir.

AE yöntemi düşük yük seviyelerinde gelişen çatlakların gelişmelerinin belirlenmesinde ve artan yükler altında çatlakların yönleri ve şekilleri hakkında detaylı bilgi sağlayan gelişmiş bir test metodudur. Bu yöntem ile betonun iç bölgesinde gelişen mikro büyüklükteki hasarları bile belirlemek mümkündür. AE ile betonda gelişen mikroçatlakları, kırılma kaynağının lokasyonunu, çatlak büyüklüğü ve enerjisini ve çatlamanın başlangıcını belirlemek mümkündür.

Bu tez çalışmasında, kesme donatısı yetersiz düğüm noktalarından oluşan betonarme deney numuneleri ayrı ayrı karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), çelik ankrajlar ve çelik ceket takviyelerle güçlendirilmiştir. Güçlendirilen numunelerin donatı detayları ve boyutları aynıdır. Bu da çeşitli güçlendirme

tekniklerini birbirleriyle ve referans deney elemanları ile karşılaştırma imkanı sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında, 3 adet referans eleman, 4 adet CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı, 2 adet içten çelik çubuk ankre edilerek güçlendirilmiş deney elemanı ve 1 adet çelik ceket ile güçlendirilmiş deney elemanı olmak üzere toplamda 10 adet deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanlarının tümü 1/1 geometrik ölçeklidir. Güçlendirilmiş deney elemanları, 3 numaralı deney elemanı ile aynı donatı düzenine sahiptir. Deney elemanları tersinir tekrarlı yükleme altında test edilmiştir. Her bir deney elemanı yükleme esnasında AE test sistemi ile izlenmiştir.



2.GENEL BİLGİLER

2.1 Akustik Emisyon (AE)

Tahribatsız muayene (Non-destructive Testing, NDT), malzeme, bileşen ve düzeneklerin karakteristiklerindeki farklılıkları, parça veya sistemin hizmet verilebilirliğini tahrip etmeden inceleme, test etme veya değerlendirme işlemidir. Muayene veya test tamamlandığında, parça hala kullanılabilir (The American Society for Nondestructive Testing, 2017).

Günümüzde yapılarda sıkça kullanılan tahribatsız test yöntemleri şunlardır;

- Akustik Emisyon (AE),
- Ultrason,
- Termografi,
- Radar,
- Darbe Yansıma.

Bu çalışmada hasar tespitlerinin yapılması ve değerlendirilmesi için Akustik Emisyon (AE) tahribatsız muayene yöntemi kullanılmıştır.

AE test yöntemi, yük veya gerilme altındaki yapı veya bileşenlerde, hasar tespitlerinin yapılması ve konumlarının belirlenmesi için kullanılan tahribatsız test yöntemidir.

Çatlak sınıflandırması, yönü, gelişim doğrultusu gibi bilgiler, AE'nin parametre ve sinyal analizi gibi farklı analiz yöntemleri kullanılarak elde edilebilir (Behnia vd., 2014). Ayrıca AE tekniğinde yapının hasarının başlaması ve ilerlemesi nedeniyle gerçek zamanlı ve yerinde inceleme yapılabilmesi diğer yöntemlerden ayıran özelliğidir (Sagasta et al., 2018).

2.1.1 AE'nin Tarihçesi

AE'nin kökeninin kesin olarak belirlenmesi zordur. M.Ö. 6.500 gibi erken bir tarihte çömlekçilerin seramiklerinin soğutulması sırasında duyulabilir sesleri dinledikleri ve bu seslerin yapısal başarısızlığa işaret ettiği biliniyordu. AE'nin ilk belgelenmiş gözlemleri, 8. yüzyılda Arap simyacı Jabir ibn Hayyan tarafından yapılmıştır.

19. yüzyılın sonlarındaki birçok metinde, kalay, demir, kadmiyum ve çinko gibi malzemelerin ürettiği duyulabilir emisyonlara atıfta bulunulmuştur. Albert Portevin ve Francois Le Chatelier, sıkıştırılmış bir Al-Cu-Mn (Alüminyum-Bakır-Manganez) alaşımındaki akustik emisyonları gözlemlemiştir.

Çalışmalar 1900'lü yılların ortalarında da devam etmiş ve Joseph Kaiser tarafından 'Çekme Gerilmesi Altındaki Metalik Malzemelerdeki Ses Ölçümlerinden Sonuçlar' başlıklı doktora tezi tamamlanmıştır. Kaiser'in bu araştırması, günümüz AE testlerinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir (NDT Resource Center, 2019).

Son yıllarda, AE teknikleri önemli bir gelişme göstermiştir ve diğer tahribatsız değerlendirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, ekipmanın çalışmasını engellememesi, daha iyi güvenilirlik ve daha fazla kolaylık nedeniyle metal endüstrisi, inşaat mühendisliği, kaya kazısı ve madencilik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ma and Li, 2017).

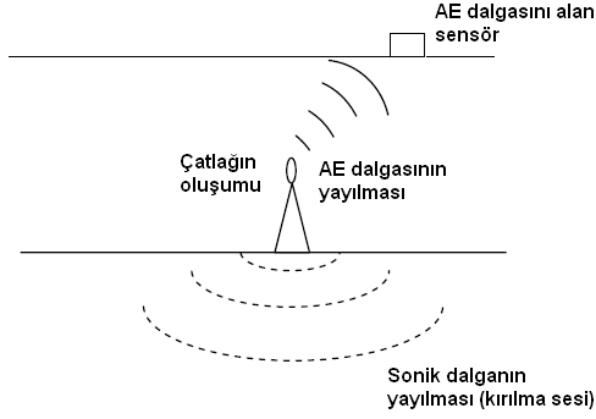
2.1.2 AE'nin Uygulama Alanları

AE testi, boru hatları, basınçlı kaplar, depolama tankları, köprüler, uçaklarda ve çeşitli kompozit ve seramik bileşenlerde uygulanabilir. Kaynak işlemlerinin izlenmesi gibi kontrol uygulamalarında da kullanılmaktadır (NDT Resource Center, 2019).

2.1.3 AE'nin Genel Özellikleri

ASTM E1316 standardına göre, tahribatsız muayene yöntemleri, yapının gelecekteki yararlığını ve servis ömrünü azaltmayacak şekilde malzemeleri ve bileşenlerini incelemek için kullanılan teknik yöntemlerdir.

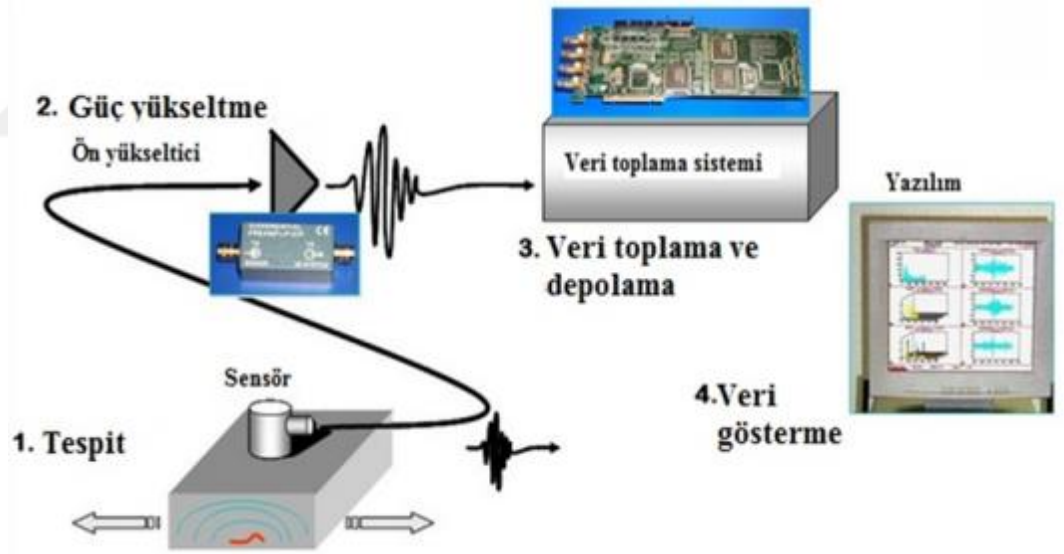
AE, gerilme altındaki malzemelerin içerisindeki yerel kaynağın hızla enerji salarak geçici elastik dalgalar ürettiği olaylar veya bu şekilde oluşan geçici elastik dalgalar olarak tanımlanır. Akustik emisyon, mikro ölçekli bir sismik olaydır. Malzeme içindeki kırılmanın başladığı noktalarda bir enerji açığa çıkar ve bu da AE elastik dalgaları olarak malzeme içerisinde yayılırlar. Yüzeğe ulaşan elastik dalgalar, malzeme yüzeyine yerleştirilen AE sensörleri yardımı ile algılanır ve analiz edilir (Şekil 2.1). Bu yöntem ile kırılmanın başladığı yer ve zaman belirlenebilir (Ohtsu, 2015).



Şekil 2.1.AE Oluşumu ve Algılanması (Ohtsu, 2015)

2.1.4 AE Yöntemi ve Sinyal Özellikleri

AE sistemleri sensör, ön yükseltici, süzgeç, güç yükseltici, veri toplama ve depolama sistemi ve veri gösterim aygıtlarından oluşur. Bu aygıtlar Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



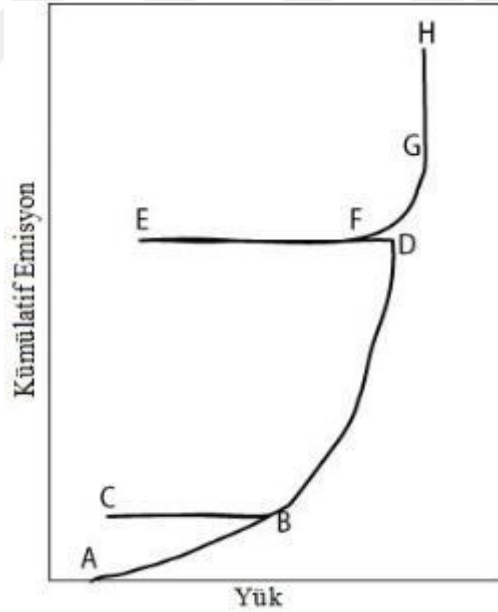
Şekil 2.2.AE Ekipmanı ve İşlem Sırası (Ohtsu, 2015)

AE sinyalleri, bir malzemenin yüzeyindeki dinamik hareketler olarak algılanır ve sensör tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülür. Elektrik sinyalleri yükseltilir ve filtrelenir.

AE sensörleri kullanılarak ölçülen sinyaller, diğer yöntemlere kıyasla küçük büyüklüktedir. Sonuç olarak, sensörler tarafından elde edilen AE sinyalleri çok

zayıftır ve algılanacak ve kaydedilecek şekilde yükseltilmelidir. Bu nedenle şekil 2.2’de görüldüğü gibi ön yükseltici kullanılmaktadır (Ohtsu, 2015).

Dalganın genliği ve AE tarafından açığa çıkarılan enerjinin miktarı, kırılmanın büyüklüğü ile ilgilidir. Emisyonun genliği çatlak ilerleyişinin hızıyla ve meydana gelen yüzey alanının miktarıyla doğru orantılıdır. Malzemede meydana getirilen süreksizlikler, önceki gerilmeyi aşmıyaya kadar hareket edemez ve genişemez. Bu olaya “Kaiser etkisi” denir. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi yük arttırıldığında (AB bölümü) AE olayı açığa çıkar. Yük kaldırılıp, tekrar uygulandığında (BCB bölümü), AE olayı B noktasını aşmıyaya kadar meydana gelmez. Yük tekrar arttırıldığında AE olayı gerçekleşir ve kaldırıldığında durur. Bununla birlikte, F noktasında uygulanan yük, önceki maksimum yüke (D) ulaşmadığı halde, önemli emisyonlara neden olan yeterli yüksekliktedir. Bu olay da “Felicity etkisi” olarak bilinir. Diğer bir deyişle, Felicity oranı, AE’nin tekrar başladığı noktadaki yükün, uygulanan maksimum yüke oranı (F/D) olarak tanımlanır. Son olarak, yük sabit tutulduğu halde AE artarsa (GH bölümü), yapıda önemli kusurlar meydana gelir (NDT Resource Center, 2019).



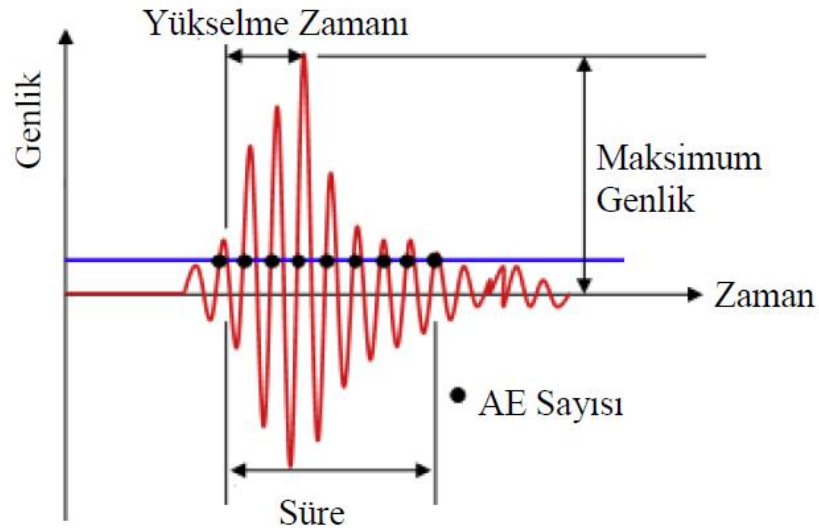
Şekil 2.3. Kaiser Etkisi (NDT Resource Center, 2019)

AE alanında, AE toplama sistemi tarafından toplanan verilerin analiz yöntemleri iki türe ayrılabilir: AE parametre analizi ve AE dalga formu analizi. AE parametre analizi basitliği ve yüksek hesaplama verimliliği için yaygın olarak kullanılmaktadır. AE dalga formu analizi tüm sinyal bilgilerini kullanır ve zaman alıcıdır. AE sinyalleri geometri sınır koşullarına, malzeme heterojenliğine,

yayıma yoluna ve sensör özelliklerine duyarlı olduklarından, AE dalga biçimi analizinin uygulanması sınırlıdır (Ma and Li, 2017).

AE tekniğinin en önemli özelliklerinden birisi arkadaki gürültüyü elimine ederek, AE pulslarını data setlerine dönüştürmektir. Bu amaçla eşik seviyeleri (thresholds) kullanılır. AE tekniği beş temel sinyal ölçme parametresine sahiptir. Şekil 2.4’de gösterildiği gibi; Genlik (Amplitude, A), dalga şeklindeki ölçülen en büyük voltajdır. dB olarak ifade edilir. Yükselme zamanı (Rise time, R), eşik değerini geçen ilk nokta ile pik sinyal arasındaki zaman aralığıdır. Süre (Duration, D), ilk ve son eşik değerini geçen sinyaller arasındaki zaman farkıdır. Sayı (Counts, N), eşik seviyesini geçen puls sayısıdır. AE olayının genliğine ve malzemenin özelliklerine bağlıdır. Bir vuruş, bir veya birden fazla sayı üretebilir.

Düzeltilmiş sinyal zarfı altındaki ölçülen alan (Measured Area under the Rectified Signal Envelope, MARSE, E) emisyonun enerjisini belirleyebildiği için yararlıdır. Sinyalin genliğine ve devam süresine duyarlıdır.

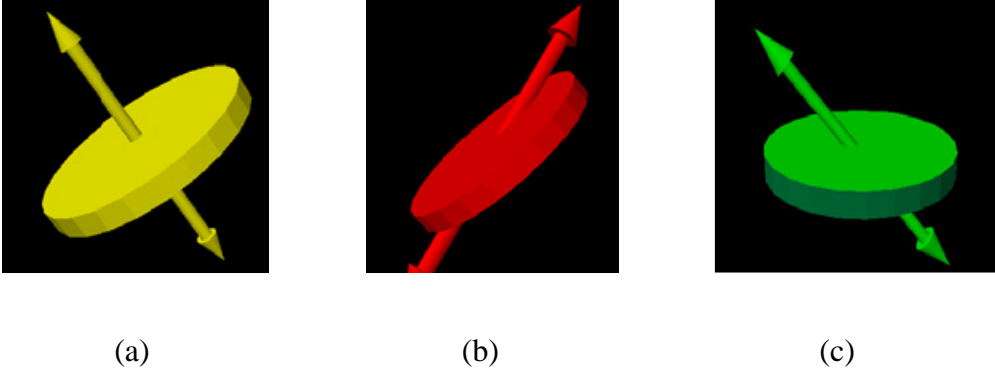


Şekil 2.4. AE parametreleri (Ohno and Ohtsu, 2010)

2.2 AE-SiGMA (Simplified Green’s Function for Moment Tensor Analysis) Yöntemi

SiGMA (Simplified Green’s Function for Moment Tensor Analysis) analizi yöntemi, AE yöntemini daha da geliştirmek amacıyla Profesör Masayasu Ohtsu tarafından bulunmuştur. Bu yöntem ile kırılmanın başladığı yer ile çatlak hareket yönü ve çatlak tipi belirlenebilmektedir. AE-SiGMA analizi üç boyutlu AE kaynak lokasyonu ve AE kaynağının moment tansörü analizinden oluşmaktadır.

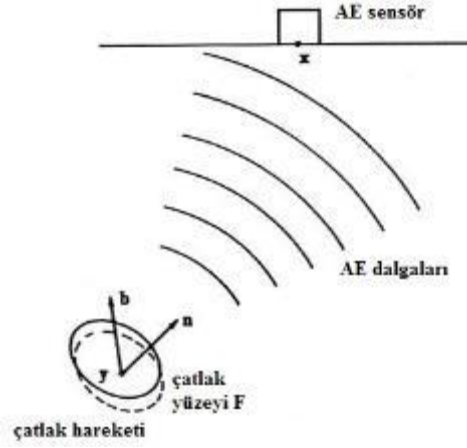
Üç çeşit başlıca çatlak modu vardır. Bunlar; mod I (çekme çatlağı), mod II (kesme çatlağı) ve mod III (karışık mod). Bu çatlak modları Şekil 2.5’de gösterilmiştir (Ohno and Ohtsu, 2010).



Şekil 2.5.Kırılma modları (a) mod I (b) mod II (c) mod III (Ohno and Ohtsu, 2010)

Çatlak, çatlak hareketi vektörü olan b ve birim normal vektör olan n ile modellenmektedir. Çatlamadan dolayı meydana gelen AE dalga hareketi Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Çatlak hareketi $b(y)l_k S(t)$ olarak ifade edilebilir. Burada $b(y)$ çatlak yer değiştirmesinin büyüklüğünü, l_k çatlak hareketinin yön vektörünü, $S(t)$ ise çatlak hareketinin kaynak zaman fonksiyonunu göstermektedir. AE dalga hareketi $u(x, t)$, genelleştirilmiş AE teorisine dayanarak Denklem 1’de gösterildiği gibi tanımlanabilir.

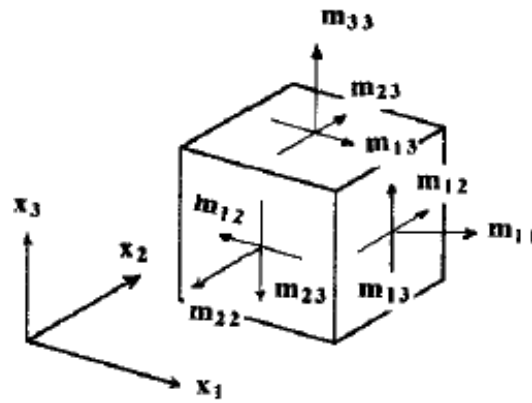
$$\begin{aligned}
 u_i(x,t) &= \int_F T_{ik}(x,x',t).b_k(x',t)u_i(x,t)dF = \int_F C_{pqkl}.G_{ip,q}(x,y,t).[b(y)l_k S(t)n_l dF] \\
 &= G_{ip,q}(x,y,t).m_{pq}.S(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$



Şekil 2.6.Çatlamadan dolayı AE dalgalarının oluşması (Ohtsu vd., 1999)

Denklem-1'de belirtilen $G_{ip,q}(x,y,t)$, Green fonksiyonlarının üç boyutlu türevlerini ifade eder. C_{pqkl} malzeme elastik sabitlerini, m_{pq} ise moment tansörlerini temsil eder. F (bütün çatlak alanı) üzerinden integralin alınması ile moment tansörü elde edilir. Moment tansörünün elde edilmesi Denklem 2'de gösterilmiştir. İzotropik ve elastik bir malzemenin moment tansör bileşenleri; m_{11} , m_{22} , m_{33} iki kutuplu kuvvetleri ve m_{12} , m_{23} , m_{13} ikili çift kuvvetleri olarak temsil edilmektedir. Moment tansörü bileşenleri Şekil 2.7'de gösterilmiştir.

$$\int_F C_{pqkl} * [b(y)l_k]n_l dF = [C_{pqkl}l_k n_l] \left[\int_F b(y) dF \right] = [C_{pqkl}l_k n_l] \Delta V = m_{pq} \quad (2)$$



Şekil 2.7.Moment tansörü bileşenleri

C_{pqkl} elastik sabitlerinin birimi N/m^2 ve çatlak hacmi ΔV m^3 olmak üzere bu çarpım, moment fiziksel birimini ifade eden Nm olması sebebiyle m_{pq} moment

tansörü olarak adlandırılır. İzotropik ve elastik bir cisimde moment tansörü bileşenleri denklem 3'deki gibi ifade edilir.

$$C_{pqkl} = (\lambda \delta_{pq} \delta_{kl} + \mu \delta_{\pi k} \delta_{\theta l} + \mu \delta_{pl} \delta_{qk})$$

$$m_{pq} = (\lambda l_k n_l \delta_{pq} + \mu l_p n_q + \mu l_q n_p) \Delta V \quad (3)$$

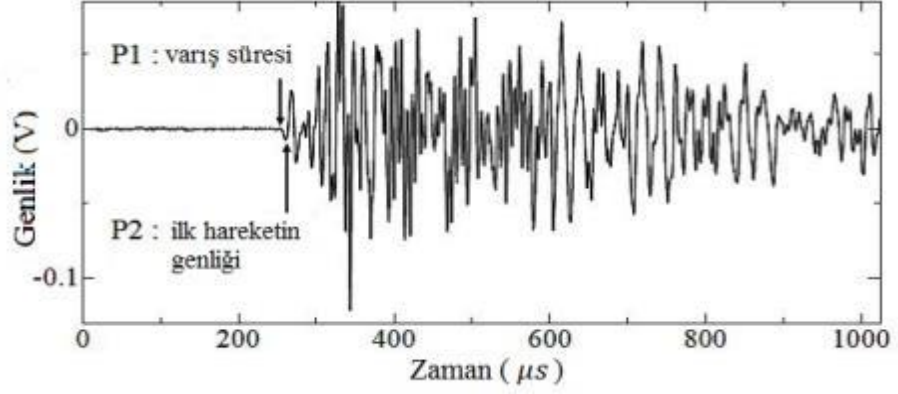
Burada λ ve μ Lamé malzeme sabitleridir. Bu ifadeler yerine yazılarak moment tansörü denklem 4'deki gibi elde edilir.

$$m_{pq} = \begin{bmatrix} \lambda l_k n_k + 2\mu l_1 n_1 & \mu(l_1 n_2 + l_2 n_1) & \mu(l_1 n_3 + l_3 n_1) \\ \mu(l_1 n_2 + l_2 n_1) & \lambda l_k n_k + 2\mu l_2 n_2 & \mu(l_2 n_3 + l_3 n_2) \\ \mu(l_1 n_3 + l_3 n_1) & \mu(l_2 n_3 + l_3 n_2) & \lambda l_k n_k + 2\mu l_3 n_3 \end{bmatrix} \Delta V \quad (4)$$

SiGMA analizinde, AE dalga şeklinin ilk hareketi Denklem 5'de gösterildiği gibi ifade edilir. Bu denklemin çözülebilmesi için iki parametre gereklidir; elastik dalganın varış süresi (P1) ve ilk hareketin genliği (P2). Dalga şekli ve parametreler Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

$$A(x) = C_s \frac{\text{Re } f(t, r)}{R} r_p m_{pq} r_q \quad (5)$$

Bu formülde C_s , kalibrasyon katsayısını ifade eder. Yansıma katsayısı $\text{Re}f(t,r)$, sensör duyarlılığının yönü olan t olarak elde edilir. r , sensör ile AE kaynağı arasındaki vektörel mesafeyi ifade eder. R ise bu vektörel mesafenin büyüklüğüdür. AE kaynak yerinin belirlenmesi Şekil 2.9'daki gibi yapılmaktadır (Ohtsu et al., 1999).



Şekil 2.8.AE dalga formu ve SiGMA analizinin iki parametresi (Ohno and Ohtsu, 2010)

5 numaralı denklemi izotropik ve elastik bir malzeme için tekrar yazarsak,

$$A(x) = C_s \frac{\text{Ref}(t,r)}{R} (r_1 \quad r_2 \quad r_3) \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Kesme çatlakları için moment tansörü,

$$m_{pq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mu\Delta V \\ 0 & 0 & 0 \\ \mu\Delta V & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Olursa öz değer analizinden üç özdeğer $\mu\Delta V$, 0 ve $-\mu\Delta V$ elde edilir. $\mu\Delta V$, maksimum kayma etkisi olarak X ile adlandırılırsa kesme çatlakları için üç özdeğer X, 0, -X olur.

Çekme çatlakları için moment tansörü,

$$m_{pq} = \begin{bmatrix} \lambda\Delta V & 0 & 0 \\ 0 & \lambda\Delta V & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda + 2\mu)\Delta V \end{bmatrix} \quad (8)$$

olur.

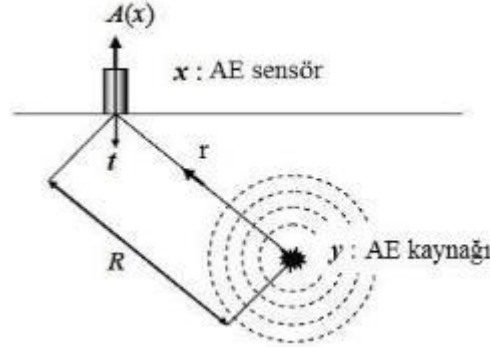
Çekme çatlağı özdeğerleri

$$\begin{bmatrix} \lambda \Delta V \\ \lambda \Delta V \\ (\lambda + 2\mu) \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2\mu \Delta V}{3} \\ \frac{-2\mu \Delta V}{3} \\ \frac{4\mu \Delta V}{3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\lambda + \frac{2\mu}{3} \right) \Delta V \\ \left(\lambda + \frac{2\mu}{3} \right) \Delta V \\ \left(\lambda + \frac{2\mu}{3} \right) \Delta V \end{bmatrix} \quad (9)$$

şeklinde yazılırsa ilk kısım deviatorik (hacimsel olmayan) ve ikinci kısım izotrop bileşenler olmak üzere çekme çatlakları için üç özdeğer, $-Y/2 + Z$, $-Y/2 + Z$ ve $Y+Z$ olur.

AE kaynağının yeri, sinyalin sensörlere varış zamanı farklarından elde edilir. Daha sonra moment tansörü bileşenlerini elde edebilmek için Denklem 5 çözülür. Moment tansörü, simetrik ve ikinci dereceden olduğundan bağımsız bilinmeyenlerin bileşenleri altı tanedir ve bu yüzden deneylerde en az altı adet sensör kullanılır.

Çatlak türlerinin sınıflandırılmasında, moment tansöründen 7, 8 ve 9 no'lu denklemlerden elde edilen öz değerler kullanılır. Bu öz değerler Denklem 10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. AE kaynak yerinin belirlenmesi (Ohno and Ohtsu, 2010)

Maksimum öz değer: $e_1 = \mu \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} + 1 \right) \Delta V$

Orta öz değer: $e_2 = 2\mu\nu \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} \right) \Delta V \quad (10)$

Minimum öz değer: $e_3 = \mu \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} - 1 \right) \Delta V$

Genel durumda moment tansörünün öz değerleri kesme ve çekme çatlağının birleşimi olduğu varsayılır. Moment tansörünün öz değerlerinin birleştirilmiş analizi Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Çatlağın sınıflandırılabilmesi için Denklem 10 X, Y, Z cinsinden yazılır (Denklem 11).

$$1 = X + Y + Z$$

$$\frac{e_2}{e_1} = 0 - \frac{Y}{2} + Z$$

$$\frac{e_3}{e_1} = -X - \frac{Y}{2} + Z \quad (11)$$

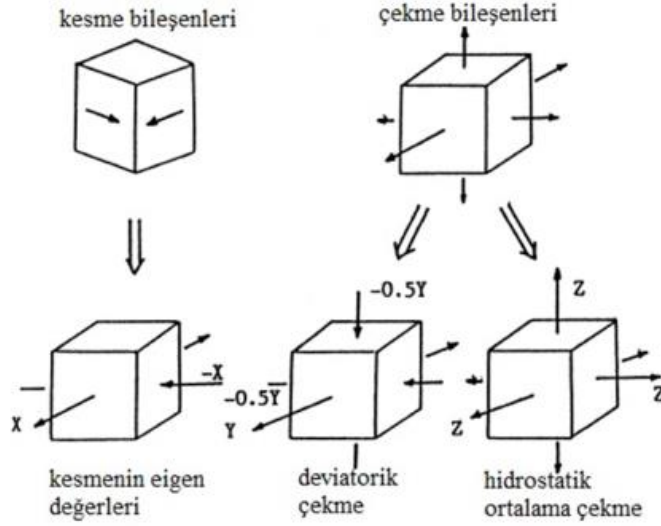
Bu denklemlerin çözülmesi sonucunda;

-Eğer $X < \%40$ ise çekme çatlağı,

- $X > \%60$ ise kesme çatlağı,

-%40 < X < %60 ise karışık mod çatlağı olduğu söylenebilir (Ohno and Ohtsu, 2010).

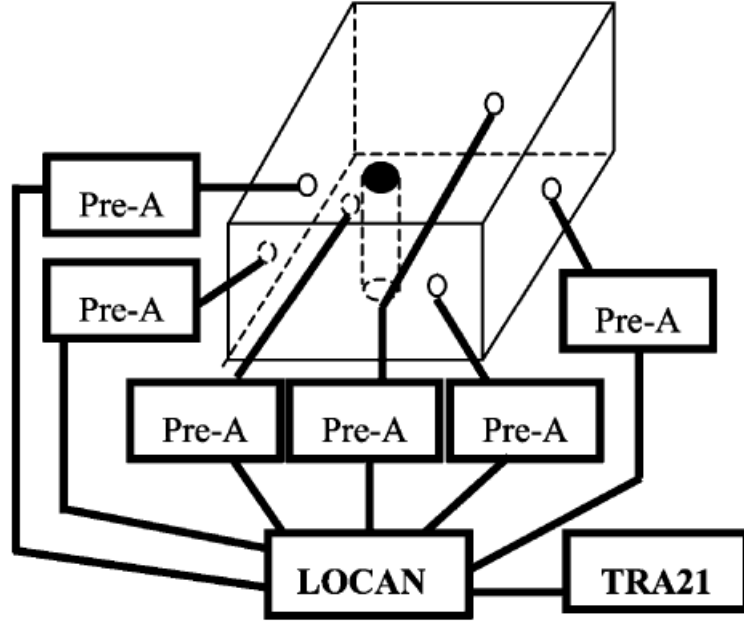
Bu çalışmada asıl kullanılan denklem 5 nolu denklemdir. AE sensörlerinden elde edilen sinyalde ilk hareketin genliği olan A(x), denklemde yerine yazılarak denklem her çatlak için çözülmüştür. Kaynak lokasyon tayini ise, sinyaldeki P1 parametresi kullanılarak, temel (hız = yol/zaman) bağıntısı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2.10. Moment tansörünün öz değerlerinin birleştirilmiş analizi (Ohtsu, 2009)

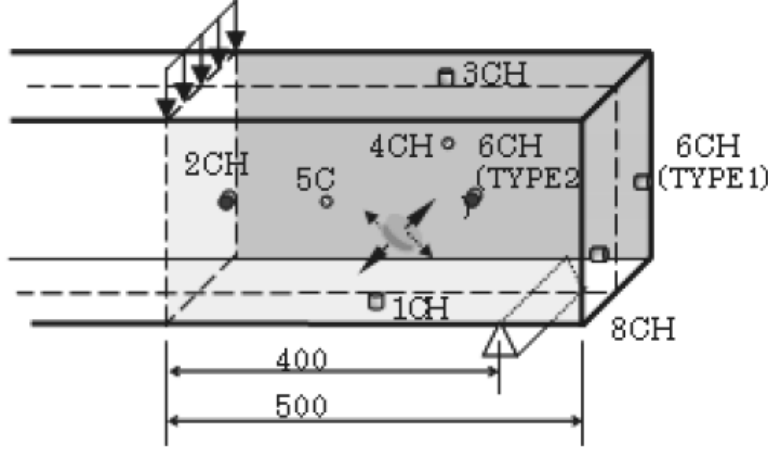
Ohtsu (1999), betonda karışık mod çatlaklarını AE yönteminden ve sınırlı elemanlar yönteminden yararlanarak incelemiştir. Bunun için betonarme kiriş eleman kullanılmıştır. Bu elemanın yük dayanımı AE yöntemi ile bulunmuş ve yük deformasyon eğrileri çizdirilmiştir. Sonuç olarak AE-SiGMA metodu ile çatlakların ilerlemesi ve çatlak türlerinin tespit edilebileceği ve kırılma bölgesi için gerilme yığılımı faktörlerinin elde edilebileceğini göstermiştir. Sınırlı Elemanlar yöntemiyle elde edilen çatlak hareketleri, Akustik Emisyon yöntemiyle elde edilen sonuçlarla aynı çıkmıştır. Böylece AE-SiGMA metodunun kırılma çatlaklarının türünü, yayılımını belirlemede ve gerilme yığılımı faktörlerini belirlemede etkin bir yöntem olarak kullanılacağı tespit edilmiştir.

Uddin (2004), AE-SiGMA metodu ve sınırlı elemanlar metodu ile beton içerisindeki korozyona bağlı çatlak durumunu incelemiştir. Bu deney için 25*25*10 cm boyutlarında beton eleman kullanılmıştır. Donatı korozyonundan kaynaklanan çatlakların uzun sürede ortaya çıkmasından dolayı, korozyon çatlağına benzetmek için betonarme kirişlerin yüzeylerine 3 cm çapında bir oyuk açarak bu oyuk dolomit harcıyla doldurmuştur. Açılan bu oyuk ve sensör yerleşimi Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Kritik gerilme yığılımı faktörleri hesaplanmış, mevcut gerilme yığılımı faktörleri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen gerilme yığılımları faktörleri yardımıyla, çekme ve kesme çatlaklarının yoğunlukta olduğu, karışık mod çatlakların çok az olduğu görülmüştür. Sınırlı elemanlar yöntemi ile AE-SiGMA yönteminden elde edilen sonuçların büyük ölçüde tutarlılık gösterdiği görülmüştür.



Şekil 2.11. Uddin (2004)'in çalışmasındaki beton eleman yüzeyindeki oyuk ve sensör yerleşimi

Ohtsu et al. (2007), çalışmasında, AE-SiGMA metodu ile SIBIE (Imaging of Spectral Amplitudes based on Impact-Echo) metodunu beton elemanlardaki çatlak yayılımı konusunda karşılaştırmışlardır. SiGMA analizi için 150x250x2000 mm boyutlarındaki kirişe 8 adet sensör yerleştirilmiştir. Sensör yerleşimi Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Moment tansörü bileşenlerinin yardımıyla, çatlaklar üç aşamada incelenmiştir. İlk aşamada çatlak gelişimi gözlenmemiştir, ikinci aşamada çatlaklar oluşmaya ve diyagonalleşmeye başlamıştır. Son aşamada ise çatlak yığılmaları kesme çatlağına dönüşmüş ve numunede kesme kırılması oluşmuştur.

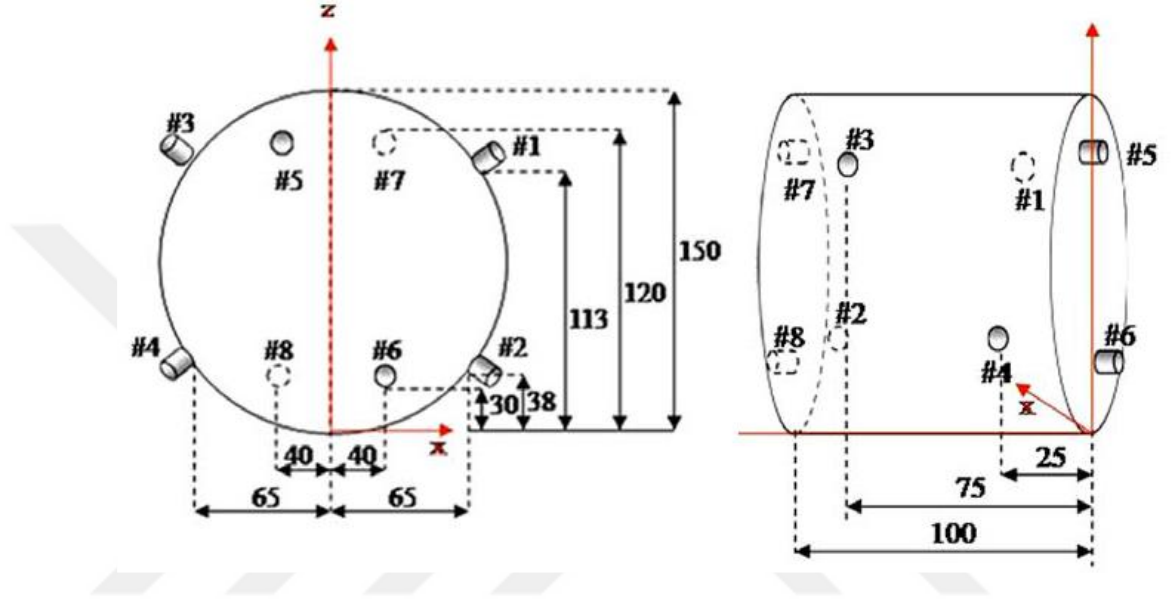


Şekil 2.12. Ohtsu et al. (2007)'nin çalışmasında kiriş üzerine sensör yerleşimi

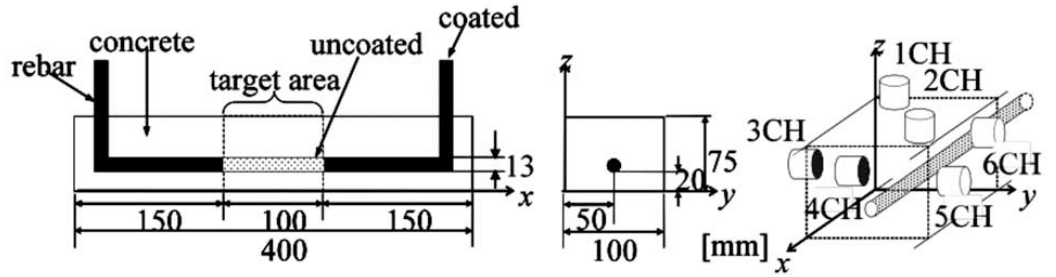
Ohno and Ohtsu (2010), çalışmasında, AE-SiGMA analizi ve parametre analizini kullanarak beton ve betonarme elemanlardaki çatlak türlerinin belirlenmesini hedeflemiştir. Bu amaçla 3 deney elemanına üç tip test yapılmıştır. Bunlar; beton elemana uygulanan dört noktada eğilme testi, betonarme elemana uygulanan dört noktada eğilme testi ve betona uygulanan hidrostatik genişleme testidir. AE-SiGMA testi sonuçlarına göre dört noktada eğilme testi ile çekme çatlaklarının daha çok görüldüğü, hidrostatik genişleme testi ile kesme çatlaklarının daha çok görüldüğü gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, SiGMA analizi ile elde edilen çekme çatlak ve kesme çatlak oranları parametre analizi ile elde edilen sonuçlardan farklı çıkmıştır. Kesitlerin çatlak yayılımına karşılık gelen gerilme değerleri gösterilmiştir. Böylece kesitte oluşabilecek hasara karşılık gelen gerilme değerinin önceden tahmin edilmesine olanak sağlanmıştır. Bu da çatlaklarda meydana gelen yoğunlaşmaların önceden tahmin edilmesini ve ona göre önlem alınmasını sağlamaktadır.

Ohtsu and Kawasaki (2010), deneysel çalışmasında, ilk aşamada betonda çekme dayanımını belirlemeye yarayan Brazilian Testi'ni de kullanarak, makro ölçekteki çatlak ilerlemesini belirlemek için AE-SiGMA yöntemine başvurmuşlardır. Deneylerde 150 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde üç silindir eleman kullanılmıştır. Bu silindir elemanlara sekizer adet sensör yerleştirilmiştir. Silindir elemanlara yerleştirilen sensör yerleri Şekil 2.13'de gösterilmiştir. Elemanların çatlak durumları incelenmiş ve deney sonucunda çatlak ilerlemesinin yüklemeye yönünde meydana geldiği görülmüştür. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, hazırlanan betonarme deney elemanları korozyona maruz bırakılmıştır ve korozyon nedeniyle oluşan çatlaklar AE-SiGMA yöntemiyle

incelenmiştir. Çalışma kapsamında, 100x75x400 mm boyutlarında deney elemanları üretilmiştir. Bu deney elemanlarına 6 adet sensör yerleştirilmiştir. Sensör yerleşim detayı Şekil 2.14’de gösterilmiştir. İkinci çalışma, iki kısımda gerçekleşmiştir. Birinci kısım 28 gün, ikinci kısım ise 29. günden 70. güne kadar olan süreci kapsamaktadır. İlk kısımda korozyona bağlı fazla çatlak görülmemiştir. İkinci kısımda ise korozyona bağlı çekme ve karışık mod çatlakları oluşmuştur. Kesme çatlakları ise mikro boyutta oluşmuştur.



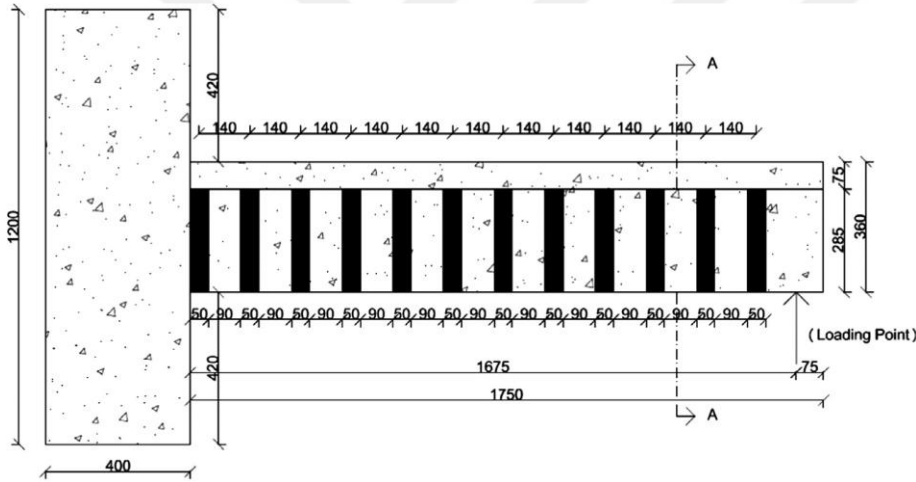
Şekil 2.13. Ohtsu and Kawasaki (2010)'nin deneysel çalışmasında silindir elemanlara sensör yerleşimi

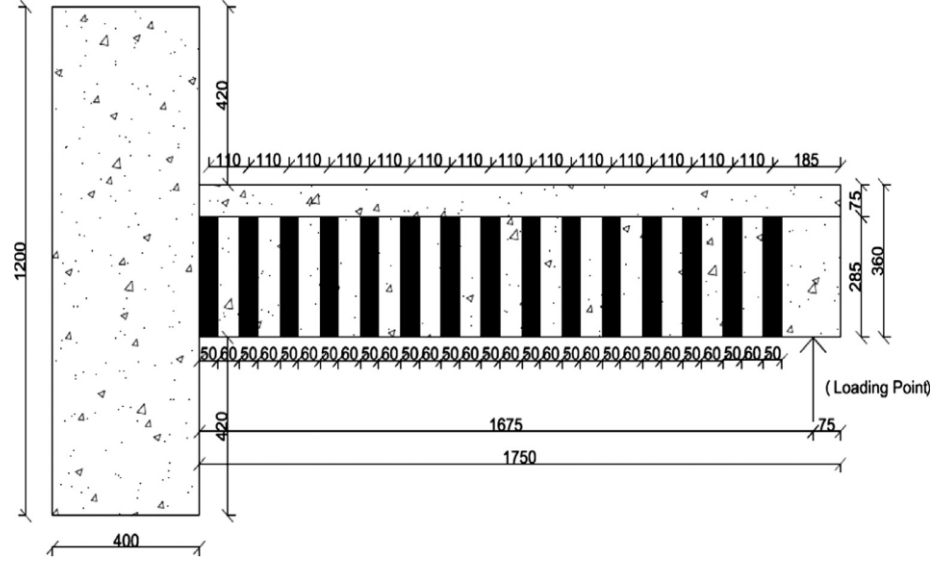


Şekil 2.14. Ohtsu and Kawasaki (2010)'nin deneysel çalışmasında betonarme eleman ve sensör yerleşimi

Alver vd. (2014) çalışmalarında, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kiriş elemanlar kullanmışlardır. Böylece elemanın kesme dayanımının artırılması amaçlanmıştır. Çalışmada çatlak türünü, yönünü ve konumunu belirleyebilmek için AE-SiGMA yöntemi kullanılmıştır. Kırılma mekanizmasını belirlemek için

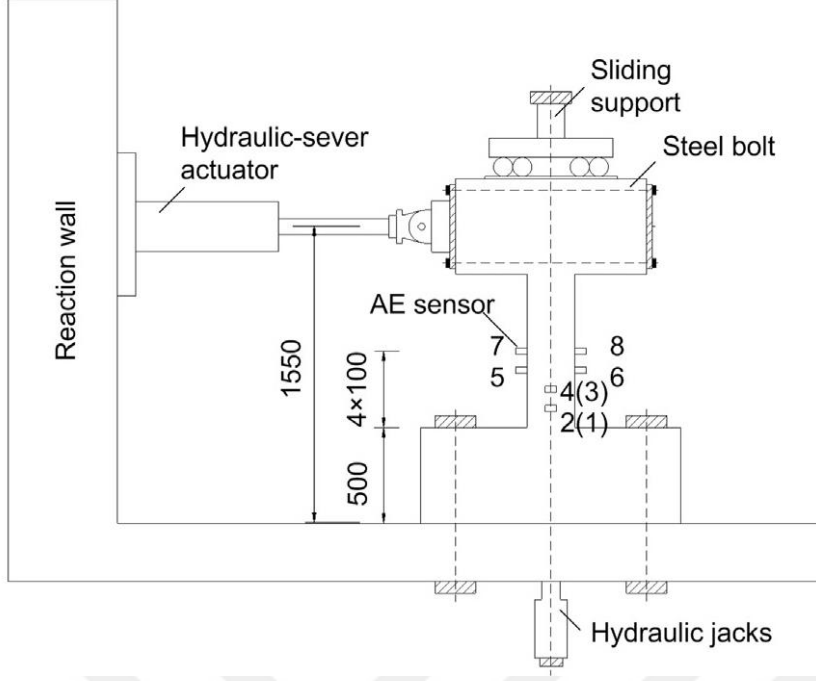
çatlak türü ve yönü bilinmelidir. Deneysel çalışmada, bir adet kontrol numunesi ve iki adet güçlendirilmiş numune olmak üzere üç adet T-kesitli kiriş numunesi hazırlanmış ve tersinir tekrarlı yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Güçlendirilmiş numunelerin güçlendirme yöntemleri Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Çalışmada sekiz adet sensör kullanılmış ve AE SiGMA yöntemi ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak, belirli aralıklarda CFRP şeritlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çekme ve kesme çatlak oranları değişmiştir. Kesme çatlaklarının sayısı çekme çatlaklarından fazla ise kesme kırılması meydana gelmektedir. Üç numaralı numunede çekme çatlaklarının sayısı kesme çatlaklarından fazla çıkmıştır. Tüm numunelerde gözlemlenen toplam AE aktivitesi farklılık göstermiştir. Bunun bir nedeni, numunelerin üretimi sırasında malzeme özelliklerinin muhtemel farklılığı, diğer nedeni ise sensörlerin altında kalan çatlakların boyutundan kaynaklı sinyallerin iyi alınmamasıdır. Ayrıca, güçlendirilmiş numunelerin başlangıç sertliği referans numuneye göre daha fazla çıkmıştır.





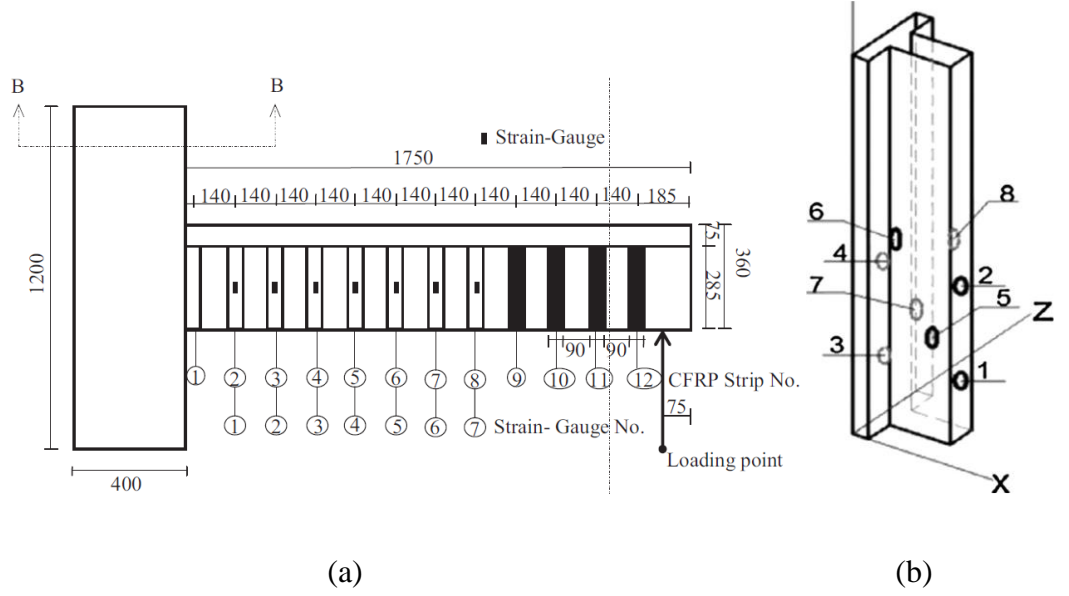
Şekil 2.15. Alver vd. (2014) çalışmasındaki güçlendirme şekilleri

Yue (2015) çalışmasında, Akustik Emisyon (AE) yönteminin, deprem tipi yüklemelere maruz kalan betonarme elemanlarda ne kadar etkili olduğunu belirtmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, 25*25*105 cm boyutlarında betonarme bir kolon, sabit bir eksenel yük altında hasar görene kadar kuvvetli bir çevrimsel yanal yer değiştirmeye tabii tutulmuş ve mekanik davranışı AE tekniği ile izlenmiştir. Kolon yüzeyine 8 adet AE sensörü yerleştirilmiştir. Deneysel düzeneği ve sensör konumları Şekil 2.16’da gösterilmiştir. Kolon hasarı ile AE enerjisi arasında belirgin bir oran olduğu gösterilmiştir. AE enerjisine bağlı olarak hasar seviyesini belirleyebilmek için ampirik bir formül önerilmiştir. Bu önerilen ampirik formül ile hasar seviyesi belirlenebilmiştir.



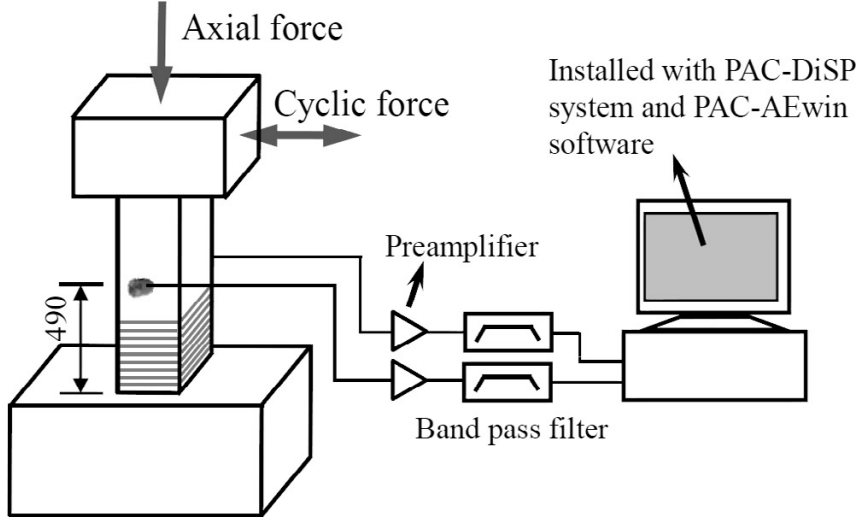
Şekil 2.16. Yue (2015)'nin çalışmasındaki deney düzeneği ve sensör yerleşimi

Selman vd. (2015) çalışmalarında, FRP ile güçlendirilmiş betonarme yapıların hasar durumunu tespit etmek için, hem mekanik hem de akustik enerji verilerini birleştiren bir fonksiyon önermişlerdir. Bu fonksiyon Sentry olarak adlandırılmıştır. Bu fonksiyon, gerilme enerjisinin ve akustik enerjinin logaritmik oranı cinsinden ifade edilir. Çalışmada, bir konsol T kiriş, rijit bir betonarme bloğa tutturulmuş ve çevrimsel yük uygulanmıştır. Deney kapsamında 8 adet AE sensörü T kiriş yüzeyine yerleştirilmiştir. T kirişin güçlendirme yöntemi ve sensör yerleşim detayı Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Çalışmada, Sentry fonksiyonunun görünmez hasarları tespit etmedeki verimliliğinin tespiti amaç edinilmiştir. Sonuç olarak, Sentry fonksiyonunun, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme bir elemanın kırılma mekanizmalarını araştırmak için etkili bir araç olduğu kanıtlanmıştır.



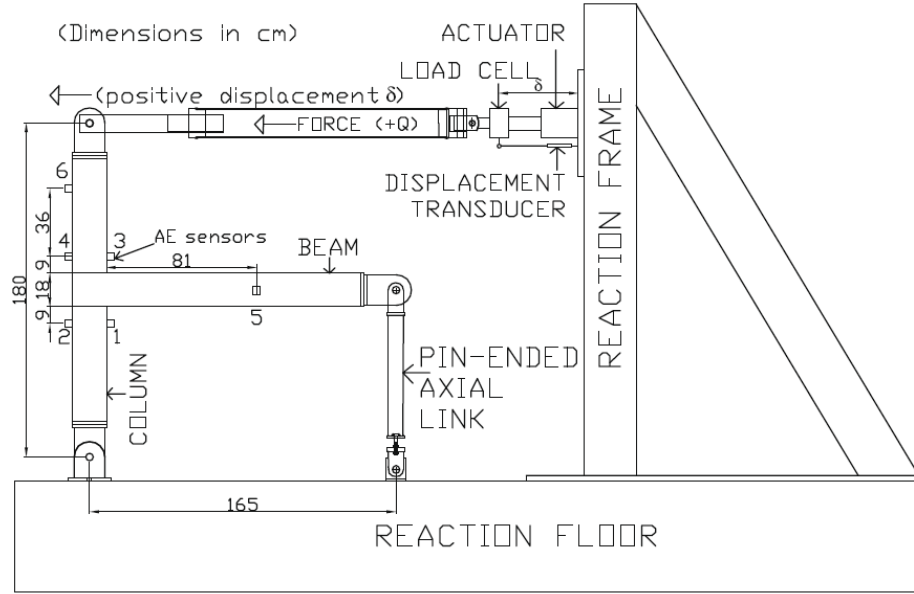
Şekil 2.17.Selman vd. (2015) çalışmasında (a)güçlendirme şekli (b) sensör yerleşimi

Ma and Li (2017) çalışmalarında, öncelikle fiber takviyeli polimer (FRP)'lerin önemi hakkında bilgiler vermişlerdir. Deneysel çalışmada ise yanal çevrimsel yük altındaki FRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonun çatlak süreci ve hasar seviyesi akustik emisyon (AE) tekniği ile araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, bir adet kontrol numunesi ve bir adet bazalt fiber takviyeli polimer ile güçlendirilmiş numune olmak üzere, 30x30 enkesitli iki numune üretilmiştir. Deney kapsamında iki adet AE sensörü kullanılmıştır. Deney düzeneği ve AE sensörleri yerleşimi Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Deney sırasında meydana gelen çatlaklar, AE hit analizi ve b-değeri analizi ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak; AE hit analizi, FRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş betonarme kolonlar için çatlak özelliklerini belirlemede etkili olmuştur. b-değeri analizi ise, FRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonunun çatlak büyüklüğünü ortaya çıkarmak için uygun bir yöntemdir. FRP ile güçlendirilmiş kolonda AE enerjisi, histeretik enerji ile iyi bir korelasyon göstermiştir.



Şekil 2.18.Ma and Li (2017)'nin çalışmasındaki deney düzeneği ve sensör yerleşimi

Benavent et al. (2010), çalışmalarında, AE yönteminin betonarme kolon, kiriş gibi yapılarda hasar tespitini belirlemek için yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, sismik bölgede olan prototip bir yapının alt ve üst kısımlarından iki adet 3/5 ölçekli kiriş-kolon birleşimi, göçmeye kadar yüklenerek test edilmiştir. İki deney elemanı arasında boyut ve donatı farklılıkları bulunmaktadır. Deney elemanlarına 6 adet sensör yerleştirilmiştir. Deney düzeneği ve sensör yerleşimi Şekil 2.19'da gösterilmiştir. AE aktivitelerindeki artış donatılar plastik deformasyona uğramaya başladığı sırada meydana gelmiştir. AE sensörleri tarafından kaydedilen sinyaller ile hasar tespiti için bir formül oluşturulmuştur. Sonuç olarak, akustik emisyonun, düşük devirli yorulma hasarına maruz kalan geniş betonarme kiriş-kolon bağlantılarının hasarının değerlendirilmesinde çok etkili olduğu görülmüştür. Özellikle, 1'den küçük olan I_b değerlerinin, yükleme sırasında makroskopik çatlakların görünümü ve gelişimi ile iyi bir bağlantı oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca, beton tarafından dağılan birikmiş plastik şekil değiştirme enerjisi ile birikmiş AE enerjisi arasında da iyi bir bağlantı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.19. Benavent et al. (2010) çalışmasındaki deney düzeneği ve sensör yerleşimi



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deney Elemanları

Tez çalışmasında test edilen deney elemanları betonarme çerçeve bir binada dış kolon ve kiriş birleşim yerlerini temsil edecek şekilde seçilmiştir. Kirişin kolona bağlantısının tam olması için kolon ve kiriş genişlikleri aynı alınmıştır. Deneyler için 1/1 ölçekli 10 adet betonarme konsol kolon-kiriş birleşim noktalı deney elemanı üretilmiştir. Deney elemanlarının geometrik boyutları aynıdır, fakat donatı düzenlemeleri farklıdır. 10 adet deney elemanı için toplamda 3 çeşit donatı düzeni vardır:

1.Kolon ve kiriş 10 cm etriye ile sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktası ise iki yönde de etriyelerle sıklaştırılmıştır. Referans numunesi olarak kullanılacaktır.

2.Kolon ve kiriş 30 cm etriye ile sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasında hiç etriye yoktur. Referans ve güçlendirilmiş numuneler olarak kullanılacaktır.

3.Kolon ve kiriş 10 cm etriye ile sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasında etriye konulmamıştır. Günümüzde ve geçmişte yapılan binaların çoğunda gözlenen durumdur ve referans numunesi olarak kullanılacaktır.

Deney elemanlarından 3 tanesi referans numunesi olarak, 7 tanesi ise farklı CFRP, çelik ceket ve çapraz demir yerleştirmesi güçlendirmeleri için kullanılacaktır. Deney elemanları ve güçlendirme detayları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1.Deney Elemanları ve Güçlendirme Özellikleri

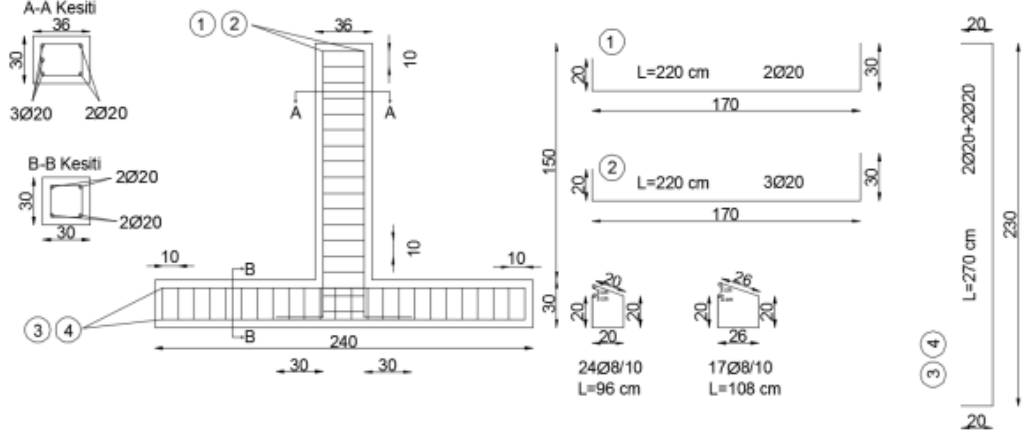
Numune No	Güçlendirme Tipi	Beton Dayanımı (Mpa)	Güçlendirme Bölgesi	gf* (mm)	CFRP Düzenlemesi	Ankraj Tipi
1	Referans-1	25.0	-	-	-	-
2	Referans-2	25.0	-	-	-	-
3	Referans-3	25.0	-	-	-	-
4	CFRP	25.0	Düğüm Noktası	150	Çapraz sargı+kolonda sargının devamı	-
5	CFRP	25.0	Düğüm Noktası	150	Çapraz sargı	-
6	Ankraj	25.0	Düğüm Noktası	-	-	2 U (Ø12)
7	Ankraj	25.0	Düğüm Noktası	-	-	6 (Ø12)
8	CFRP	25.0	Kiriş & Kolon & Düğüm Noktası	-	Tamamen	-
9	CFRP	25.0	Kiriş & Kolon	-	Tamamen	-
10	Çelik Ceket	25.0	Düğüm Noktası	-	-	-

gf* : CFRP şeritlerin genişliği

Deney programında yer alan deney elemanlarına ilişkin detaylar aşağıda verilmiştir.

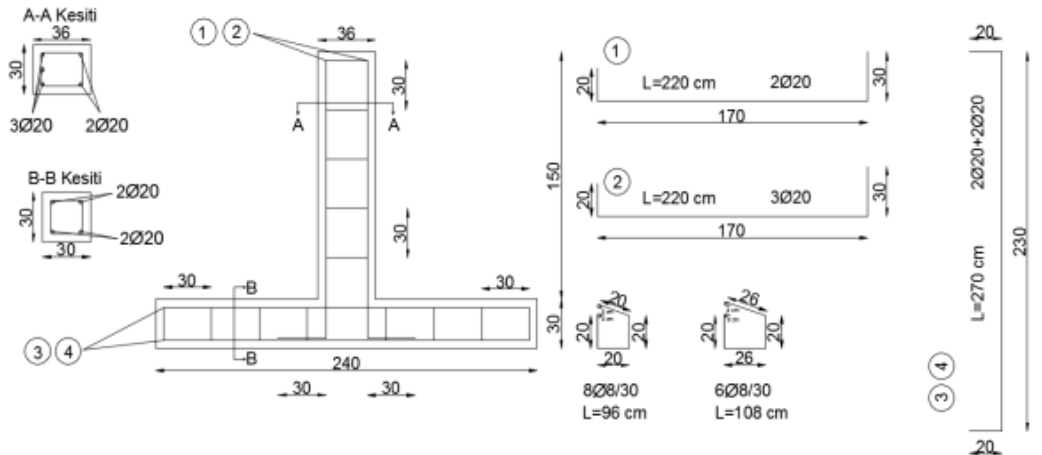
Referans-1; hedeflenen dayanım ve güçlendirilen deney elemanları ile karşılaştırmak için üretilmiş elemandır. Kolon ve kiriş 10 cm etriye ile sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktası ise iki yönde de etriyelerle sıklaştırılmıştır. Bu numune referans numunesi olarak kullanılacaktır. Bu eleman şartnamelere uygun olarak tasarlanmıştır ve elde edilecek sonuçlar

hem düğüm noktasında etriye sıklaştırması yapılmayan Referans-3'den elde edilecek sonuçlar ve hem de güçlendirilmiş elemanlardan elde edilecek sonuçlar ile kıyaslanacaktır. Düğüm noktasına yerleştirilen donatılar üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Elemana ait geometri, donatı düzenlemeleri ve kesit detayı Şekil 3.1' de verilmiştir.



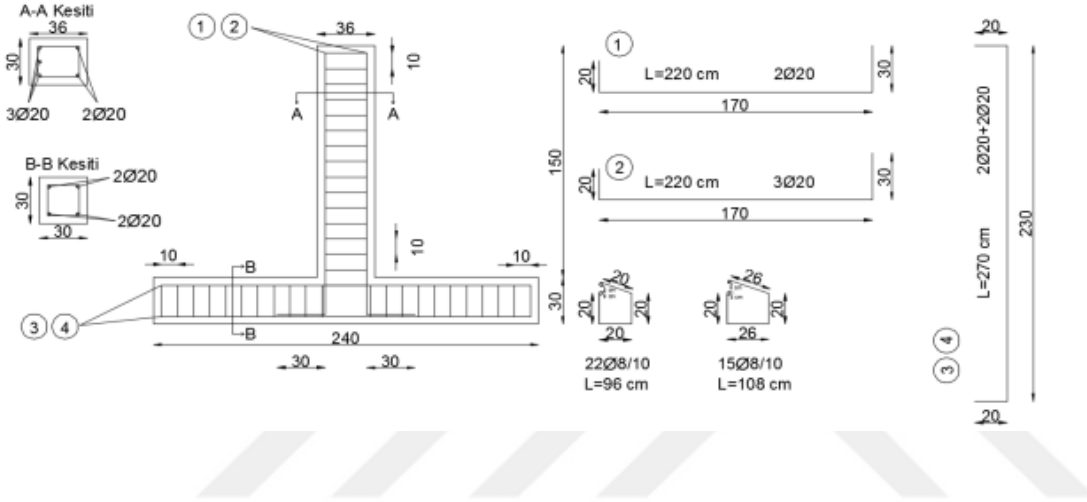
Şekil 3.1.Referans-1 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları

Referans-2'de kolon ve kiriş 30 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasında ise etriye yerleştirilmemiştir. Bu numune referans numunesi olarak kullanılacaktır. Bu numunede düğüm noktası ile birlikte kiriş ve kolonda da etriye sıklaştırması yapılmamıştır. Özellikle, Referans-3 ile AE sonuçlarını kıyaslamak açısından bu numunenin de test edilmesi planlanmıştır. Elemana ait geometri, donatı düzenlemeleri ve kesit detayı Şekil 3.2' de verilmiştir.



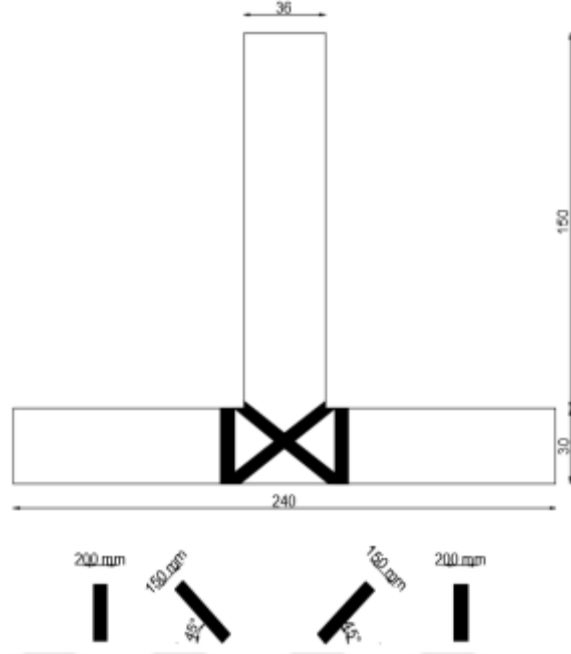
Şekil 3.2.Referans-2 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları

Referans-3’de kolon ve kiriş 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasında ise etriye yerleştirilmemiştir. Özellikle eski betonarme yapılarda sıklıkla karşılaşılan açık aralıklı etriyenin etkileri için önemli bir numunedir. Elemana ait geometri, donatı düzenlemeleri ve kesit detayı Şekil 3.3' de verilmiştir.



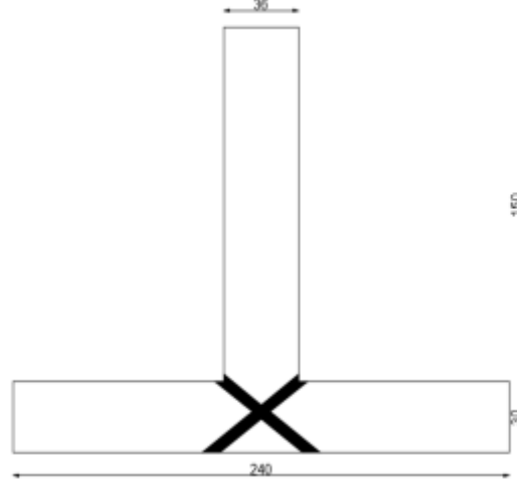
Şekil 3.3.Referans-3 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları

Deney Elemanı-4, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune, düğüm noktasında 45°lik açıyla çapraz olarak yerleştirilmiş 150 mm genişliğinde ve iki tarafta da kolonda sargıya devam eden 200 mm genişliğinde düz CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir (Şekil 3.4). Düğüm noktasındaki çapraz sargının yanı sıra kolonda devam eden sargının davranışa etkisi incelenecektir.



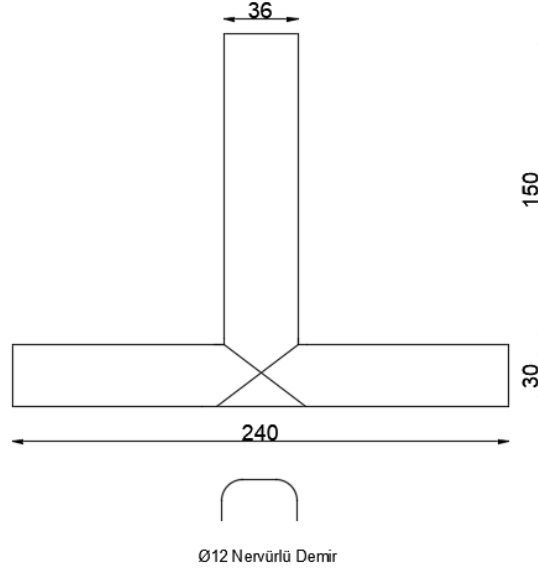
Şekil 3.4. Deney Elemanı-4'e ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-5, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune düğüm noktasında 45 °'lik açıyla çapraz olarak iki kat sarılmış 150 mm genişliğinde CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir (Şekil 3.5). Bir önceki numuneyle davranış farklılığını inceleyebilmek ve özellikle AE sonuçlarını kıyaslayabilmek için numune bu şekilde güçlendirilmiştir. Her iki elemanda da CFRP şeritler üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir.



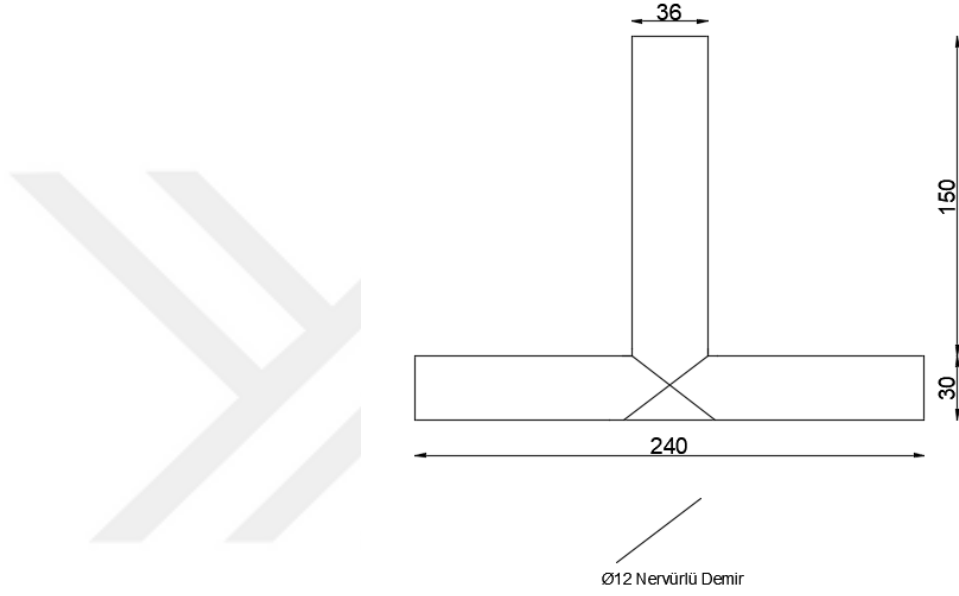
Şekil 3.5.Deney Elemanı-5'e ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-6, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune 2 adet $\text{Ø}12$ 'lik çapraz yerleştirilen U şeklindeki çelik ankrajlarla donatılandırılmıştır (Şekil 3.6). Güçlendirme elemanları üzerine de birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve AE ile elde edilen sonuçlarla birleştirilerek göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır.



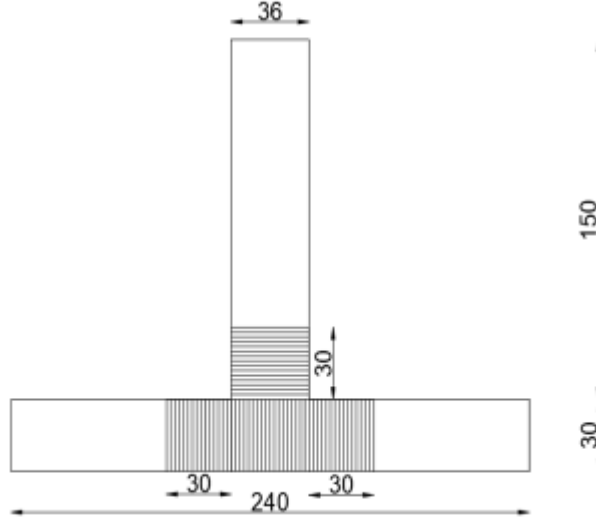
Şekil 3.6.Deney Elemanı-6'ya ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-7, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune 6 adet $\text{Ø}12$ 'lik düz çelik çubuk ankrajlarla donatılmıştır (Şekil 3.7). Yine güçlendirme elemanları üzerine de birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve AE ile elde edilen sonuçlarla birleştirilerek göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır.



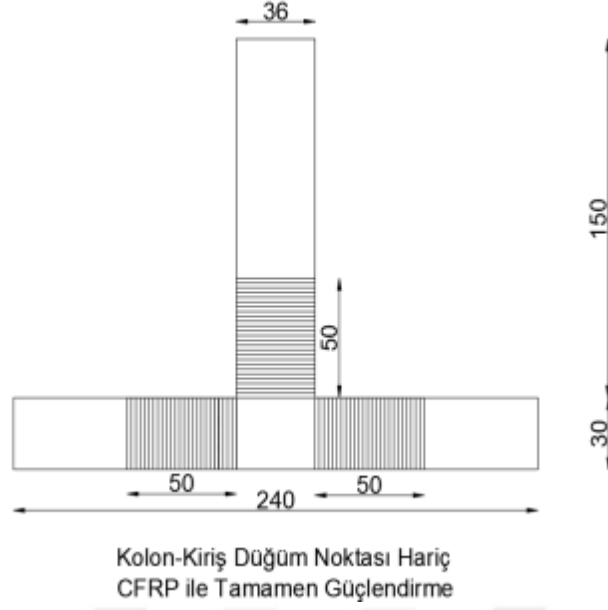
Şekil 3.7. Deney Elemanı-7'ye ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-8, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Lifler boyuna doğrultulara dik olacak şekilde kiriş ve kolonun birleşim bölgesinden itibaren 30 cm'lik kısmı düğüm noktası ile birlikte kesmeye karşı CFRP ile güçlendirilmiştir (Şekil 3.8). Kritik bölgesi tamamen güçlendirilen bu eleman için özellikle AE ve AE-SiGMA yöntemleri önemlidir. Düğüm noktasında ve kolon ve kirişteki kritik bölgede dışarıdan hiçbir çatlak gözle görülemeyeceği için ilk çatlakların nereden başladığı, hangi bölgelerde hasarlar oluştuğu belirlenecektir. CFRP şeritler üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve AE ile elde edilen sonuçlarla birleştirilerek göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır.



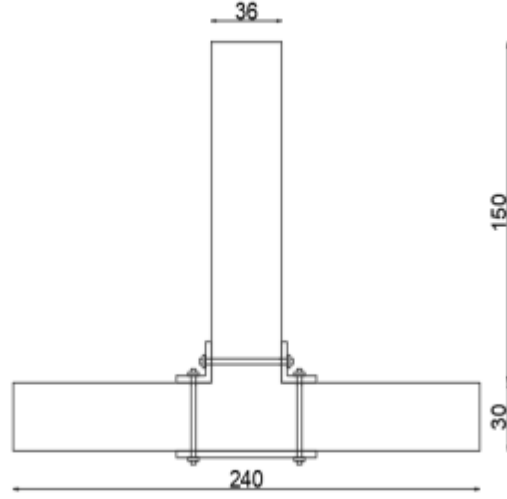
Şekil 3.8.Deney Elemanı-8'e ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-9, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Lifler boyuna doğrultulara dik olacak şekilde düğüm noktası hariç kiriş ve kolonun kritik olan kısmının tamamı kesmeye karşı CFRP ile güçlendirilmiştir (Şekil 3.9). Düğüm noktası dışında güçlendirilen bu elemanda davranışın nasıl geliştiği araştırılacaktır. CFRP şeritler üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve AE ile elde edilen sonuçlarla birleştirilerek göçmeye neden olan faktörlerin belirlenmesine çalışılmıştır.



Şekil 3.9. Deney Elemanı-9'a ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-10, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune düğüm noktasında 10 mm kalınlığında çelik ceket ile güçlendirilmiştir (Şekil 3.10). Güçlendirme elemanları üzerine de birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve AE ile elde edilen sonuçlarla birleştirilerek göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır.



Şekil 3.10.Deney Elemanı-10'a ait güçlendirme detayı

3.2 Malzemeler

Deney elemanlarının üretilmesinde donatı, beton, CFRP ve çelik levha, profil malzemeleri kullanılmıştır. Donatı ve beton malzemelerinin karakteristik özellikleri numuneler üzerinde gerçekleştirilen testlerle belirlenmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde aynı özellikte beton ve bir seferde ve aynı üretimden temin edilen inşaat demiri kullanılmıştır. Deney elemanlarının kesmeye karşı güçlendirilmesinde MasterBrace SAT 4500 (Epoksi) kullanılmıştır.

3.2.1 Donatı

Deney elemanlarında kullanılan nervürlü çelik donatılar bir seferde ve aynı üretimden alınmıştır. Donatıların özelliklerinin belirlenmesi için her çaptaki donatıdan üçer adet numune alınarak çekme deneyleri yapılmıştır. Donatı özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2.Kullanılan donatıların özellikleri

GENEL			MEKANİK TEST			KİMYASAL BİLEŞİM (%)				
Çap (mm)	Kesit Alanı (mm ²)	Kalite	Akma Muk. (N/mm ²)	Çekme Muk. (N/mm ²)	Çekme Akma	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
8	50,3	S420	460	563	1,22	0,210	0,150	0,630	0,011	0,021
10	78,6	S420	464	563	1,21	0,190	0,160	0,600	0,011	0,024
20	314,3	S420	487	633	1,30	0,290	0,140	0,620	0,017	0,020

3.2.2 Beton

Deney elemanlarının betonları şantiyede proje yürütücüsü ve bursiyerleri gözetiminde hazırlanarak dökülmüştür. Beton karışımında 11,2-22 mm, 4-16 mm ve 0-3 mm dane çaplarında üç grup agrega kullanılmıştır. Kullanılan agrega için elek analizi yapılmıştır. C 25/30 MPa beton basınç dayanımı elde etmek amacıyla 1 m³ beton karışımında 0-3 mm dane çapındaki malzemeden %50 oranında, 4-16 mm dane çapındaki malzemeden %23,4 oranında ve 16-32 mm dane çapındaki malzemeden %26,4 bulunması gerektiği hesaplanmıştır. 1 m³ beton üretiminde 255 kg çimento kullanılmıştır. Deney elemanlarında çimento olarak Çimentoş CEM I42.5 R kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.66'dır. 1 m³ betonun hazırlanması için karışım oranları Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3.Deney elemanlarında kullanılan beton karışım oranı

Malzemeler	Ağırlık (kg)	Ağırlıkça Oranı (%)
Çimento	255	11,2
No 2 Agrega (11,2-22) (dya)	485	21,4
No 1 Agrega (4-16) (dya)	429	18,9
No 0 Agrega (0-3) (dya)	934	41,1
Su	167	7,4
Katkı	4,24	-
Yatağan (uçucu kül)	84	-
Toplam	2358,24	100

3.2.3 CFRP

Çalışmada deney elemanlarının kesme dayanımlarını arttırmak için tek yönlü, yüksek dayanımlı, karbon lifli polimer (FRP) kumaş polimer malzemesi (MasterBrace FIB 300/50 CFS) kullanılmıştır. MasterBrace FIB 300/50 CFS malzemesinin üretici firma tarafından belirtilen teknik özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan CFRP malzemenin mekanik özellikleri

MasterBrace FIB 300/50 CFS Karbon Lifli Dokuma Malzemesi	
Toplam Lif Ağırlığı (gr/m ²)	300 gr/m ²
Malzemenin Yapısı	Karbon
Elastisite Modülü (N/mm ²)	230.000 N/mm ²
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	4900 N/mm ²
Tasarım Kesim Kalınlığı (mm)	0.166 mm
Kopmada Uzama(%)	%2,10
Genişlik (mm)	500 mm

3.2.4 Epoksi

CFRP şeritlerin deney elemanlarına yapıştırılmasında MasterBrace SAT 4500 (Epoksi) (Şekil 3.11) yapıştırıcı kullanılmıştır. MasterBrace SAT 4500, MasterBrace FIB sistemi için özel olarak geliştirilmiş, iki bileşenli, solventsiz, yüksek dayanımlı, epoksi esaslı özel yapıştırıcıdır. Güçlendirilecek elemanlarda, karbon/cam fiber (lifli polimer) malzemenin yüzeye yapıştırılması amacıyla kullanılır. Epoksi malzemesinin teknik özellikleri Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.11.MasterBrace SAT 4500 (Epoksi)

Tablo 3.5.Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan epoksi malzemesinin teknik özellikleri

Malzemenin Yapısı MasterBrace SAT 4500 Bileşen A MasterBrace SAT 4500 Bileşen B	Epoksi Reçine Epoksi Sertleştirici
Renk	Mavi
Karışım Yoğunluğu	1,02 kg/litre
Viskozite	1500-2500 mPa.s
Basınç Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	>60 N/mm ²
Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	>50 N/mm ²
Yapışma Dayanımı (Betona) (7 gün)	>3,0 N/mm ²
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	+5° C + 30° C
Kullanma Süresi (+20° C)	30 dakika
Yeniden Kaplanabilme Süresi (+20° C)	Min. 48 saat- Max. 7 Gün
Tam Kurlenme Süresi (+20° C)	7 Gün

Tablo 3.6.Epoksi karışım oranları

MasterBrace SAT 4500	Bileşen A	Bileşen B
Karışım Miktarı	3,73 kg	1,27 kg
Karışım Yoğunluğu	1,02 kg/litre	

3.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanları uygun koşullarda üretilmiş ve kür uygulandıktan sonra Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı'na nakliye edilmiştir. Deney elemanlarının üretimi, donatı kafesinin ve kalıbının hazırlanması, beton dökümü ve güçlendirme aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalardan sonra deney elemanları teste hazır hale gelmektedir.

Deney elemanlarının beton dökümünde ahşap kalıplar kullanılmıştır. Kiriş ve kolon kalıpları ayrı ayrı kesilip hazırlandıktan sonra birleştirilmiştir.

Deney elemanlarının donatıları yine aynı yerde hazırlanmıştır. Önce kiriş ve kolon boyuna donatıları ve etriyeleri bükülerek hazırlanmıştır. Hazırlanan donatılar bağ telleri ile birbirlerine bağlanarak kiriş ve kolon donatı kafesi oluşturulmuştur. Daha sonra kiriş ve kolon donatıları da bağ telleri ile bağlanarak deney elemanının donatı kafesleri hazırlanmıştır.

Donatı kalıba yerleştirilmeden önce kalıp yağlanmıştır. Donatıların kalıp ile temasını önlemek için pas payı bırakılmıştır. Donatı kalıba yerleştirilirken, donatının yağlanmış yüzeylere temas etmemesine özen gösterilmiştir.

Hazırlanan beton, vibratör yardımıyla yerleştirilmiştir. Deney elemanları ve küp numuneler aynı şartlarda 28 gün kür ortamında tutulmuştur. Deney elemanlarının hazırlanışına ait fotoğraflar şekil 3.12 ve 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Donatı ve kalıpların hazırlanması



Şekil 3.13.Beton dökümü

3.4 Deney Düzenegi

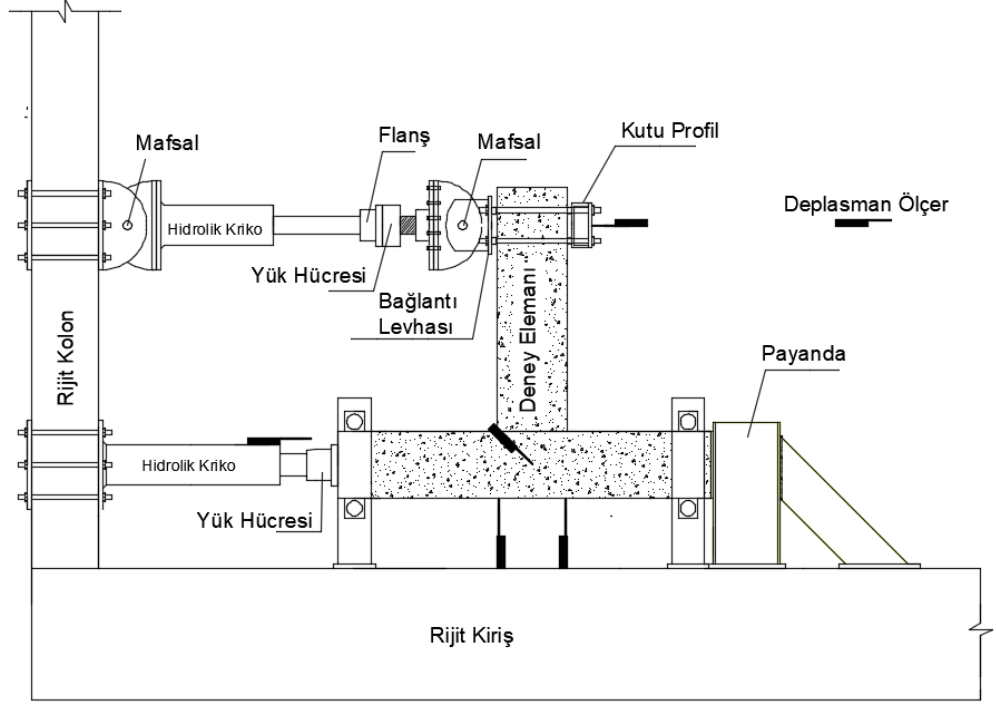
Laboratuvarda deney süresince kullanılan yükleme çerçevesi, S235JR (St37) kalitesindeki çelikten imal yapma kutu profillerden oluşan ve ayrıca yapma dolu gövdeli I kesitli diyagonal kirişlerle desteklenmiş rijit bir çerçeve sisteminden oluşmaktadır. Deney düzenegi Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Deney düzeneği (yükleme çerçevesi)

Deneylere yük kontrollü olarak başlanıp elemanın taşıdığı maksimum yükten sonra deplasman kontrollü devam edilmiştir. Yükleme, hidrolik pompa aracılığı ile mümkün olduğu kadar düzenli ve deney sırasında oluşan çatlak gelişimini gözleyecek hızda yapılmıştır. Deney elemanlarının yükleme düzeneği Şekil 3.15’de sunulmuştur.

Deneyler esnasında kolona uygulanan aksel yük TS500 doğrultusunda hesaplanmıştır ve bu değer 240-250 kN arasında değişen bir değer olarak alınmıştır.

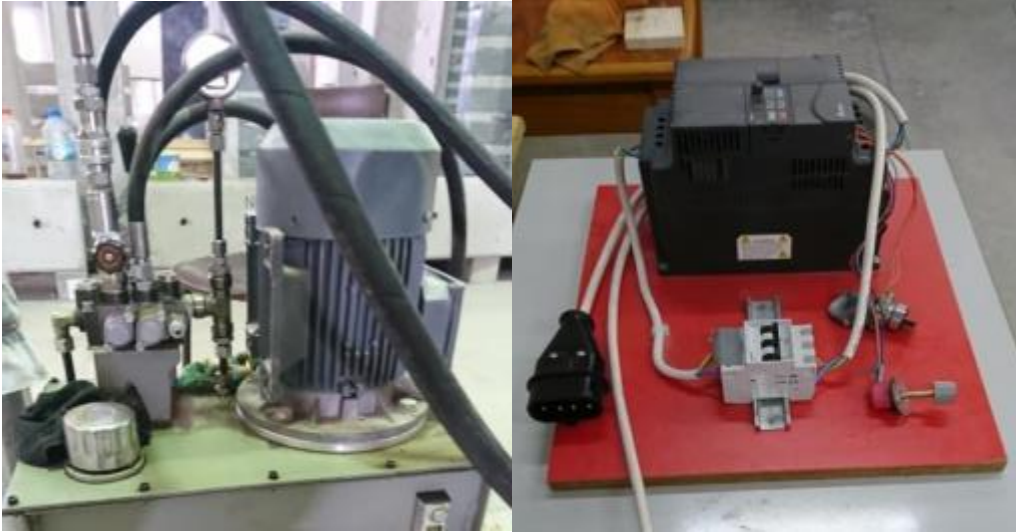


Şekil 3.15. Deney elemanlarına ait yükleme düzeneği

Yükleme düzeneği 500kN kapasiteli iki adet 30cm stroklu yatayda çalışan ve bir adet 50 cm stroklu düşeyde çalışan pistonlar ile iki adet 200 bar kapasiteli manuel hidrolik güç ünitesinden ve ek yük piston aktüvatörden oluşmaktadır. Yatay pistonlar Şekil 3.16'da, hidrolik güç ünitesi ve ek yük piston aktüvatör Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Yatay pistonlar



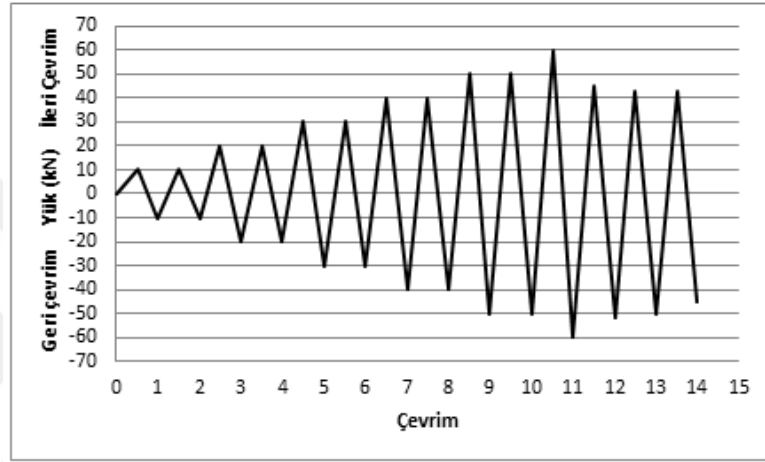
(a)

(b)

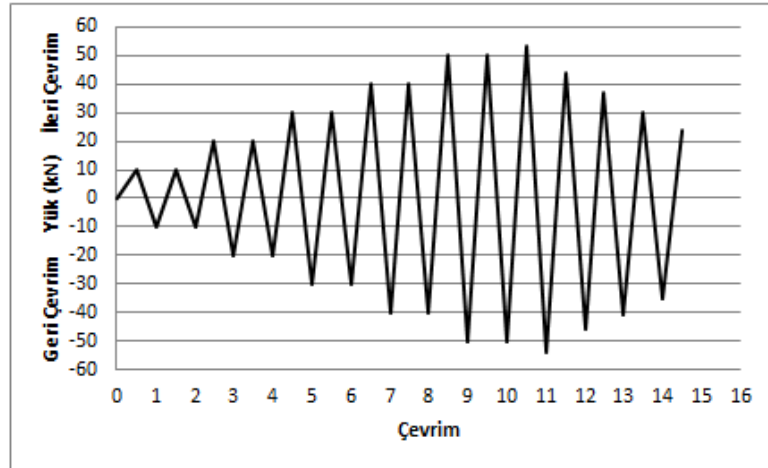
Şekil 3.17.(a) Hidrolik güç ünitesi (b) hız kontrol ünitesi

Deney elemanları tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilmiştir. Numunelere uygulanan her bir yük aralığı çevrim olarak adlandırılmaktadır. Çevrimler, yüklemenin 10'ar kN artırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. 1. ve 2

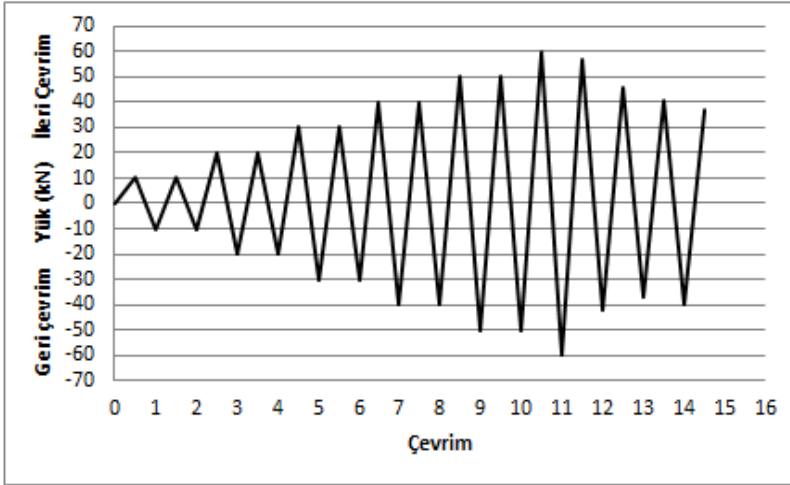
çevrim +10 kN ile -10 kN aralığında, 3. ve 4. çevrim +20 kN ile -20 kN aralığında, 5. ve 6. çevrim +30 kN ile -30 kN aralığında, 7. ve 8. çevrim +40 kN ile -40 kN aralığında, 9. ve 10. çevrim +50 kN ile -50 kN aralığındaki yüklemelerdir. Bu aşamaya kadar her yüklemeye ikişer defa yapılmaktadır. 11. çevrimden itibaren yüklemeler yine 10'ar kN artırılarak birer defa yapılmaya başlanmıştır. Deney elemanları, taşıyabileceği maksimum yüke ulaştıktan sonra deneye deplasman kontrollü devam edilmiştir. Deney elemanı 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10'a ait yük-çevrim grafikleri şekil 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26 ve 3.27'de gösterilmiştir.



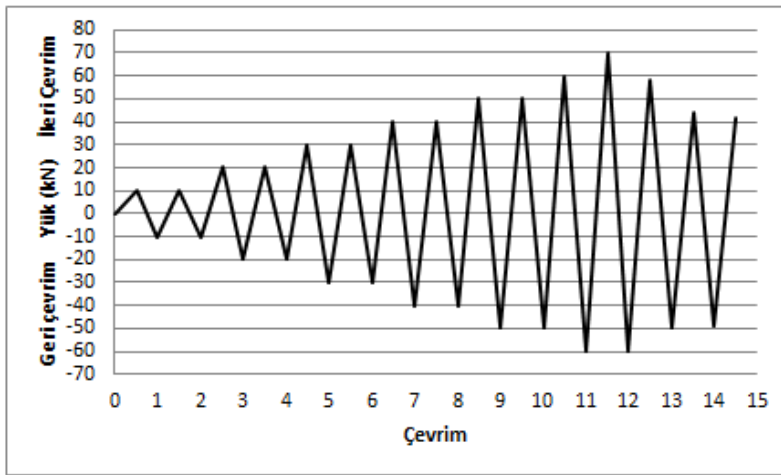
Şekil 3.18. Deney Elemanı-1'e uygulanan yük-çevrim grafiği



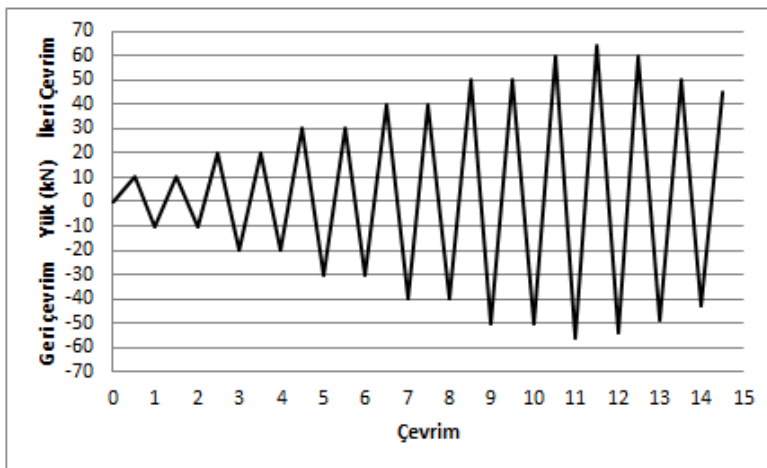
Şekil 3.19. Deney Elemanı-2'ye uygulanan yük-çevrim grafiği



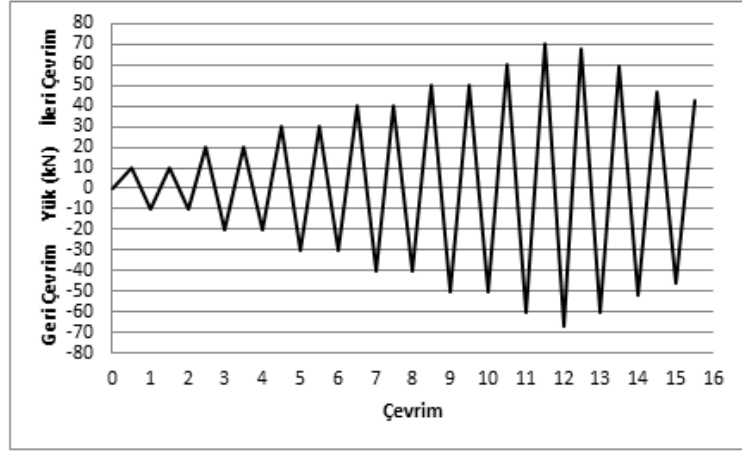
Şekil 3.20.Deney Elemanı-3'e uygulanan yük-çevrim grafiği



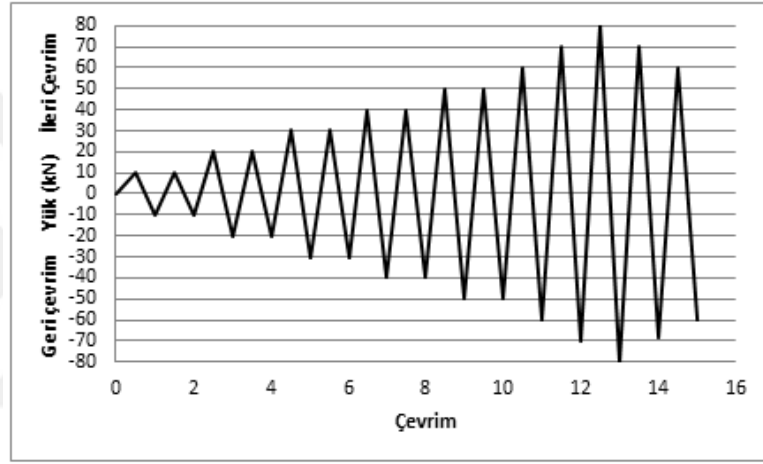
Şekil 3.21.Deney Elemanı-4'e uygulanan yük-çevrim grafiği



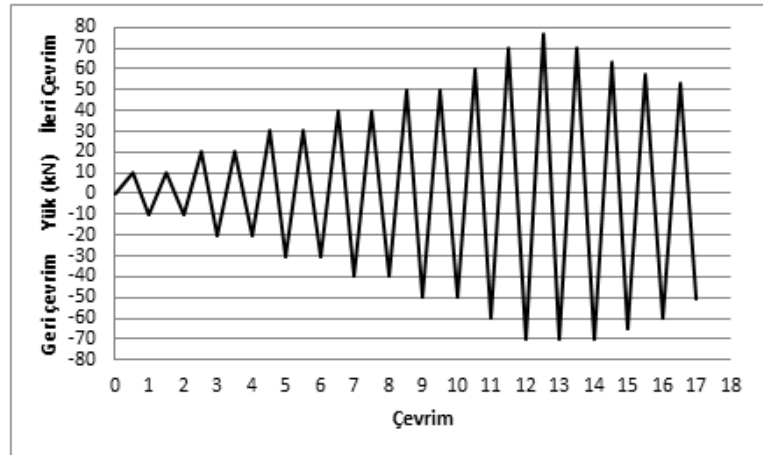
Şekil 3.22.Deney Elemanı-5'e uygulanan yük-çevrim grafiği



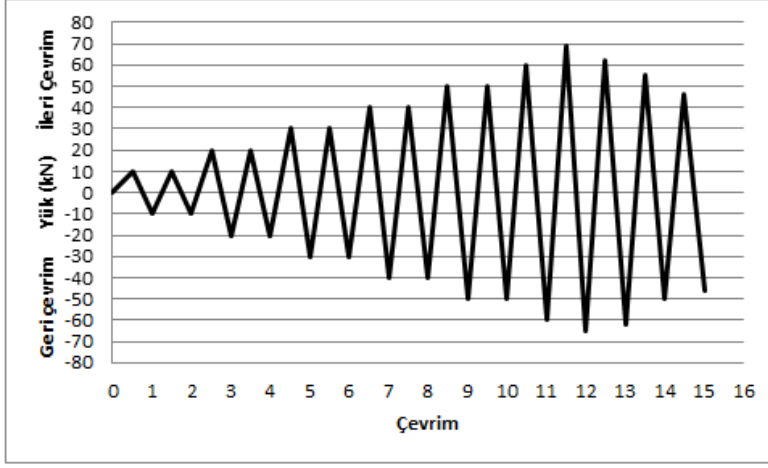
Şekil 3.23. Deney Elemanı-6'ya uygulanan yük-çevrim grafiği



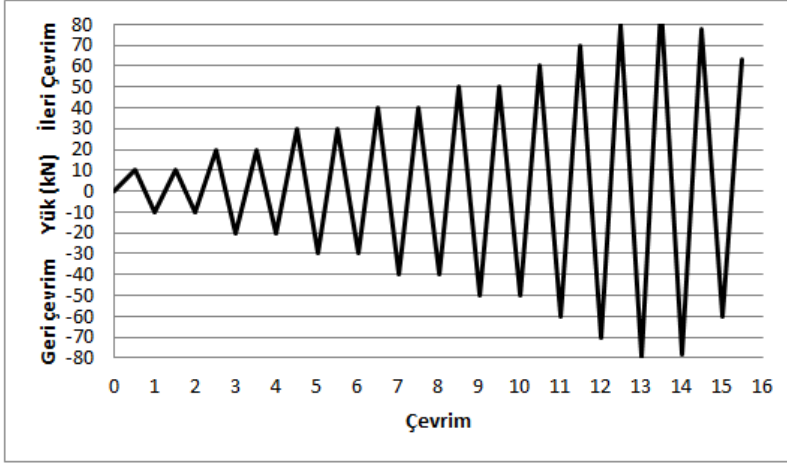
Şekil 3.24. Deney Elemanı-7'ye uygulanan yük-çevrim grafiği



Şekil 3.25. Deney Elemanı-8'e uygulanan yük-çevrim grafiği



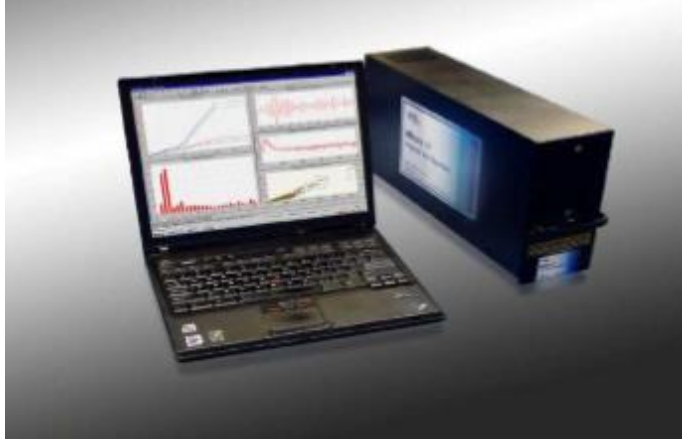
Şekil 3.26.Deney Elemanı-9'a uygulanan yük-çevrim grafiği



Şekil 3.27.Deney Elemanı-10'a uygulanan yük-çevrim grafiği

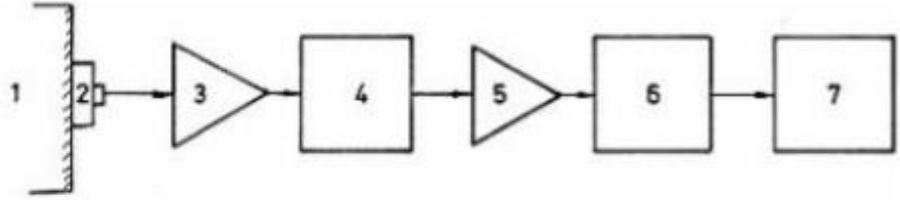
3.5 Akustik Emisyon Test Sistemi

Deneylerde kullanılan akustik emisyon sisteminde, Mistras Group Inc. firmasının üretmiş olduğu Micro II SAMOS kasası üzerine entegre edilmiş 8 kanallı sistem kartı, ön yükselticiler, bağlantı kabloları, sensörler ve bilgisayar bulunmaktadır. Deney kapsamında kullanılan AE sistemi Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28.Deney kapsamında kullanılan AE sistemi

8 kanallı sistem kartı, güç gereksinimi 10 Watt, giriş direnci 50 ohm, 0/ 6/ 8 dB seçenekli sinyal kazancı olan, 1 kHz – 400 kHz frekans sahip, maksimum genlik değeri 100 dB olan bir parçadır. AE sistemini oluşturan donanımlar basitleştirilmiş gösterimle Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29.(1) Beton numune, (2) Sensör, (3) Ön Yükseltici, (4) Süzgeç, (5) Güç Yükseltici, (6) Sayıcılar, Sinyal İşleme Kartı (8 kanallı AE sistem kartı), (7) Bilgisayar

Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayarda deney sırasında akustik hareketleri düzenli olarak alan, bilgisayarın sabit hafızasına kaydeden ve hareketlerin grafiklerini çizerek deneyin takibini kolaylaştıran bir yazılım mevcuttur. Sensörlerin yerleşiminde kırılma esnasında kritik önem arz eden çatlakların oluştuğu ve oluşacağını tahmin edildiği bölgeler seçilmiştir. Ayrıca sensörlerin deney elemanı üzerine yerleştirilmesinde kolaylık sağlaması açısından ve belli bir standardın oluşturulması amacıyla, yatay duran kolon sol alt köşe noktasında bir x, y, z koordinat takımı seçilmiş ve her bir

sensöre numara verilerek belirlenen koordinatlara yerleştirilmişlerdir. Bu koordinat takımı lokasyon tayini analizleri için de kullanılmıştır.

8 adet sensör numune üzerine yerleştirilmiştir. Sensörler beton yüzeyine yapıştırılmadan önce beton yüzeyi zımparalanmış ve nemli bez ile temizlenmiştir. Sensörlerin yere düşerek hasar almaması için sensörler Z şeklinde bir aparat ve kauçuk ile desteklenmiştir. Daha sonra, sensör seramik yüzeyine iletken sıvı malzeme sürülüp beton yüzeyine bantla sabitlenmiştir. Ardından, sırası ile sensörler ön yükselticilere, ön yükselticiler de bağlantı kabloları vasıtasıyla 8 kanallı akustik emisyon sisteminin entegre şekilde bulunduğu akustik emisyon kasasına (her sensör kendi kanalına giriş yapacak şekilde), akustik emisyon kasası da bilgisayara bağlanarak sistem donanımları kurulmuştur. Ön yükselticiler 40dB ve single giriş modunda kullanılmıştır. Bağlantıların tamamlanmasının ardından yazılımın bilgisayara kurulumu ve aktivasyonu yapılmıştır. Sensörlerin yerleştirilmesi Şekil 3.30'da gösterilmiştir.

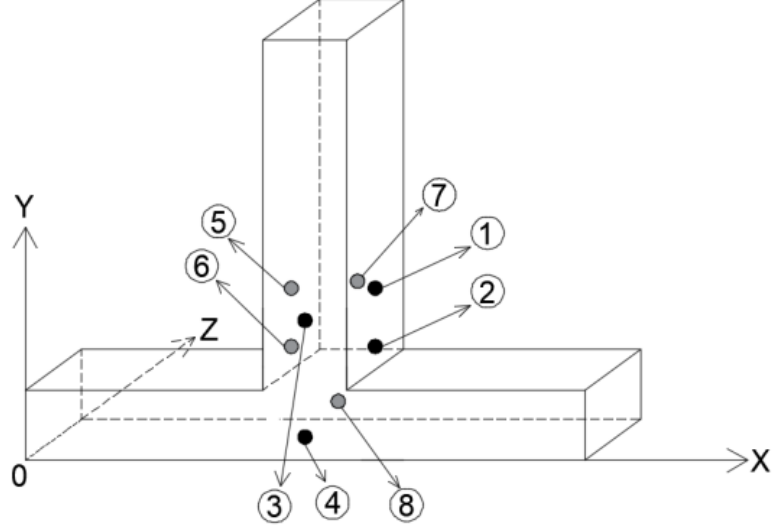


Şekil 3.30.Sensörlerin yerleştirilmesi

Daha sonra, her bir sensörün çalışıp çalışmadığını kontrol etmek, sistemde herhangi bir sorunun olup olmadığını anlamak amacıyla, sensörün yakın noktalarında kurşun kalem ucu kırılmıştır (Hsu-Nielsen kalibrasyon metodu). Bu

kırılma esnasında sensörlerin algıladığı sinyaller işlenerek bilgisayar ekranına yansımıştır. Gerekli hazırlıklar yapıldıktan sonra AE sistemi hazır hale gelmiştir.

Akustik emisyon sensörlerinin deney elemanları üzerindeki yerleşimlerine ait detaylar, kabul edilen eksen doğrultuları Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Deney elemanları üzerindeki sensörlerin yerleşimi

Deney elemanı 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10’a ait sensör koordinatları sırasıyla Tablo 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.16’da gösterilmiştir.

Tablo 3.7. Deney elemanı-3 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,400	0,150
3	1,200	0,600	0
4	1,200	0,100	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,400	0,190
7	1,200	0,600	0,300
8	1,200	0,100	0,300

Tablo 3.8.Deney elemanı-2 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,400	0,150
3	1,200	0,600	0
4	1,200	0,100	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,400	0,150
7	1,200	0,600	0,300
8	1,200	0,100	0,300

Tablo 3.9.Deney elemanı-3 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,400	0,150
3	1,200	0,600	0
4	1,200	0,100	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,400	0,150
7	1,200	0,600	0,300
8	1,200	0,100	0,300

Tablo 3.10.Deney elemanı-4 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,400	0,150
3	1,200	0,600	0
4	1,180	0,260	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,400	0,150
7	1,200	0,600	0,300
8	1,200	0,275	0,300

Tablo 3.11.Deney elemanı-5 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,420	0,150
3	1,200	0,600	0
4	1,180	0,280	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,420	0,150
7	1,200	0,600	0,300
8	1,190	0,250	0,300

Tablo 3.12.Deney elemanı-6 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,400	0,150
3	1,200	0,600	0
4	1,200	0,100	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,400	0,150
7	1,200	0,600	0,300
8	1,200	0,100	0,300

Tablo 3.13.Deney elemanı-7 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,400	0,150
3	1,200	0,600	0
4	1,200	0,200	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,400	0,150
7	1,200	0,600	0,300
8	1,200	0,200	0,300

Tablo 3.14.Deney elemanı-8 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,410	0,150
3	1,200	0,650	0
4	1,200	0,100	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,390	0,150
7	1,200	0,650	0,300
8	1,200	0,115	0,300

Tablo 3.15.Deney elemanı-9 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,840	0,150
2	1,380	0,440	0,150
3	1,200	0,860	0
4	1,200	0,300	0
5	1,020	0,850	0,150
6	1,020	0,430	0,150
7	1,200	0,860	0,300
8	1,200	0,295	0,300

Tablo 3.16.Deney elemanı-10 AE sensör koordinatları (m)

Sensör	x	y	z
1	1,380	0,650	0,150
2	1,380	0,500	0,150
3	1,200	0,600	0
4	1,200	0,100	0
5	1,020	0,650	0,150
6	1,020	0,500	0,150
7	1,200	0,600	0,300
8	1,200	0,100	0,300

4.DENEY SONUÇLARI

Bu deneysel çalışma TÜBİTAK'ın 315M084 numaralı 1001 projesi kapsamında yapılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları mekanik ve akustik emisyon olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, akustik emisyon ile ilgili bulgular ayrıntılı olarak verilmektedir. Türk (2019)'ün tez çalışmasında bu deney ile ilgili mekanik bulgular detaylı bir şekilde elde edilebilir.

4.1 Mekanik Bulgular

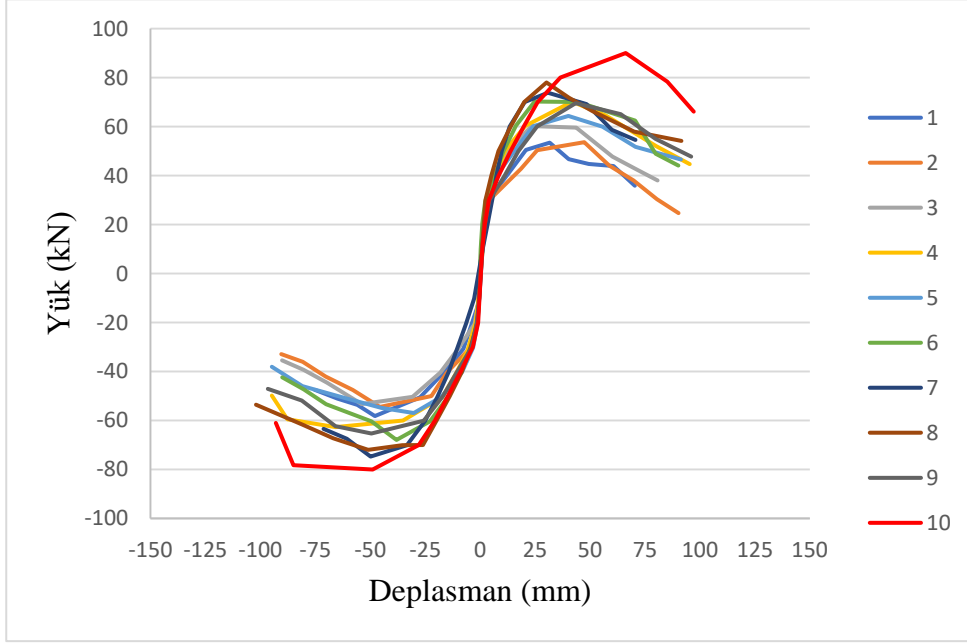
Dayanım, uygulanan çeşitli güçlendirme yöntemlerinin sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Deney elemanlarının dayanımını belirlemek için yük-deplasman grafikleri kullanılmıştır. Ölçülen maksimum yük değeri ve maksimum deplasmanlar Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 incelendiğinde, güçlendirilen deney elemanlarında, referans numunesine göre (Deney Elemanı-3) dayanım artışı sağlandığı görülmüştür. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda güçlendirilmiş deney elemanlarında en küçük dayanım Deney Elemanı-5'de, en büyük dayanım ise Deney Elemanı-10'da görülmüştür.

Tablo 4.1.Mekanik bulgular (dayanım ve deplasman)

Deney Elemanı No	Akma Yüğü (kN)		Akma Anındaki Deplasman (mm)		Ölçülen Maksimum Yük değeri (kN)	Güçlendirme sonrası elde edilen dayanım artışı	Göçme Mekanizması
	İleri	Geri	İleri	Geri			
1	53.52	-58.21	31.8	-47.8	-58.21	-	Düğüm noktası
2	53.64	-54.45	47.5	-45.6	-54.45	-	Düğüm noktası
3	60.22	-51.38	23.4	-54.0	60.22	1	Düğüm noktası
4	70.14	-62.91	41.8	-69.3	70.14	1.165	Düğüm noktası
5	64.37	-57.10	39.5	-30.2	64.37	1.069	Düğüm noktası
6	70.23	-67.90	24.7	-38.0	70.23	1.166	Düğüm noktası
7	73.80	-74.75	30.8	-49.7	-74.75	1.241	Düğüm noktası
8	78.12	-71.96	30.1	-50.9	78.12	1.297	Düğüm noktası
9	69.79	-65.54	44.2	-50.2	69.79	1.159	Düğüm noktası
10	90.17	-80.20	66.5	-49.1	90.17	1,497	Düğüm noktası

Her bir döngüdeki maksimum yüklere karşılık gelen deplasmanlara göre, elemanların zarf eğrisi grafikleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Zarf eğrileri, numuneleri dayanım ve deplasman açısından kıyaslamak için çıkarılmıştır. Eğriler incelendiğinde en iyi davranışı çelik levha ile güçlendirilen Deney Elemanı-10 sergilemiştir.



Şekil 4.1. Deney elemanlarının yük-deplasman zarf eğrileri

4.2 AE Bulguları

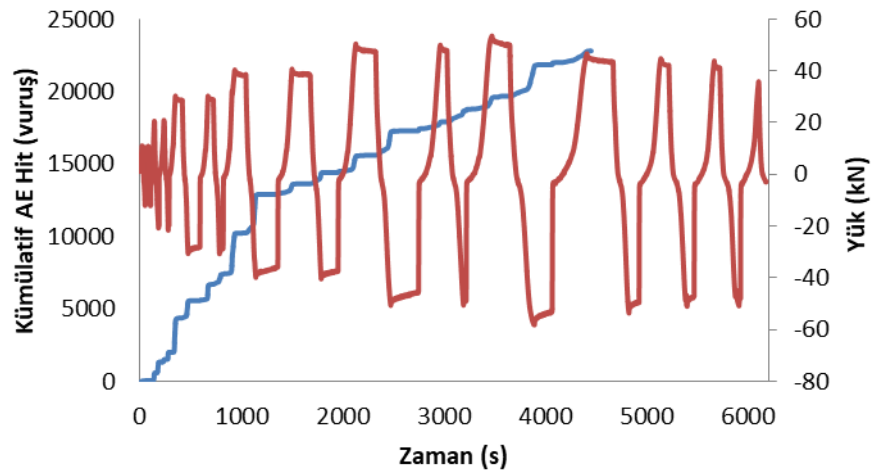
Yüklemeler sırasında deney elemanlarından alınan akustik emisyon ölçümlerinden elde edilen veriler analiz edilmiş ve sonuçları bu başlık altında sunulmuştur. Aşağıda verilen sonuçlarda yükleme ile aynı anda başlatılan AE veri toplama sisteminden elde edilen verilerin zamana bağlı grafikleri bulunmaktadır. Bu grafikler AE parametreleri olan enerji, ortalama frekans, genlik, yükselme zamanı-deney zamanı grafikleri ile çatlak türü belirlemeye yarayan ortalama frekans-RA değeri grafikleridir. Grafiklerdeki kırmızı noktaların her biri bir AE vuruşunu temsil etmektedir. Enerji grafiğinde mavi renk ile gösterilen kümülatif enerji olup diğer grafiklerdeki siyah çizgi ise o değerlerin hareketli ortalamasını temsil etmektedir.

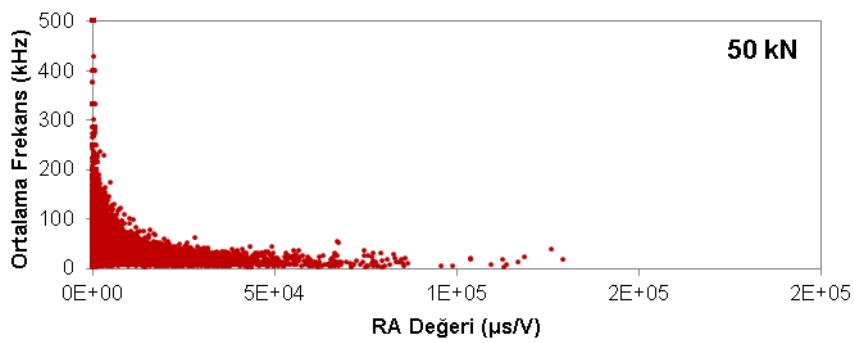
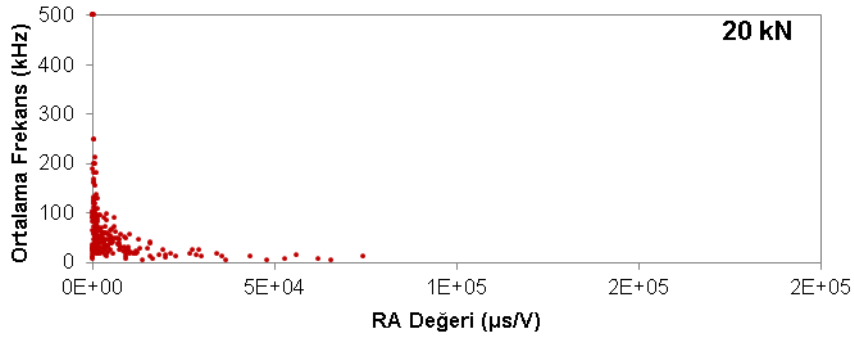
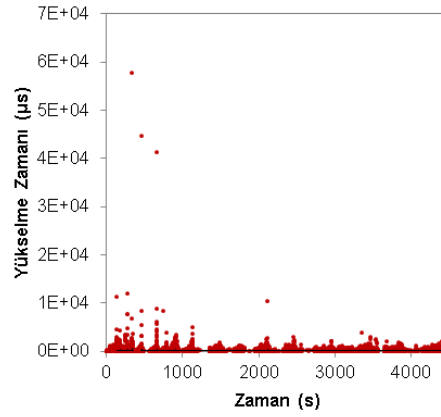
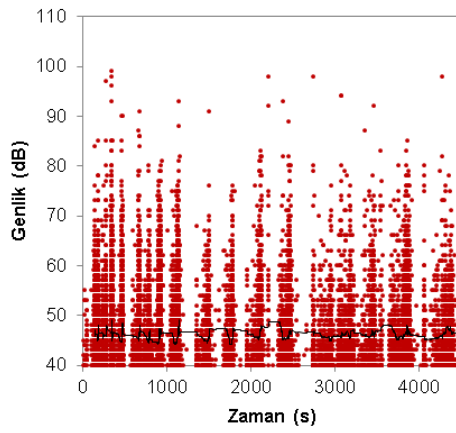
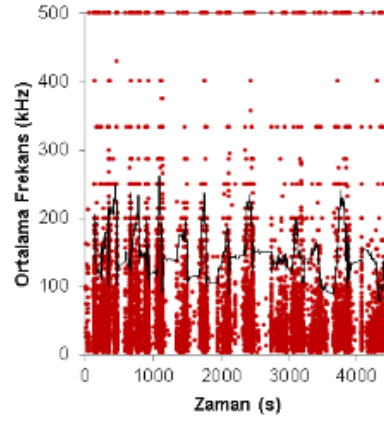
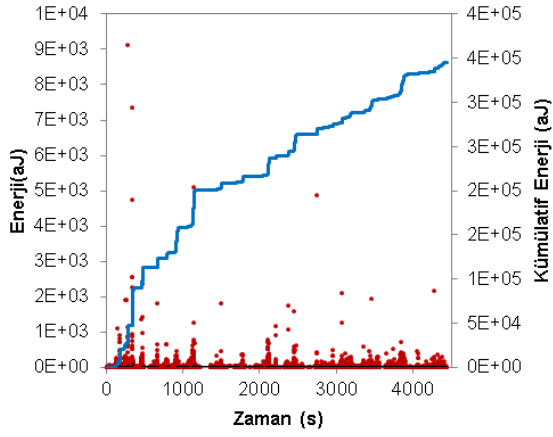
Zamana bağlı parametre incelemesinin yanı sıra AE aktivitelerinin kaynak konumlandırma algoritması ve SiGMA prosedürü ile oluşma zamanları ve

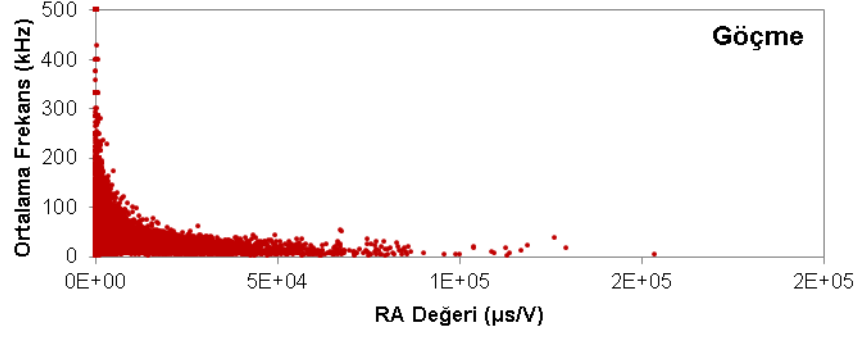
lokasyonları belirlenerek tüm deney elemanları için hasar haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar deneyler sırasında gözlenen çatlak dokularıyla uyum göstermiştir. AE ile kaynak konumlandırma, gözle görülmeyen veya güçlendirme malzemesi altında kalan çatlakların ve sıyrılmaların da belirlenmesi için büyük önem teşkil etmektedir. AE sensörlerinin hasar görmemesi için bazı numunelerde yükleme tamamlanmadan sensörler çıkarılmıştır.

4.2.1 Deney Elemanı-1

Deney Elemanı-1'in AE aktiviteleri incelendiğinde (Şekil 4.2) kümülatif AE vuruşlarının 345., 811. ve 1107. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. Kümülatif AE enerjisinin ise 342. ve 1048. saniyelerde aniden arttığı görülmektedir. Bu ani artışlar deney elemanının 5. çevrim (+30 kN'un ilk çevrimi) ve 7. çevrime (+40 kN'un ilk çevrimi) maruz kaldığı ve sırasıyla ilk eğilme ve ilk kesme çatlaklarının gözlemlendiği anlarda meydana gelmişlerdir. Ayrıca tüm deney boyunca maksimum genlik olan 99 dB ilk eğilme çatlağının oluştuğu +30 kN'un ilk çevriminde (342. saniye) elde edilmiştir. AE hitlerine ait yükselme zamanı dağılımında 143. ve 753. saniyeler arasında yüksek değerler göze çarpmaktadır. Bu süreler boyunca (11. çevrime kadar) deney elemanında çok sayıda çatlak gözlenmiş ve mevcut çatlaklar ilerlemeye devam etmiştir. Ortalama frekans ve RA değeri ilişkileri incelendiğinde ise deney elemanında ileri yük seviyelerinde yüksek RA değerli hitler meydana geldiği görülmektedir. Bu durum yükün artmasıyla elemanda kesme çatlaklarının arttığını göstermekte ve deney sırasında gözlenen diyagonal çatlaklar ile de uyum teşkil etmektedir.

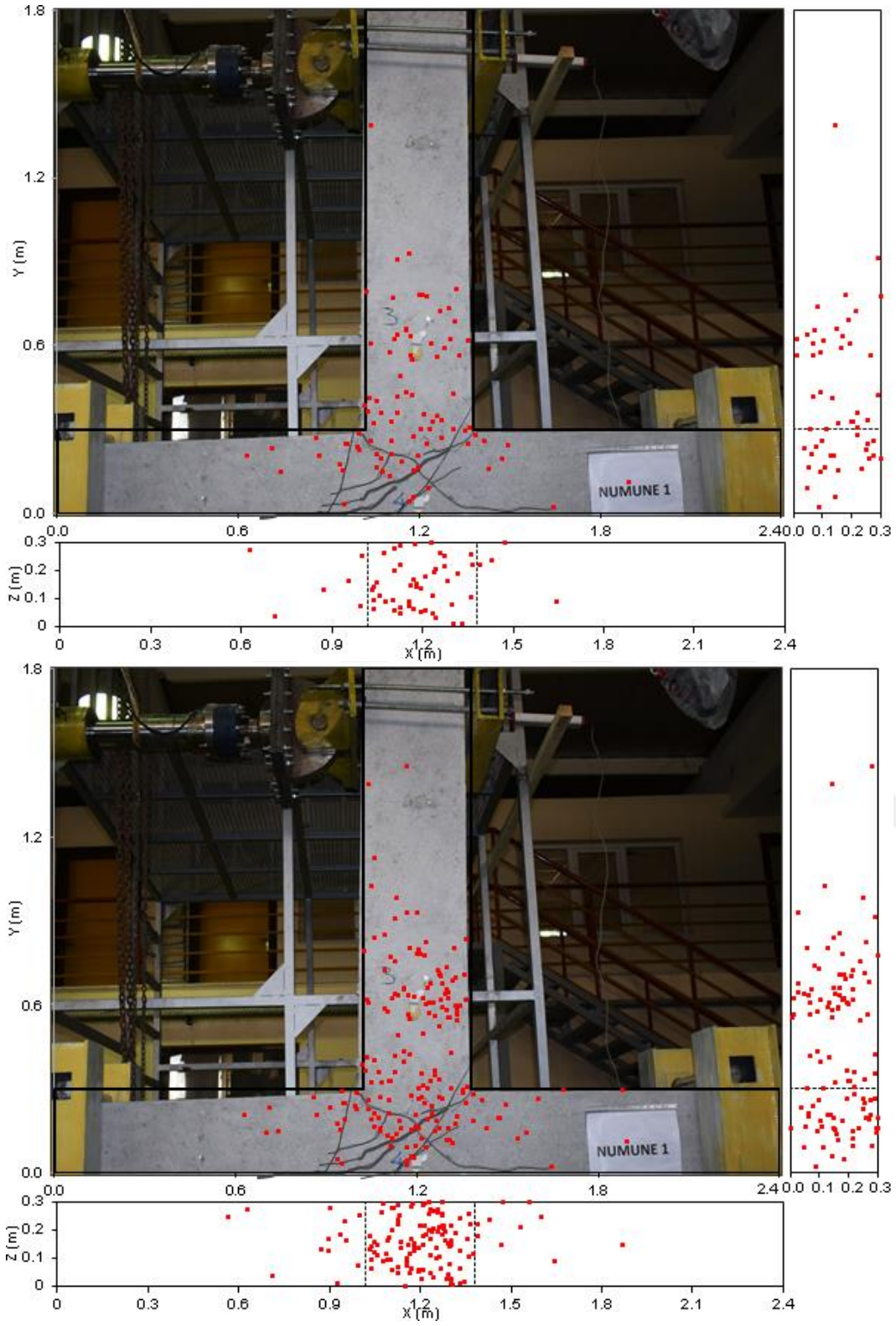




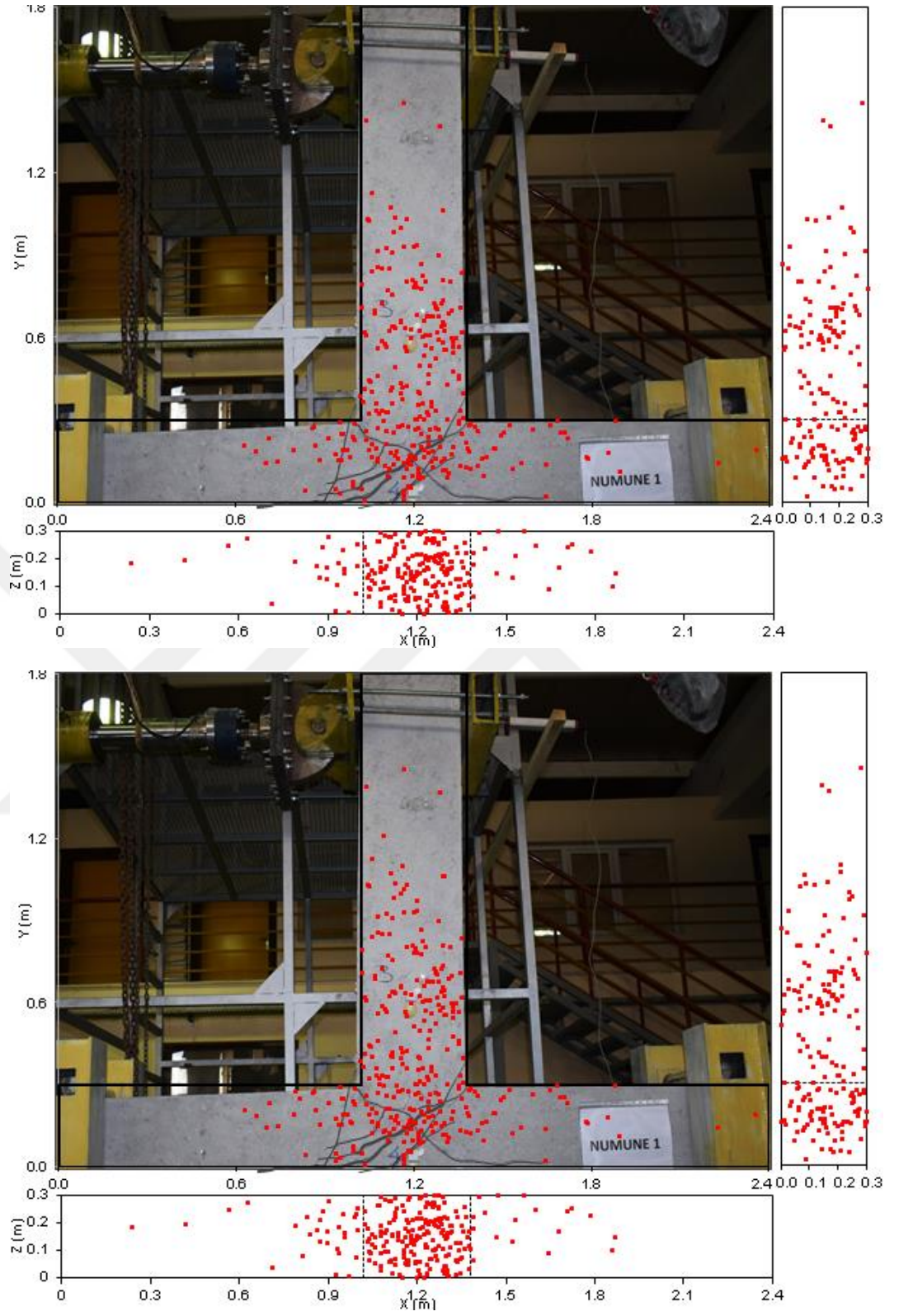


Şekil 4.2.Deney Elemanı-1'e ait AE parametre analizi bulguları

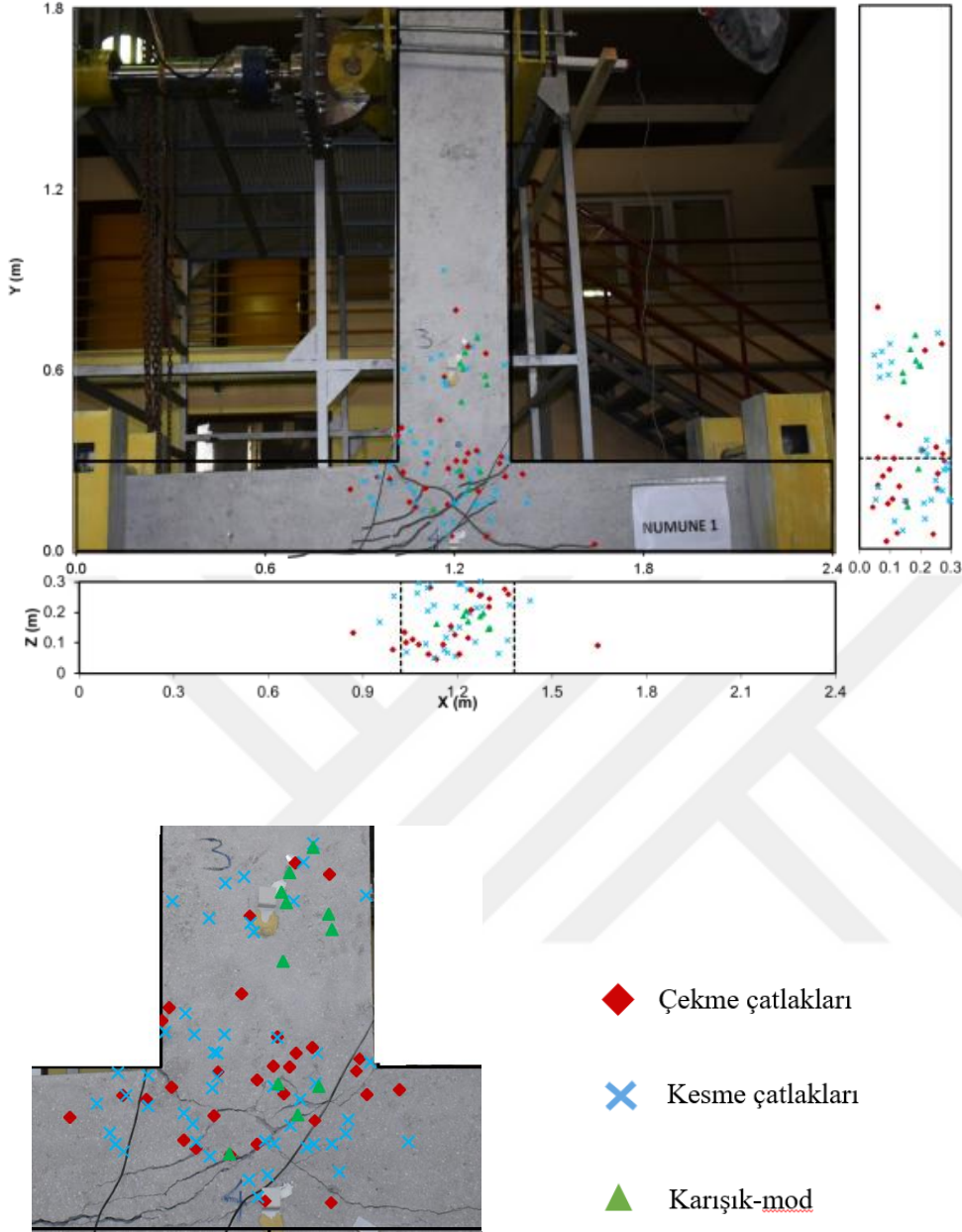
Deney Elemanı-1'in AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'de verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği 5. yük çevrimi, ilk kesme çatlaklarının gözlemlendiği 7. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 11. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.3. Deney Elemanı-1'in 5. ve 7. çevrimler sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.4. Deney Elemanı-1'in 11.yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.5. Deney Elemanı-1'in SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

Deney Elemanı-1 için AE kaynak konumlandırması minimum 4 adet sensöre gelen bir AE olayından elde edilen sonuçlardır. x, y, z koordinat sisteminde 3 boyutlu konumlandırma yapabilmek için minimum 4 sensöre gelen veri kullanıldığından analiz sonuçları bu şekilde değerlendirilmiştir. SiGMA sonuçlarında ise çatlak sınıfını belirleyebilmek için tansörel analiz yapıldığından minimum 6 sensöre gelen veri dikkate alınmalıdır. Fakat bu çalışmada 8 sensöre birden gelen bir AE olayı hesaplanmış ve AE kaynağı (çatlak) sınıfı bu değerler için belirlenmiştir. Kaynak konumlandırma ve SiGMA analizleri karşılaştırıldığında bu sebeple AE kaynağı sayısında bir azalma vardır. Çalışmada

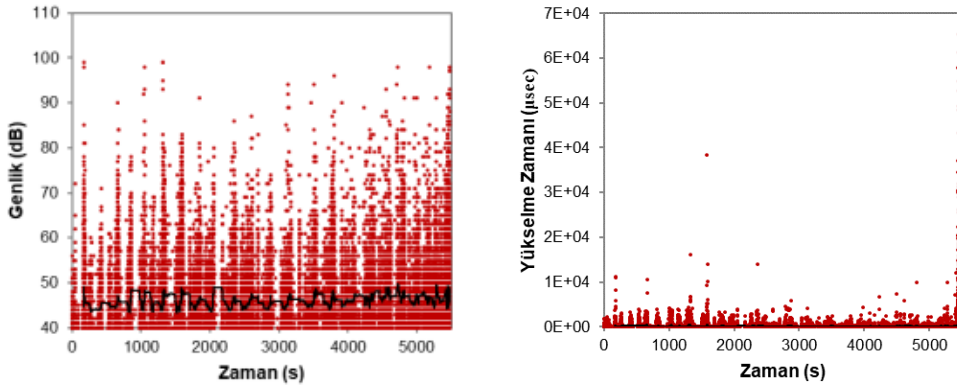
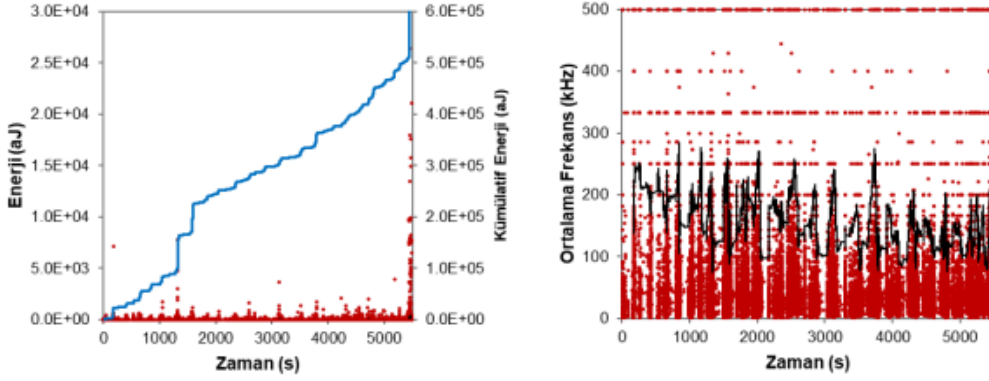
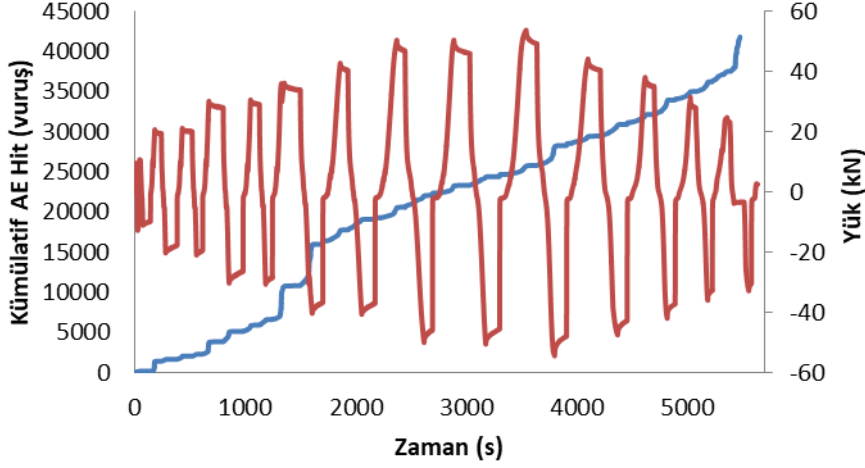
sensör yerleşimi çatlak oluşumunun tahmin edildiği bölgede yoğunlaşmıştır. En uzak iki sensör arası mesafe önceki çalışmalardan da tecrübe edildiği üzere betondaki kırılmanın yaklaşık 1 metre mesafede sönümlendiği bilgisiyle 1 m'den az olacak şekilde ayarlanmıştır. SiGMA analizleri için öncelikle sensörlerden elde edilen veriler işlenmiş ve filtrelenmiştir. Daha sonra “Python” ile yazılmış arayüz programı ile veriler her sensör için gruplandırılmıştır. “Fortran” ile yazılmış AE-SiGMA programı ile de analizler yapılmıştır. Analizler yapılırken, eğer bir çatlak oluştuğunda 8 sensöre de veri geldiyse o “çatlak oluşumu” olarak tanımlanmıştır. Çatlak konumları ve tipleri “Microsoft Excel” grafikleri yardımıyla gösterilmiştir. SiGMA analizi sonuçlarında kırmızı dörtgen çekme çatlaklarını, yeşil üçgen karışık mod çatlakları ve mavi çarpı ise kesme çatlaklarını temsil etmektedir. Deney elemanının boyutları da şekil üzerinde metre birimi cinsinden gösterilmektedir.

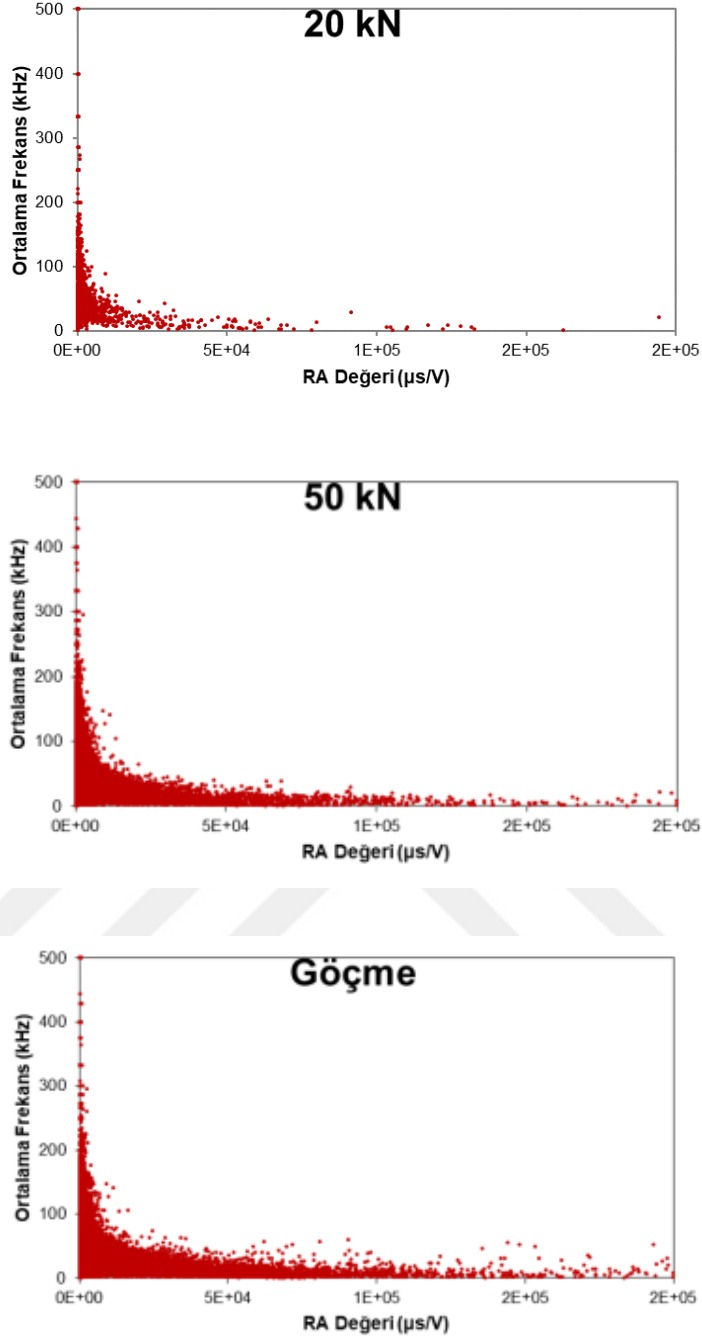
Kaynak konumlandırma sonuçları incelendiğinde düşük yük seviyelerinde numune genelinde gözlenen çatlaklar, yük seviyesi arttığında düğüm noktası bölgesinde yoğunlaşmıştır. AE ile elde edilen sonuçlar gözle görülen çatlaklar ile uyumludur. Burada AE'nin avantajı, gözle görülmeyen bölgedeki çatlakların da elde edilmesidir. SiGMA analizi sonuçları incelendiğinde genel olarak kesme çatlakları çekme çatlaklarından daha fazla sayıda oluşmuştur. Kesme çatlakları özellikle düğüm noktasında yoğunlaşmıştır. Analiz sonuçlarında çatlakların oluşma sürelerine bakılırsa düşük yük seviyelerinde çekme çatlakları daha fazla sayıda oluşmuş ve ilerleyen yüklerde kesme çatlakları artmıştır.

4.2.2 Deney Elemanı-2

Deney Elemanı-2'nin AE aktiviteleri incelendiğinde (Şekil 4.6) kümülatif AE vuruşlarının 1331. ve 1568. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. Kümülatif AE enerjisinin ise 1327. ve 1592. saniyelerde aniden arttığı görülmektedir. Bu ani artışlar deney elemanının 7. çevrime (+40 kN'un ilk çevrimi) ve 8. çevrime (-40 kN'un ilk çevrimi) maruz kaldığı ve sırasıyla diyagonal çatlakların ve kolon alt yüzündeki ilk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği anlarda meydana gelmişlerdir. Ayrıca tüm deney boyunca maksimum genlik olan 99 dB ilk eğilme çatlağının oluşmaya başladığı +20 kN'un ilk çevriminde (177. saniye) elde edilmiştir. AE hitlerine ait yükselme zamanı dağılımında 177. ve 1591. saniyeler arasında yüksek değerler göze çarpmaktadır. Bu süreler boyunca (7. çevrime kadar) deney elemanında çok sayıda çatlak gözlenmiş ve mevcut çatlaklar ilerlemeye devam etmiştir. Ortalama frekans ve RA değeri ilişkileri

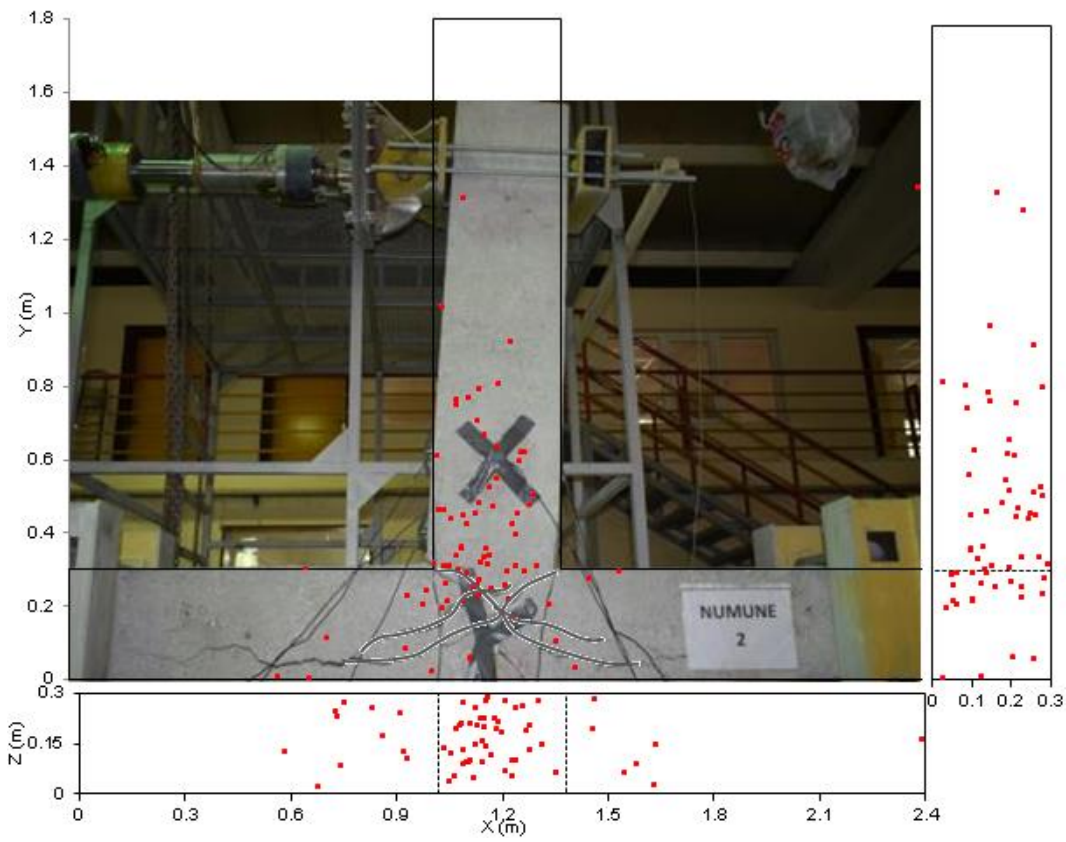
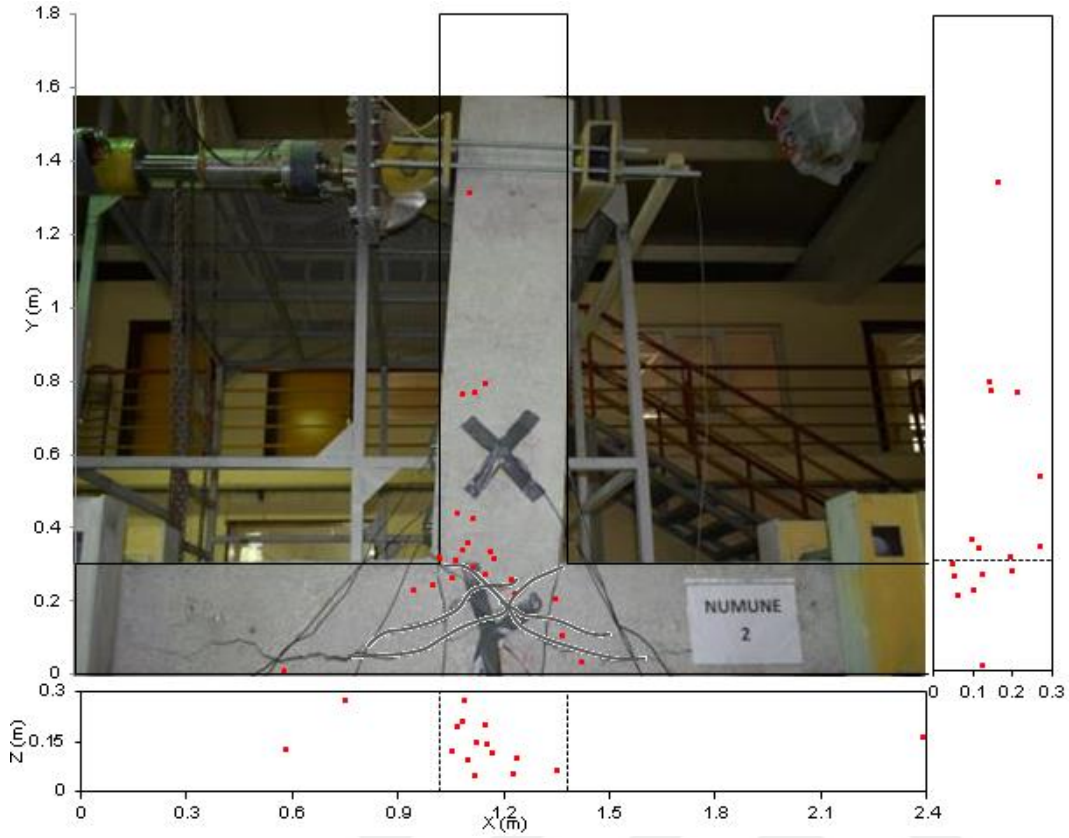
incelendiğinde ise deney elemanında ileri yük seviyelerinde yüksek RA değerli hitler meydana geldiği görülmektedir. Bu durum yükün artmasıyla elemanda kesme çatlaklarının arttığını göstermekte ve deney sırasında gözlenen diyagonal çatlaklar ile de uyum teşkil etmektedir.



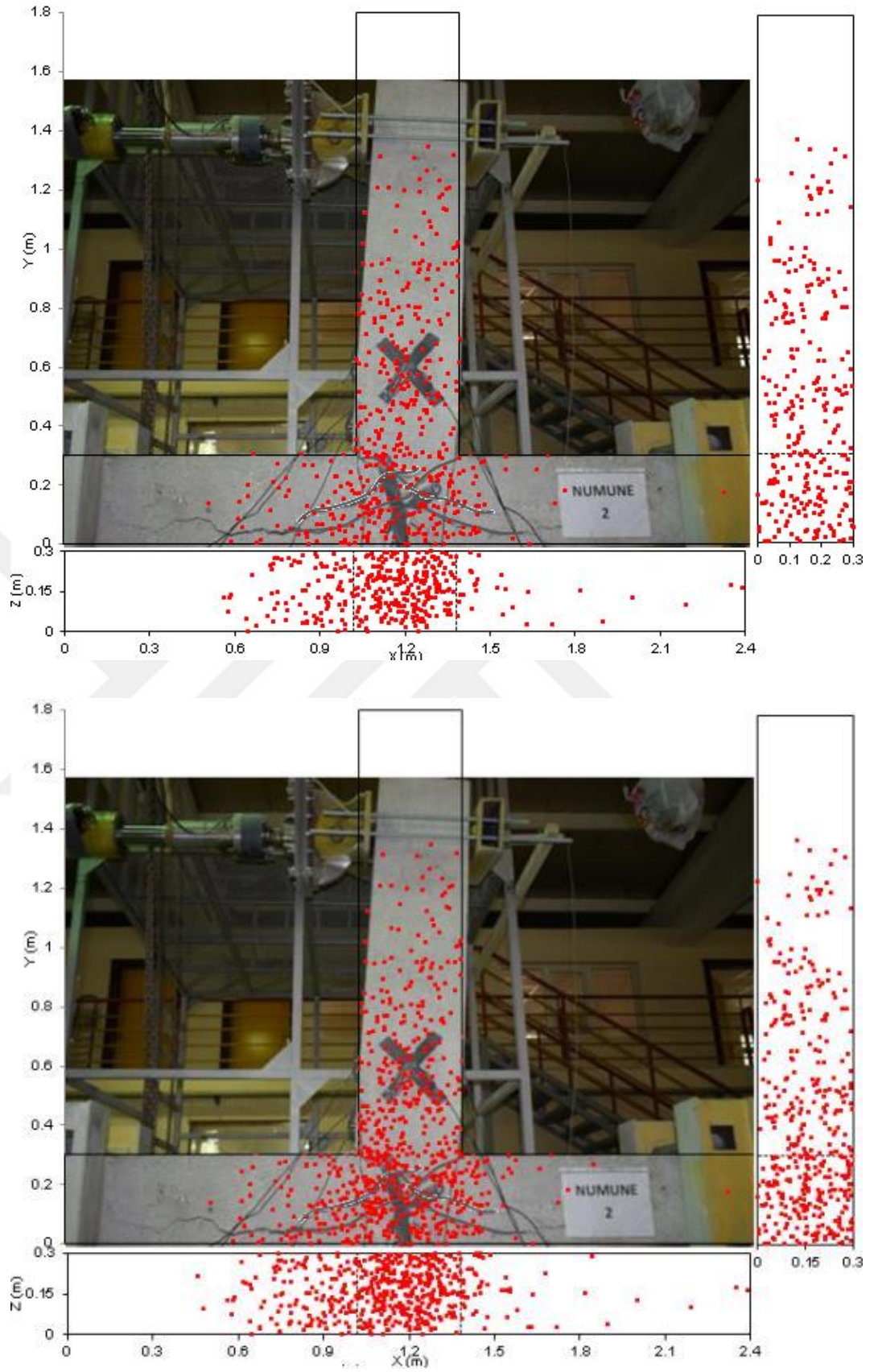


Şekil 4.6.Deney Elemanı-2'ye ait AE parametre analizi bulguları

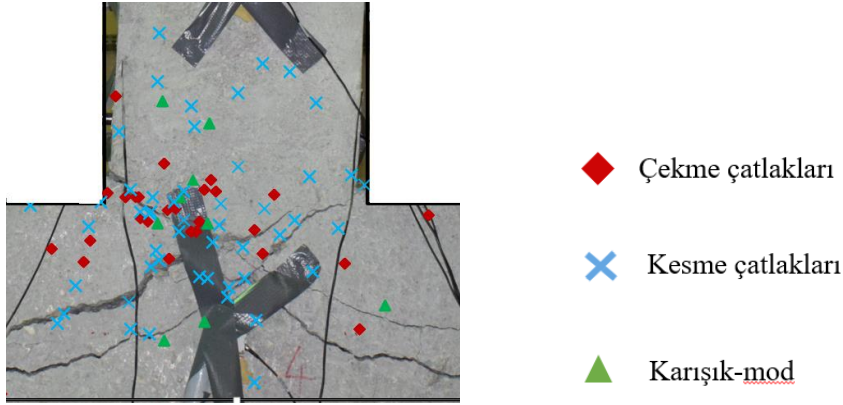
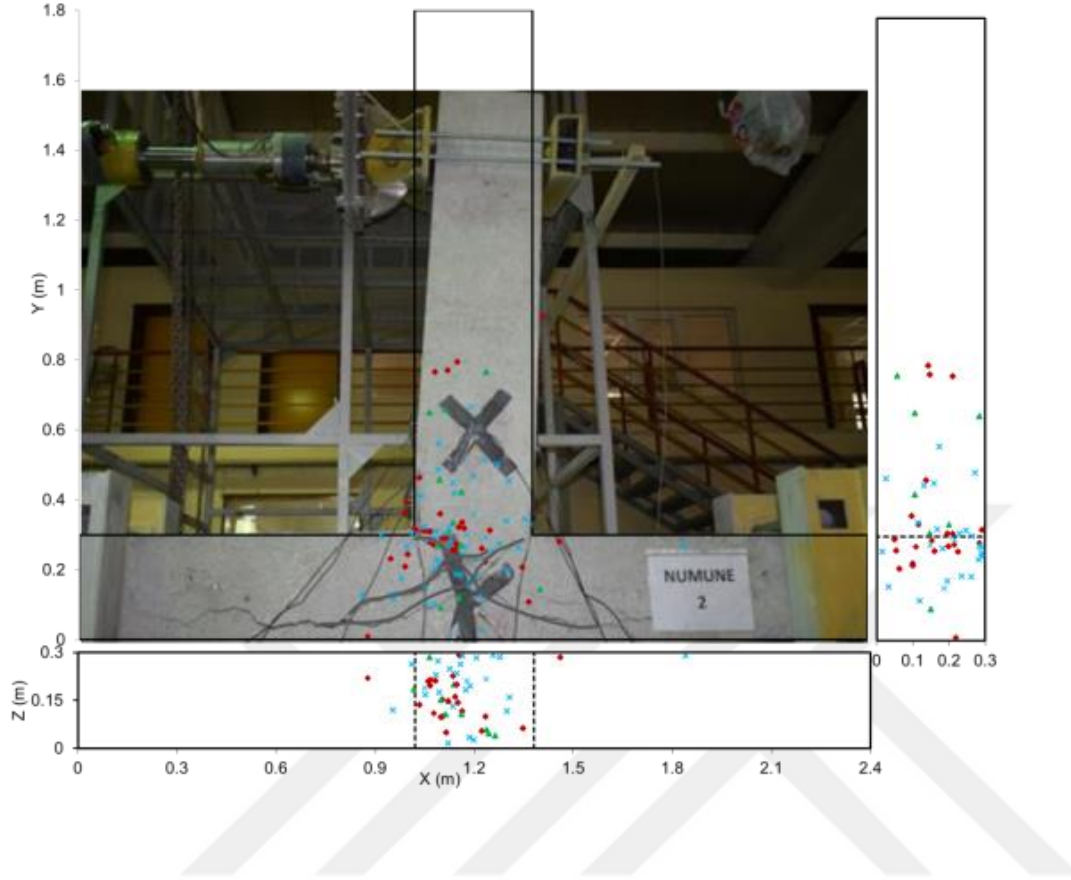
Deney Elemanı-2'in AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği 3. yük çevrimi, ilk kesme çatlaklarının gözlemlendiği 5. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 11. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.7. Deney Elemanı-2'nin 3. ve 5. yük çevrimi sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.8. Deney Elemanı-2'nin 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



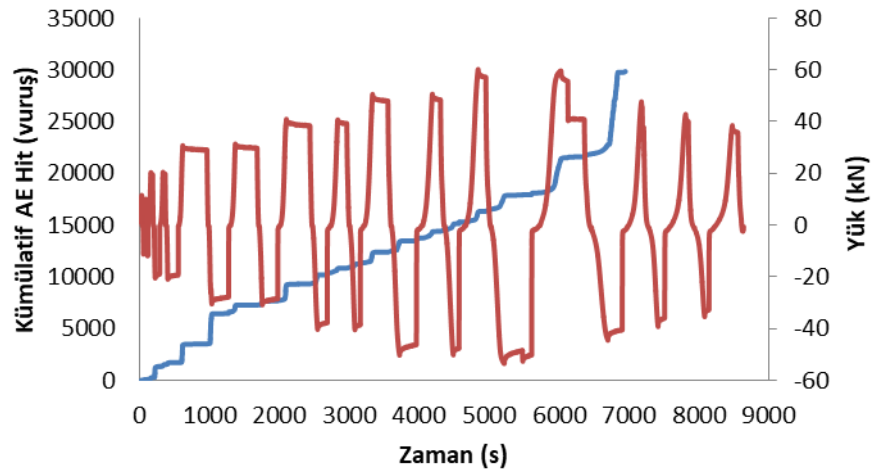
Şekil 4.9. Deneysel Eleman-2'nin Sigma analizi ile elde edilen hasar haritası

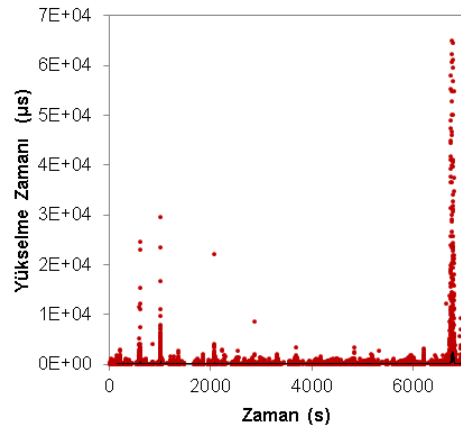
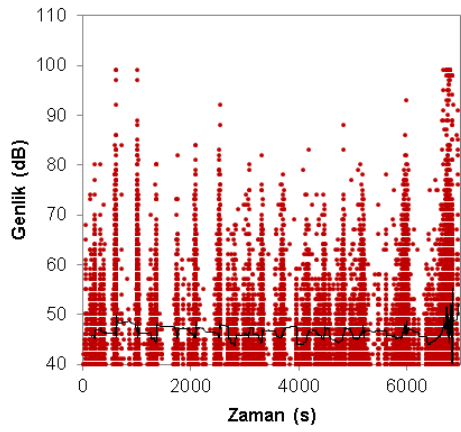
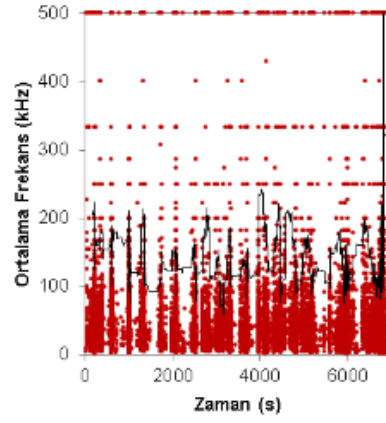
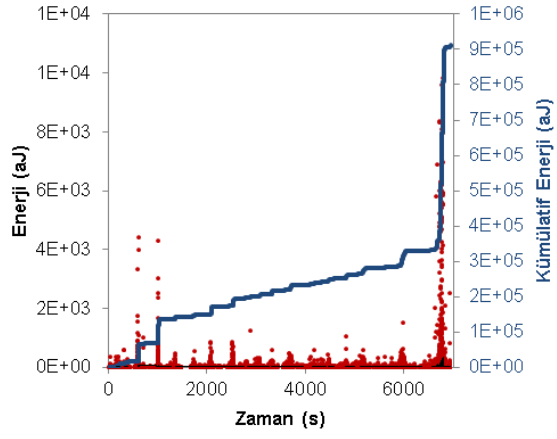
Şekil 4.7 ve 4.8'den de görüldüğü üzere yükün artmasıyla birlikte AE aktivitelerinde bir artış gözlenmektedir ve ilerleyen yük seviyelerinde çatlaklar düğüm noktasında yoğunlaşmaktadır. Deneysel Eleman-1'e kıyasla daha fazla AE kaynağı gözlenmiştir. Dışarıdan gözlenen birleşim noktasındaki ilk eğilme çatlaklarının oluştuğu 3. yük çevrimindeki AE kaynak konumlandırma sonuçlarına bakıldığında bir uyum görülmektedir. İlk AE aktiviteleri de kiriş-kolon birleşim

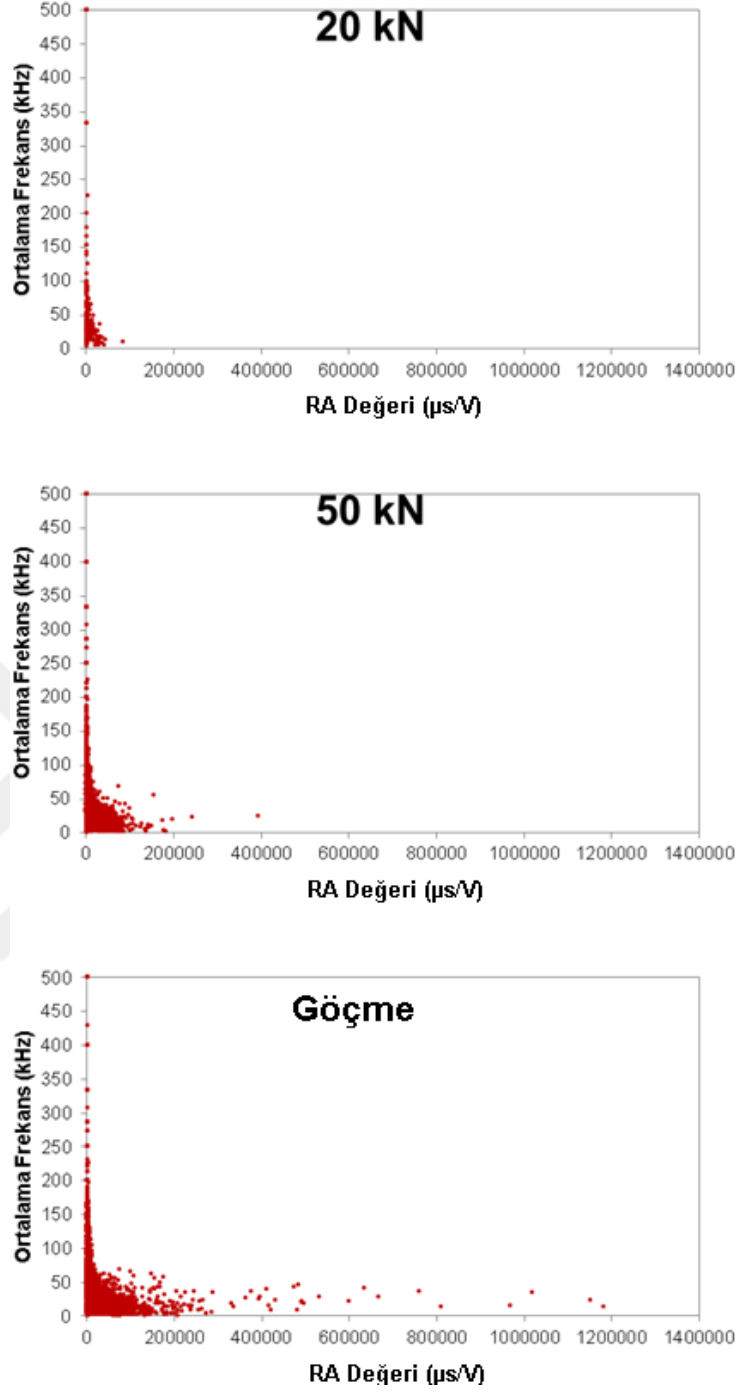
yüzeyinde oluşmuştur. Şekil 4.9’da verilen SiGMA analizi sonuçları da yine bir uyum içerisinde ve bu yük seviyesinde oluşan çatlaklar çekme niteliğindeki çatlaklardır. Düşük yük seviyesindeki çekme çatlakları ileri yük seviyelerinde kesme niteliği kazanmışlardır. Kaynak konumlandırma sonucunda elde edilen AE konumları gözle görülen çatlaklar ile bir uyum içerisinde. Bu deney elemanında düğüm noktasının zayıf olduğu dikkate alındığında bu bölgede yüksek enerjili fazla sayıda AE aktivitesinin elde edilmesi doğru bir sonuçtur.

4.2.3 Deney Elemanı-3

Deney Elemanı-3’ün AE aktiviteleri incelendiğinde (Şekil 4.10) kümülatif AE vuruşlarının 1017., 5875. ve 6745. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. Kümülatif AE enerjisi değişiminde ise 1011., 5970. ve 6730. saniyelerde sıçramalı artışlar olduğu görülmektedir. Bu sıçramalar deney elemanının 7. çevrim (-40 kN’un ilk çevrimi) ve 11. çevrime (+60 kN) maruz kaldığı, sırasıyla kolondaki çatlakların açıldığı ve boyuna donatının aktığı yük seviyelerinde meydana gelmiştir. Tüm deney boyunca maksimum genlik olan 99 dB ise yine kolondaki çatlakların açıldığı -40 kN’un ilk çevriminde (1011. saniye) elde edilmiştir. Ayrıca bu seviyede ortalama frekansın hareketli ortalamasında düşüş mevcuttur. AE hitlerine ait yükselme zamanı dağılımında 6730. saniyede yüksek değerler göze çarpmaktadır. Ortalama frekans-RA değeri ilişkileri incelendiğinde ise deney elemanında ileri yük seviyelerinde yüksek ortalama RA değerli hitler meydana geldiği görülmektedir. Bu durum yükün artmasıyla elemanda kesme çatlaklarının arttığını göstermektedir. Bu durum deney sırasında gözle görülemeyen mikro düzeydeki kesme aktivitelerinin AE ile belirlenmesi açısından önem teşkil etmektedir.

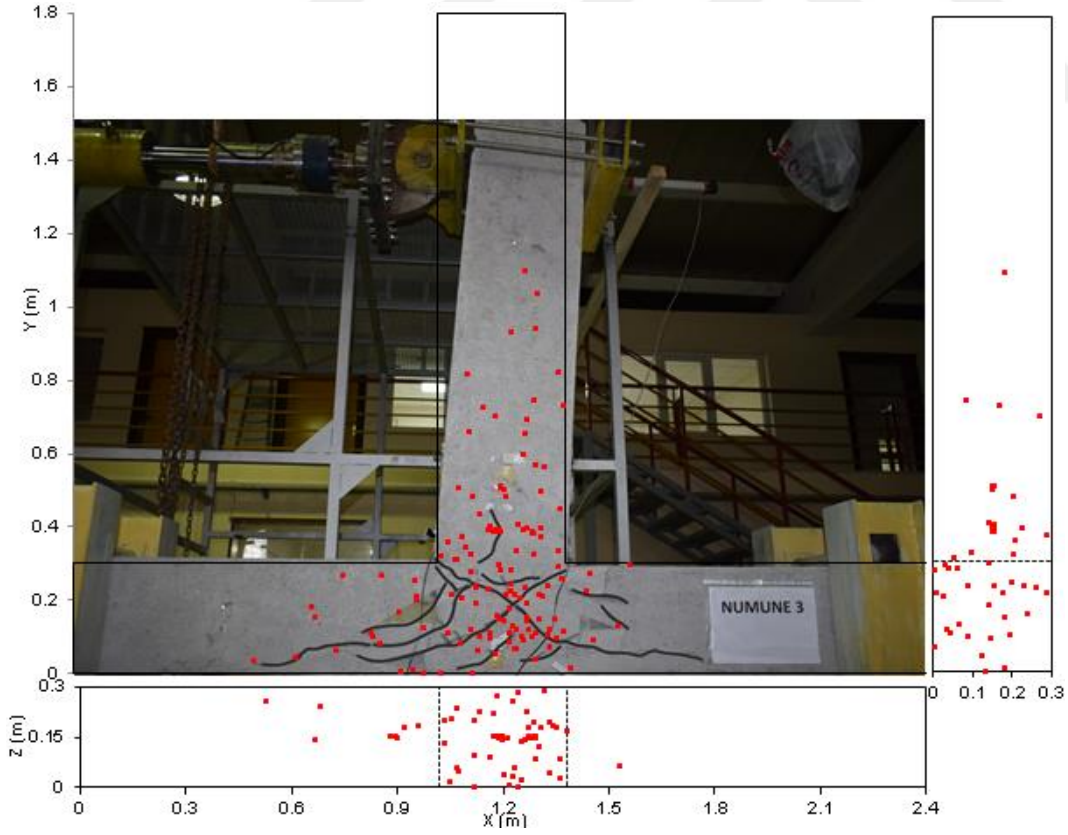
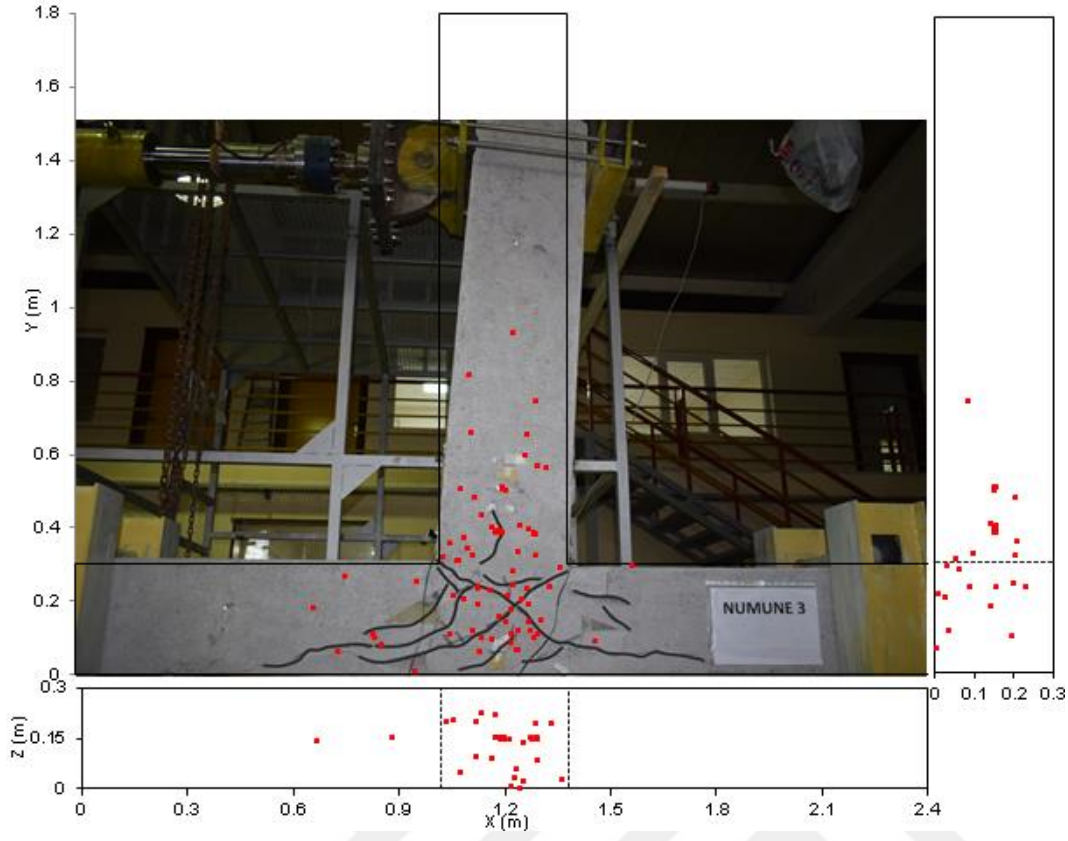




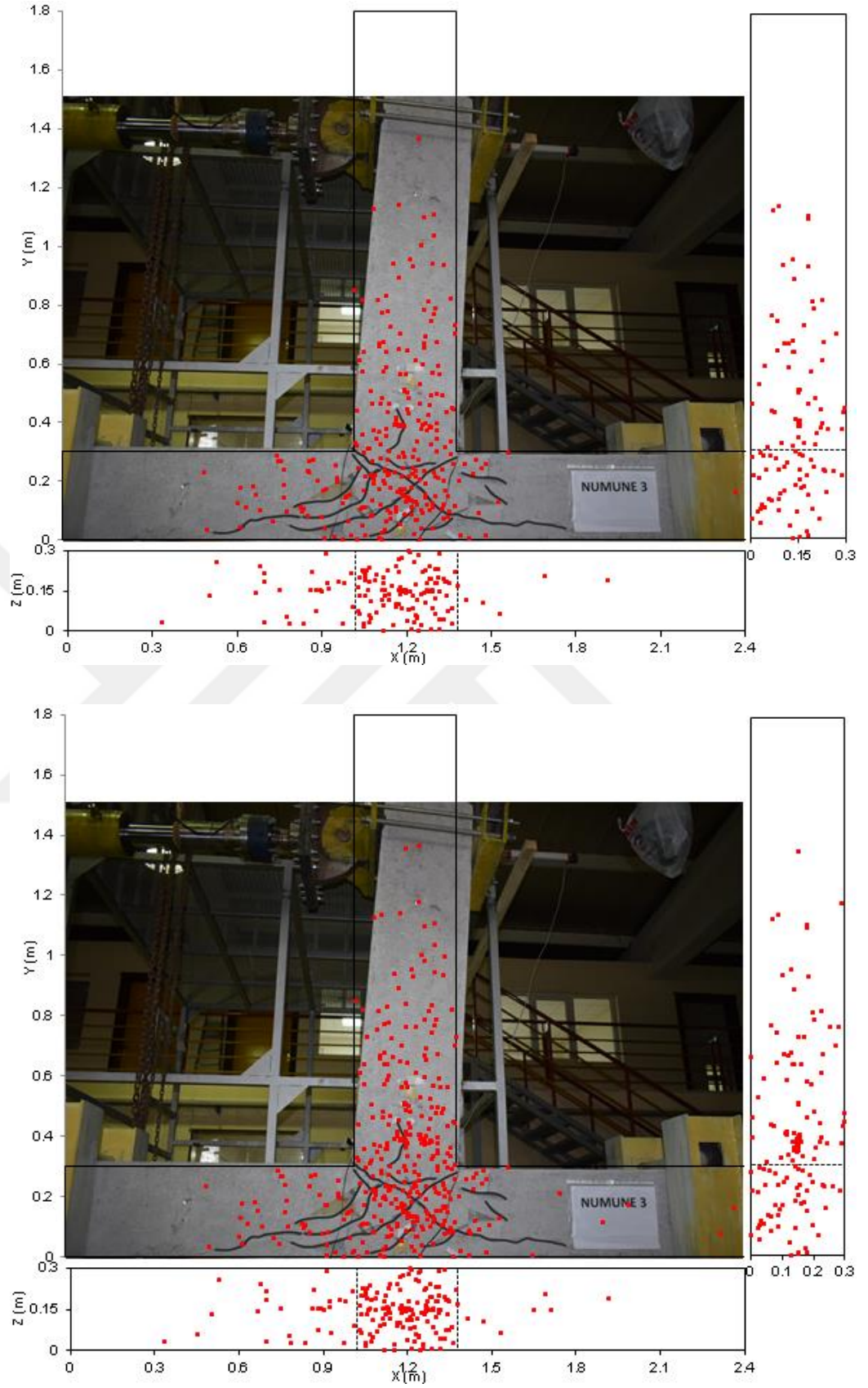


Şekil 4.10. Deney Elemanı-3'e ait AE parametre analizi bulguları

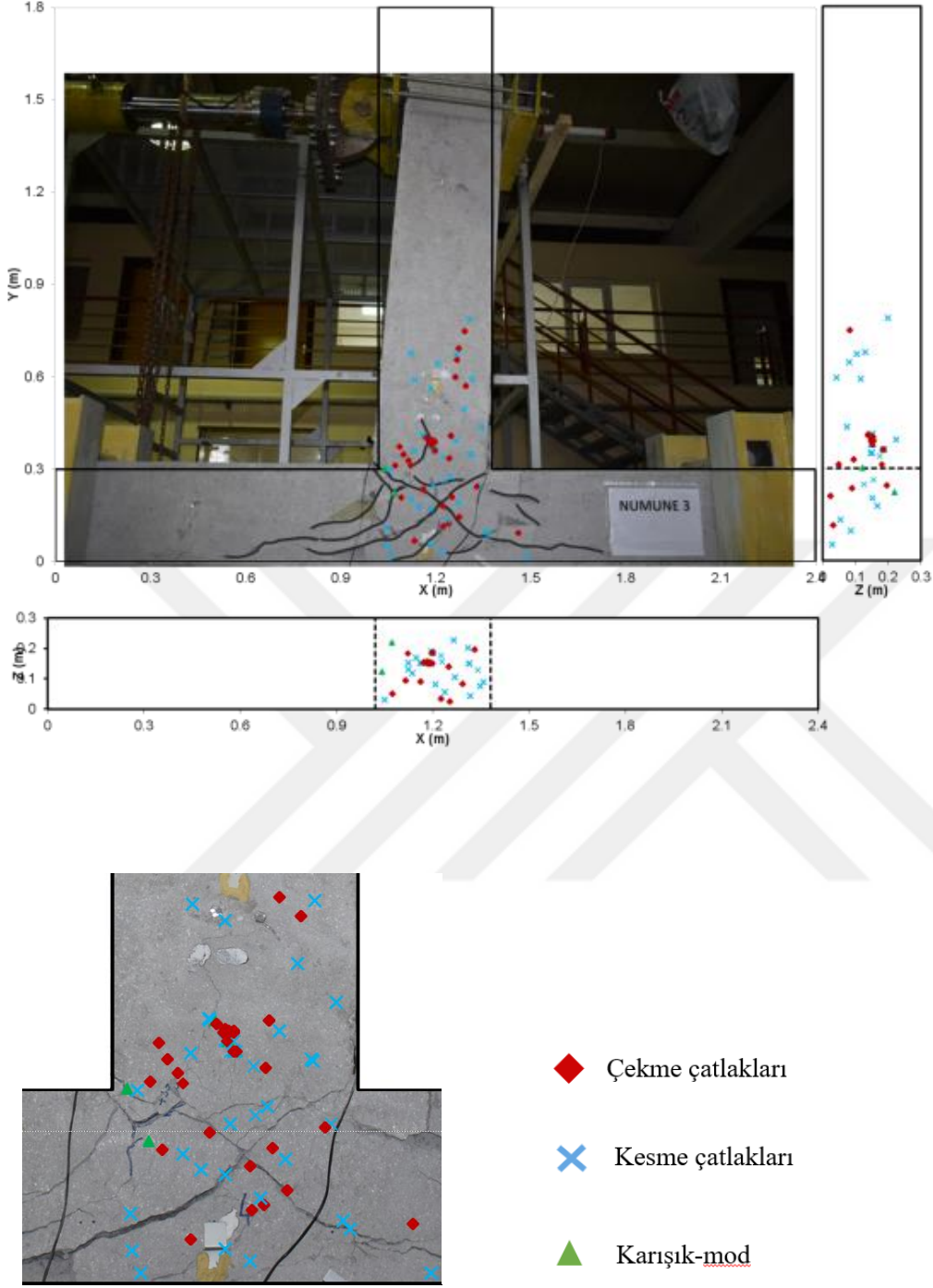
Deney Elemanı-3'ün AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'de verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği ileri 5. yük çevrimi, ilk kesme çatlaklarının gözlemlendiği geri 5. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 11. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.11. Deney Elemanı-3'ün ileri ve geri 5. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.12. Deney Elemanı-3'ün 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



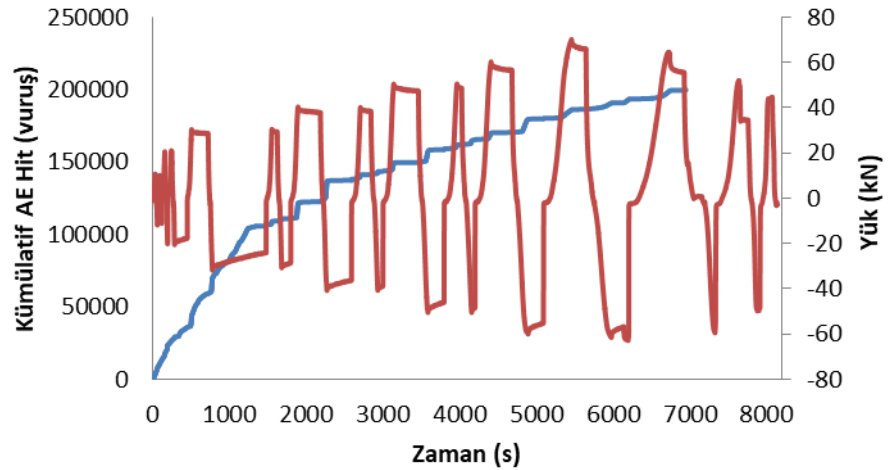
Şekil 4.13. Deney Elemanı-3'ün SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

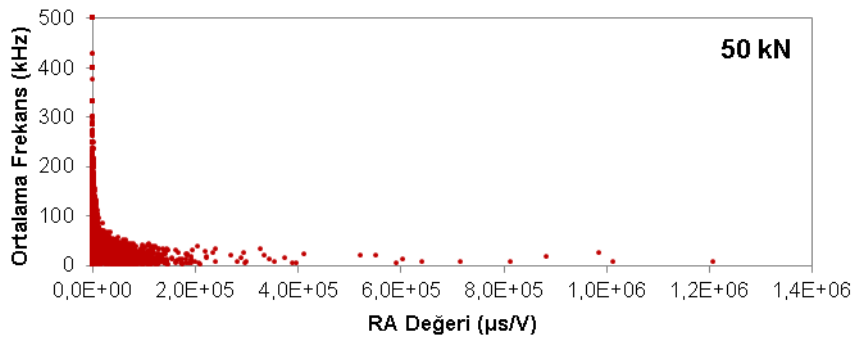
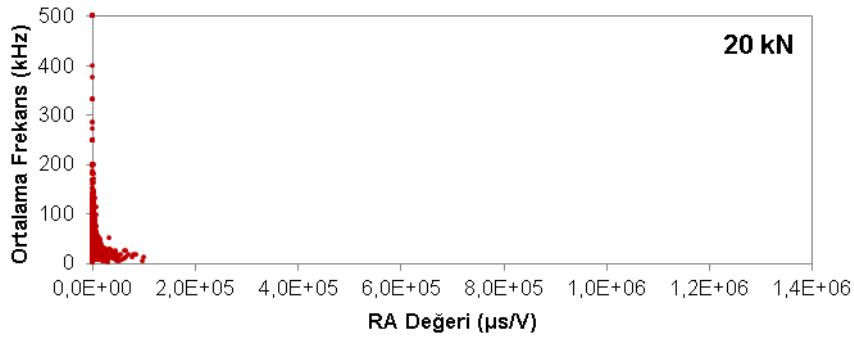
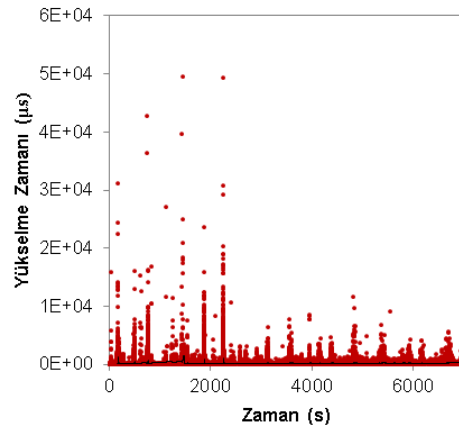
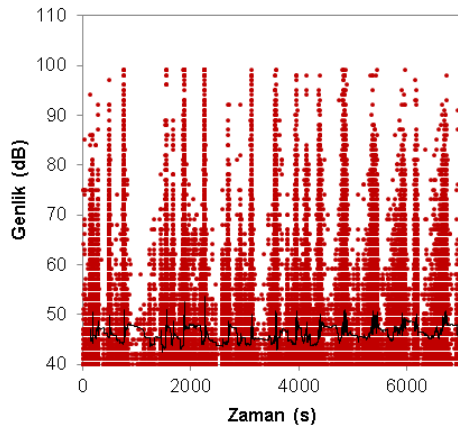
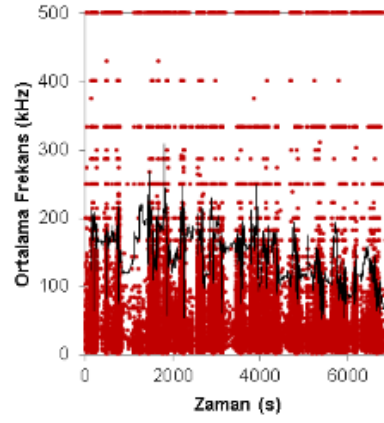
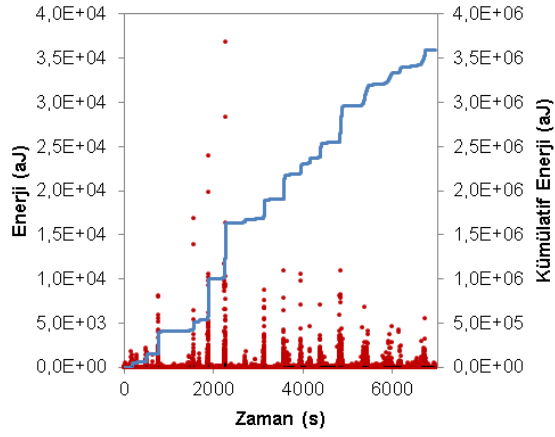
Deney Elemanı-3'ün kaynak konumlandırma analizi sonuçları ve SiGMA analizi sonuçları Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'de verilmiştir. Numunede düğüm noktasının güçsüz olması sebebiyle AE aktiviteleri bu bölgede oldukça çok sayıdadır. Her bir aktivitenin enerjisi de göz önüne alındığında daha büyük enerjili çatlakların olduğu gözlenmiştir. Kaynak konumlandırma sonuçlarından elde edilen aktivitelerle gözlenen çatlaklar arasında uyum vardır. Gözle görülen ilk

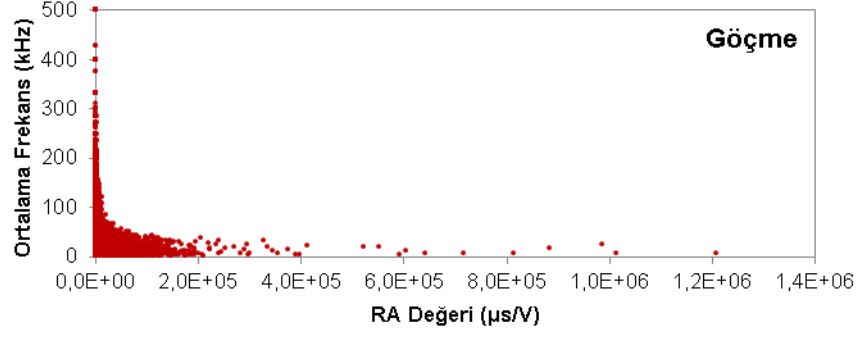
eğilme çatlakları AE ile de aynı lokasyonlarda elde edilmiştir. Düğüm noktasındaki kesme çatlakları sayısının fazlalığı gözlemlenen kesme çatlakları ile uyum içerisinde. Deney süresi boyunca düşük yük seviyelerinde çekme çatlakları oluşmaya başlamış ve ilerleyen yük seviyelerinde kesme çatlakları sayısı artmıştır.

4.2.4 Deney Elemanı-4

Deney Elemanı-4'ün AE enerjisi grafiği incelendiğinde (Şekil 4.14) kümülatif AE vuruşlarının 516. ve 1760. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. Kümülatif enerjinin ise 500. ve 1665. saniyelerde sıçramalı artışlar gösterdiği görülmektedir. Bu zamanlar deney elemanın -30 kN'un ilk çevrimi ve +30 kN'un ikinci çevrimine maruz bırakıldığı ve gözlenen ilk eğilme çatlağının ilerlediği anlardır. 2104. saniyede ise kümülatif enerjide yine bir artış söz konusudur. Bu durum deney sırasında -40 kN'un ilk çevriminde çıtırtıların da duyulduğu üzere CFRP'nin beton yüzeyinden sıyrılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bahsedilen bu sürelerde ortalama frekansın hareketli ortalamasında ani düşüşler gözlenmiş olup, yükselme zamanları ise artmıştır. Deney boyunca ise ortalama frekansın hareketli ortalama eğrisinin düşüş eğiliminde olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum ortalama frekans-RA değeri dağılımında ilerleyen yük seviyelerinde RA değerlerinin artmasıyla CFRP'nin de yüzeyden ayrılması ile kesme çatlaklarının arttığını kanıtlar niteliktedir.

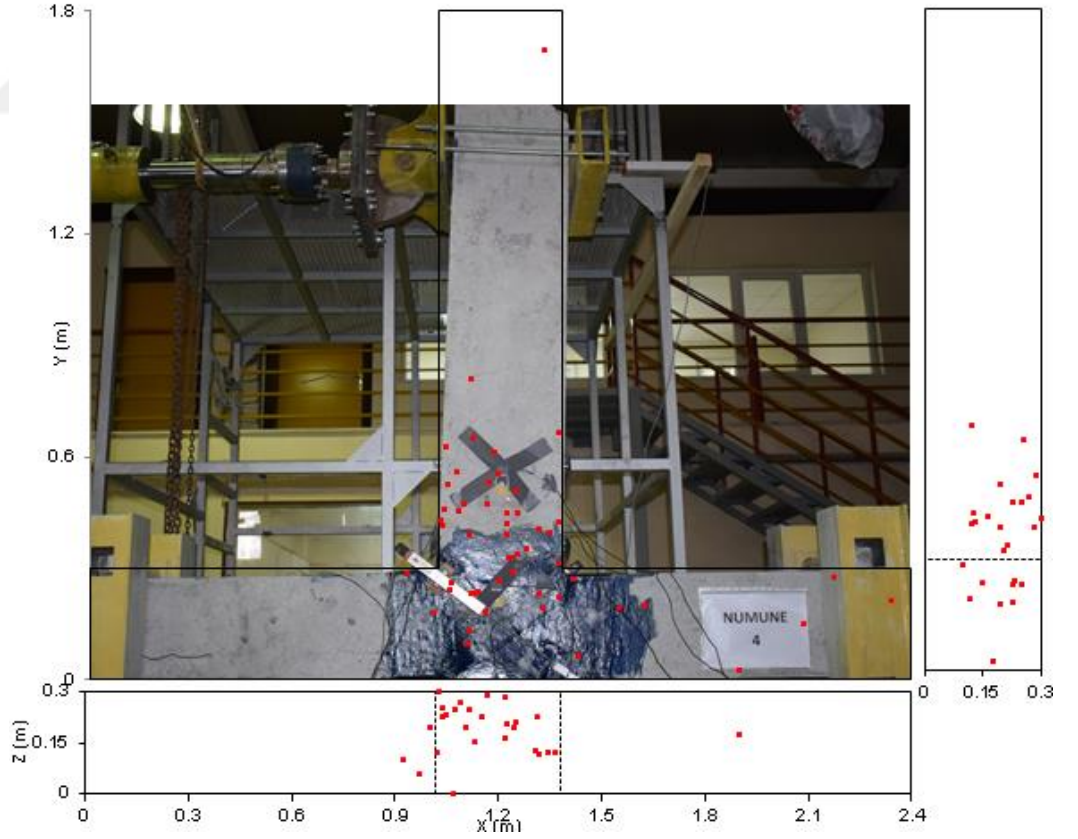


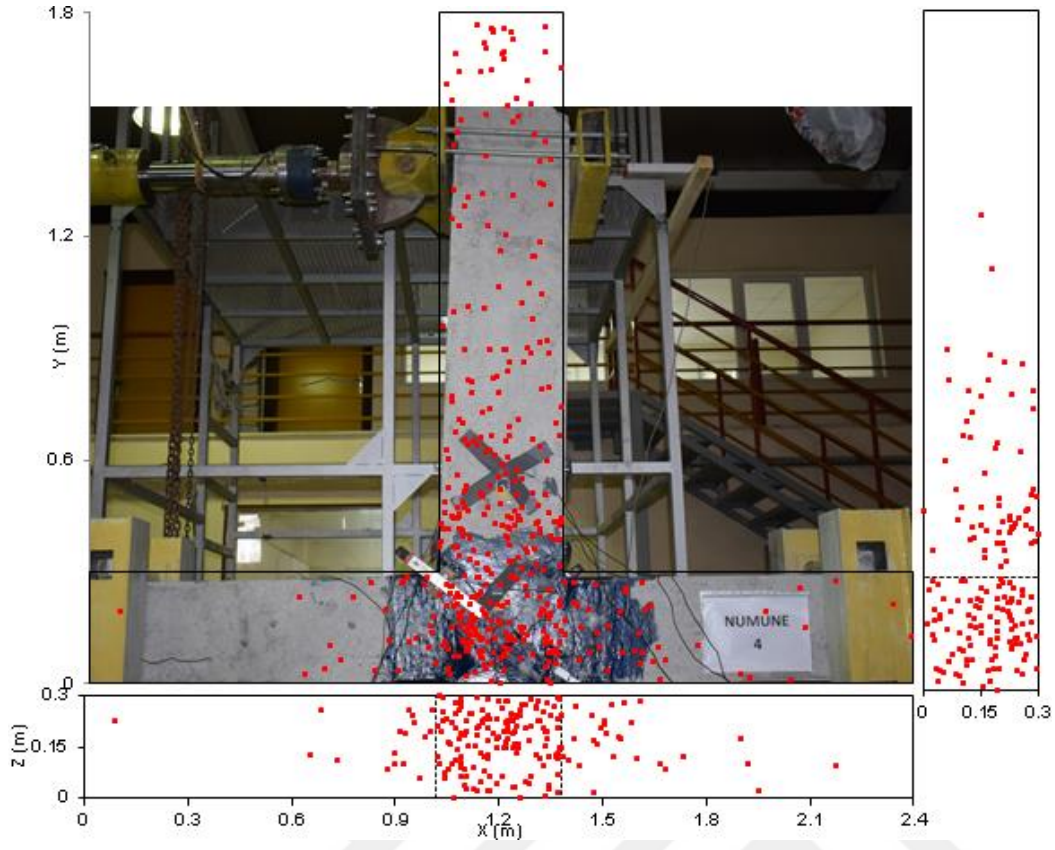




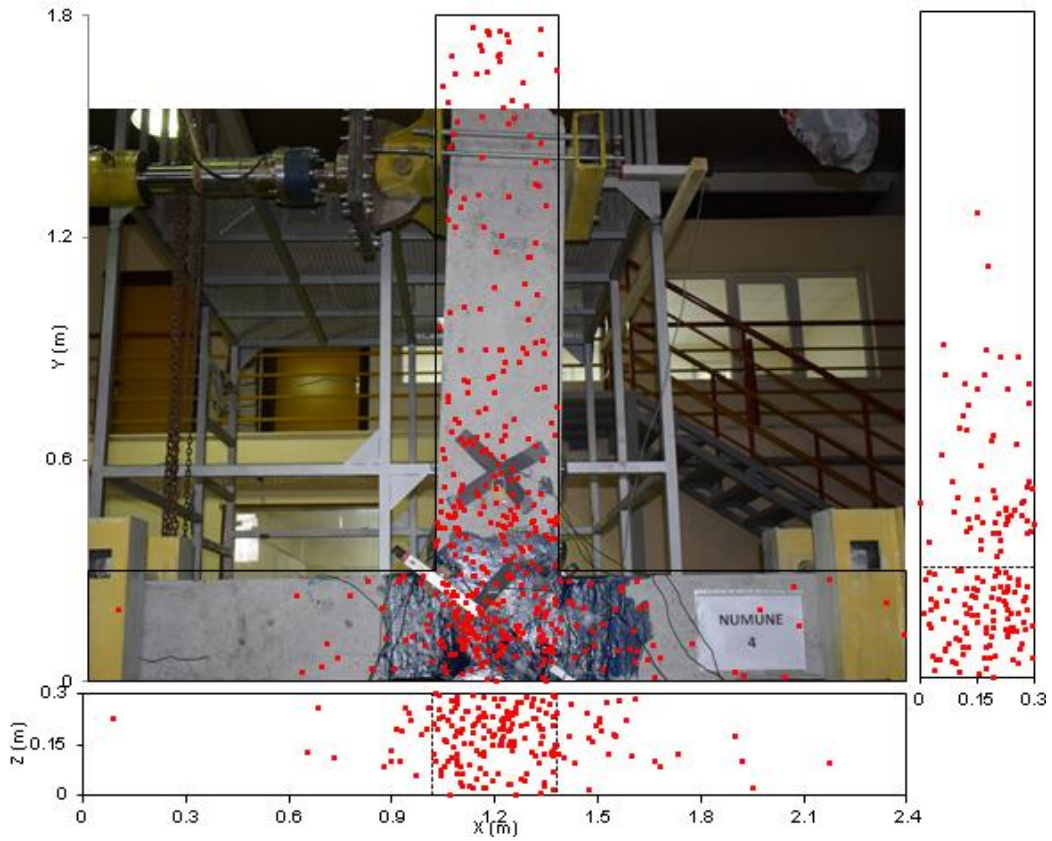
Şekil 4.14.Deney Elemanı-4'e ait AE parametre analizi bulguları

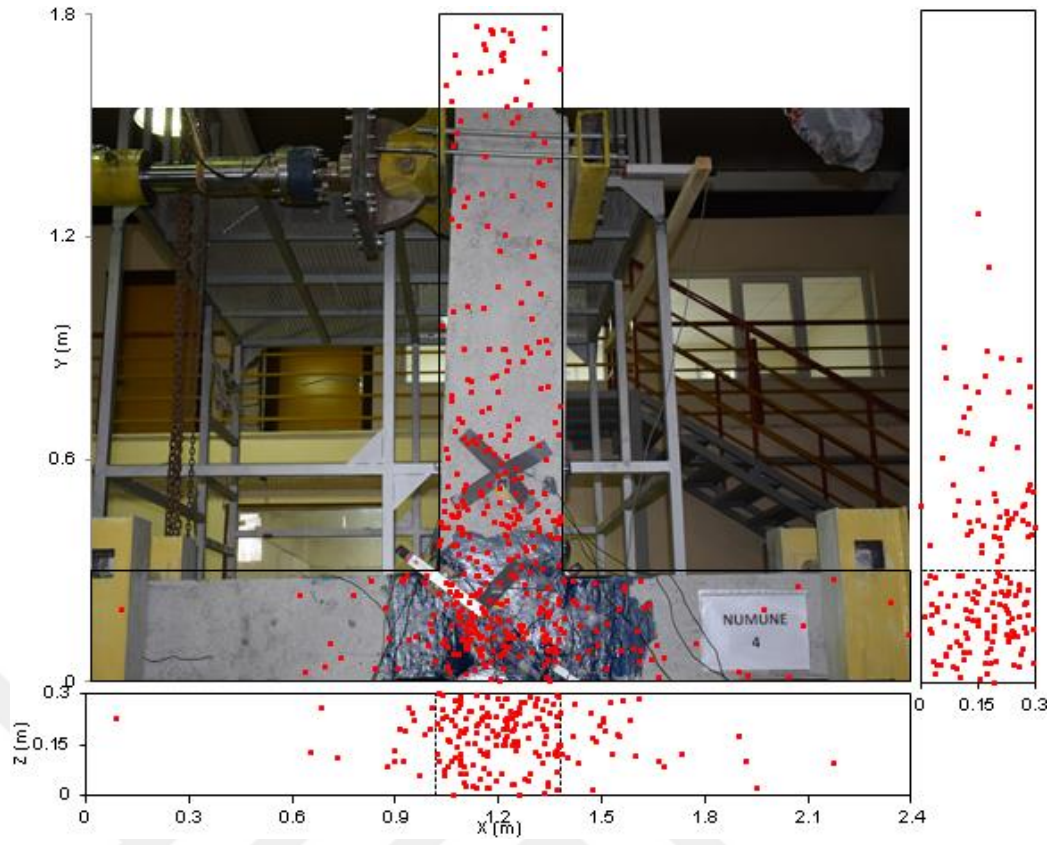
Deney Elemanı-4'ün AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17'de verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlağının gözlemlendiği 4. yük çevrimi, CFRP malzemenin betondan ayrıldığı 9. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 11. yük çevrimi ve göçme durumu.



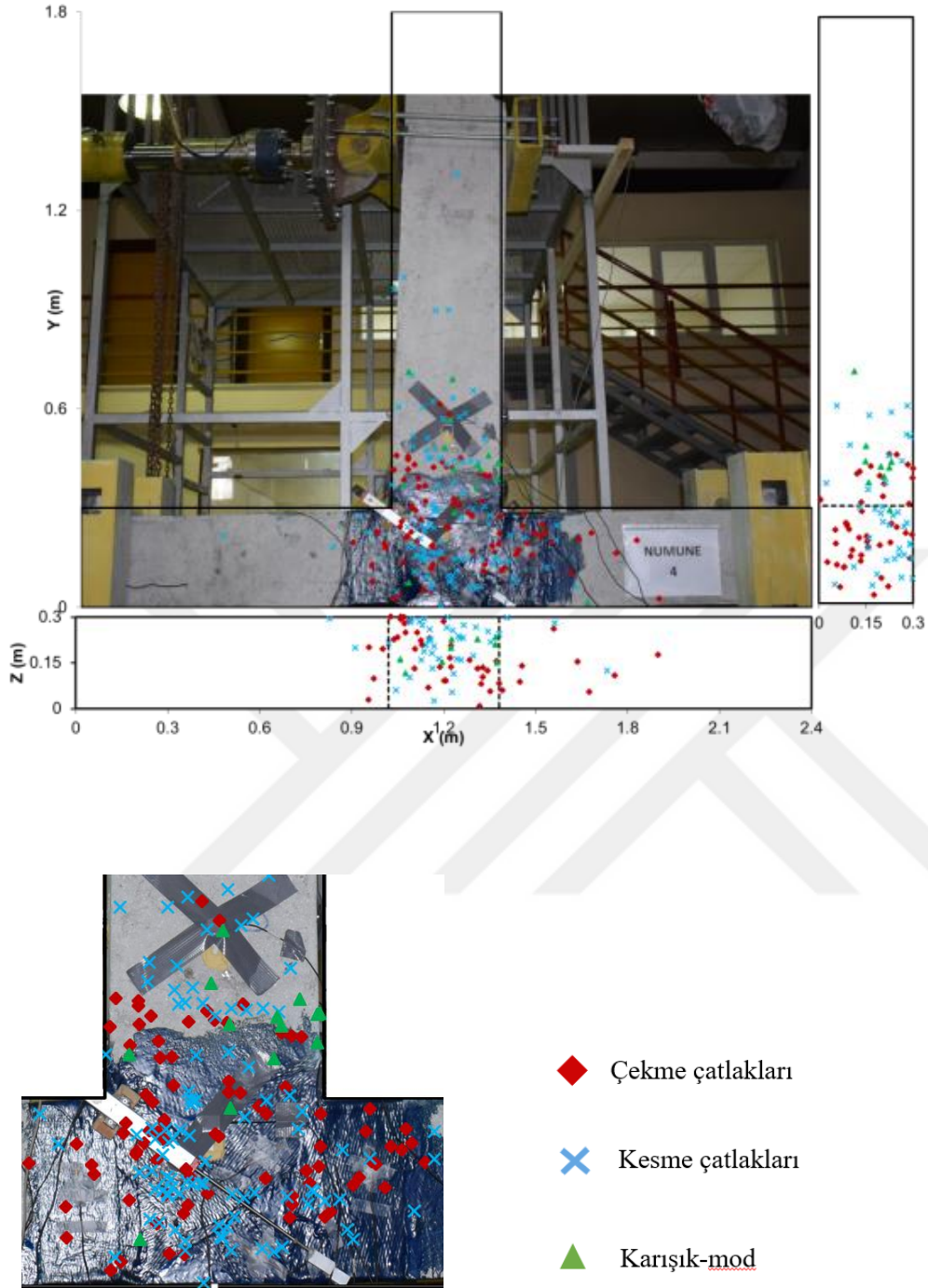


Şekil 4.15. Deney Elemanı-4'ün 4. ve 9. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları





Şekil 4.16. Deney Elemanı-4'ün 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



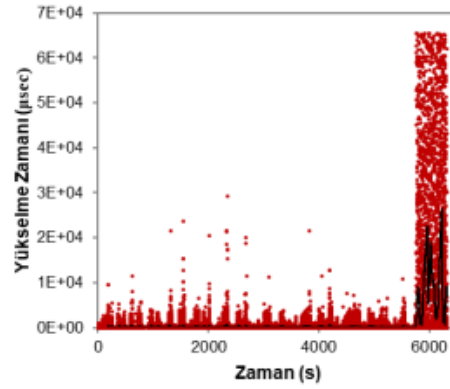
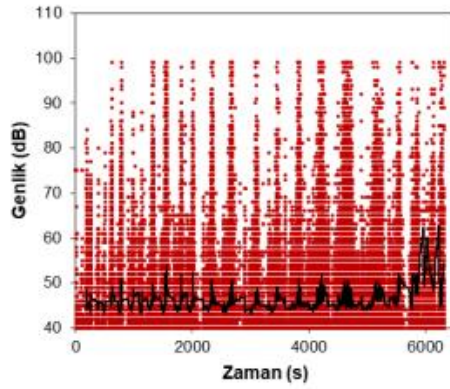
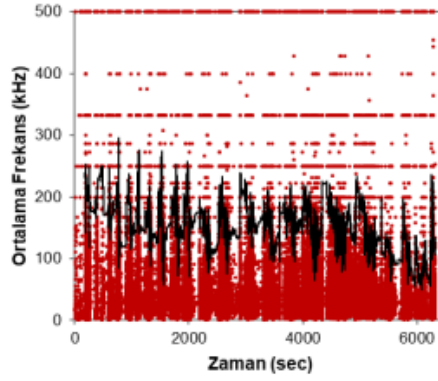
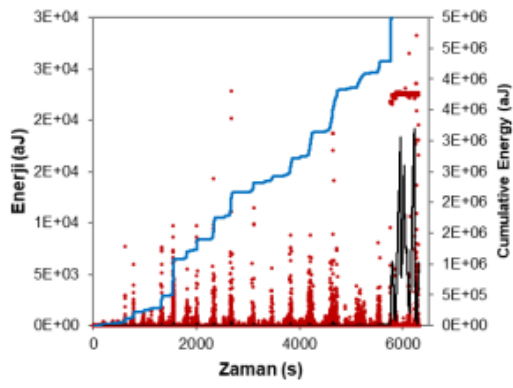
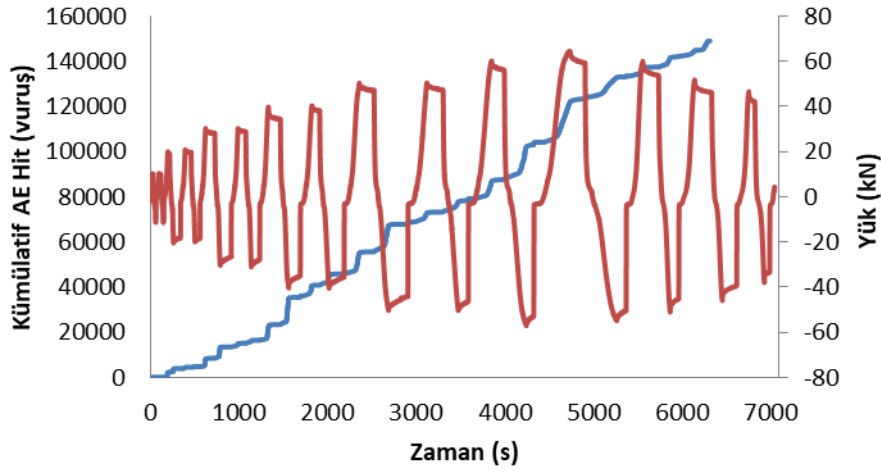
Şekil 4.17. Deney Elemanı-4'ün SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

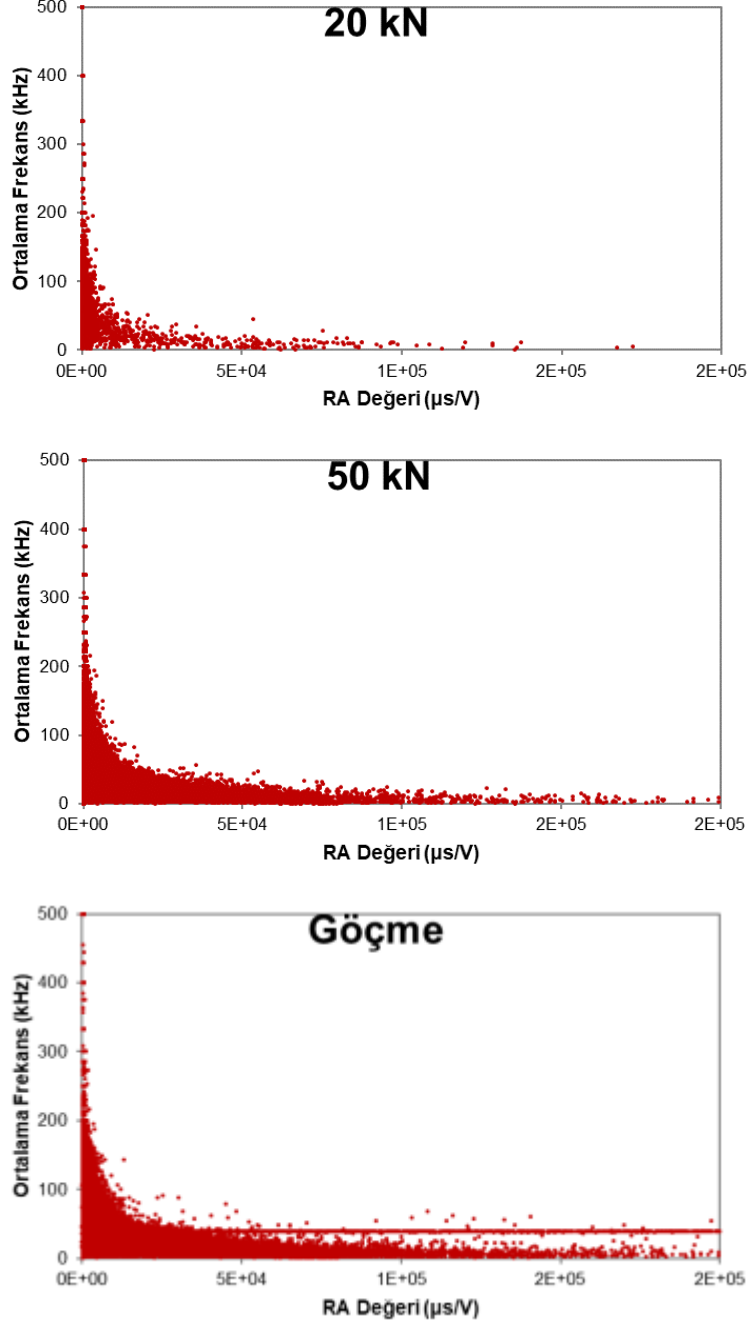
Deney Elemanı-4'ün kaynak konumlandırma analizi sonuçları ve SiGMA analizi sonuçları Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17'de verilmiştir. Düşük yük seviyelerinde CFRP sargının da çalışması ile birlikte düğüm noktası daha rijit davranmış ve ilk AE aktiviteleri kirişte görülmüştür. Bu çatlaklar çekme niteliğindeki çatlaklardır. Yükün artması ile birlikte hem kiriş ve hem de düğüm noktasında çatlak sayıları artmıştır. İleri yük seviyelerinde çatlaklar kesme çatlaklarına dönüşürken, yükün

daha da artmasıyla beton ve CFRP arasındaki çekme gerilmelerinin artması çekme niteliğindeki aktivitelerin artmasına sebep olmuştur. Dügüm noktasında ileri yük seviyelerinde gözlenen çekme çatlakları bu sebeptendir. Bağlantının göbek betonunda oluşan kesme çatlakları daha düşük yük seviyelerinde mikro düzeylerde iken CFRP'nin ayrılmasıyla mezo ve makro düzeyde aktiviteler oluşmuştur. SiGMA analizi sonuçlarında, kaynak konumlandırma sonuçlarından elde edilen kirişteki aktivitelerin görülmemesinin sebebi aşağıda bulunan sensörlere bilginin sönümlenmeden dolayı gelememesinden kaynaklanmaktadır. Zira SiGMA analizleri 8 sensöre aynı anda gelen veriler kullanılarak yapılmaktadır.

4.2.5 Deney Elemanı-5

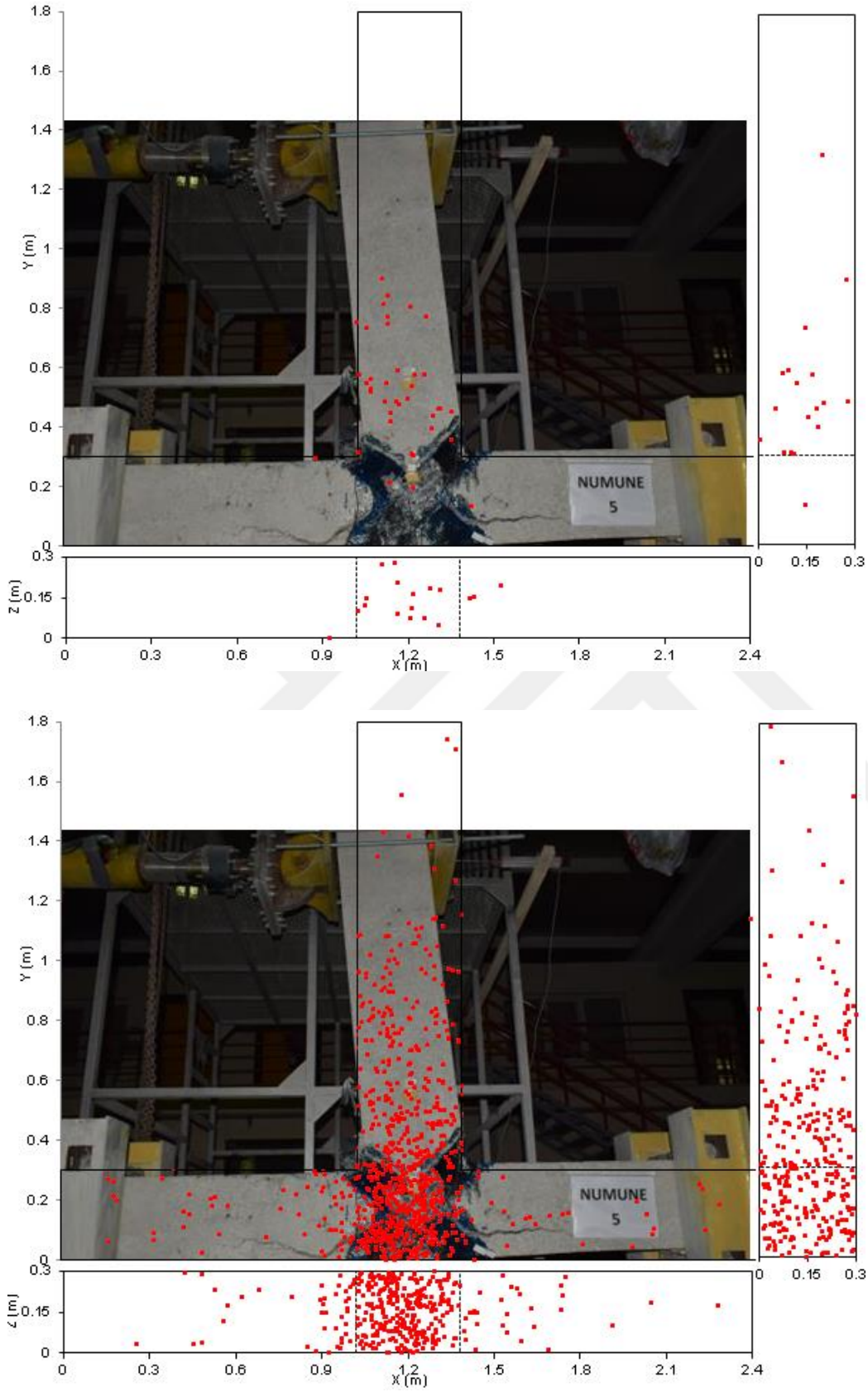
Deney Elemanı 5'e ait zamana bağlı AE enerjisi grafiği incelendiğinde (Şekil 4.18) kümülatif AE vuruşlarının 1548. saniyede ani olarak arttığı görülmektedir. Kümülatif AE enerjisinin ise 965. ve 1492. saniyelerde sıçramalı artışlar gösterdiği görülmektedir. Bu zamanlar deney elemanın +30 kN'un ikinci çevrimi ve +40 kN'un ilk çevrimine maruz bırakıldığı ve sırasıyla eğilme çatlağının ilerlediği ve kolon alt yüzünde ilk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği anlarda meydana gelmişlerdir. 2357. saniyede ise kümülatif AE enerjisinde yine bir artış söz konusudur. Bu durum deney sırasında +50 kN'un ilk çevriminde CFRP'nin beton yüzeyinden sıyrıldığı anlarda meydana gelmiştir. Ayrıca, bahsedilen bu sürelerde yükselme zamanı artmıştır. Deney boyunca, ortalama frekansın hareketli ortalama eğrisinin düşüş eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu durum ortalama frekans-RA değeri dağılımında ilerleyen yük seviyelerinde RA değerlerinin artmasıyla CFRP'nin de yüzeyden ayrılması ile kesme çatlaklarının arttığını kanıtlar niteliktedir.



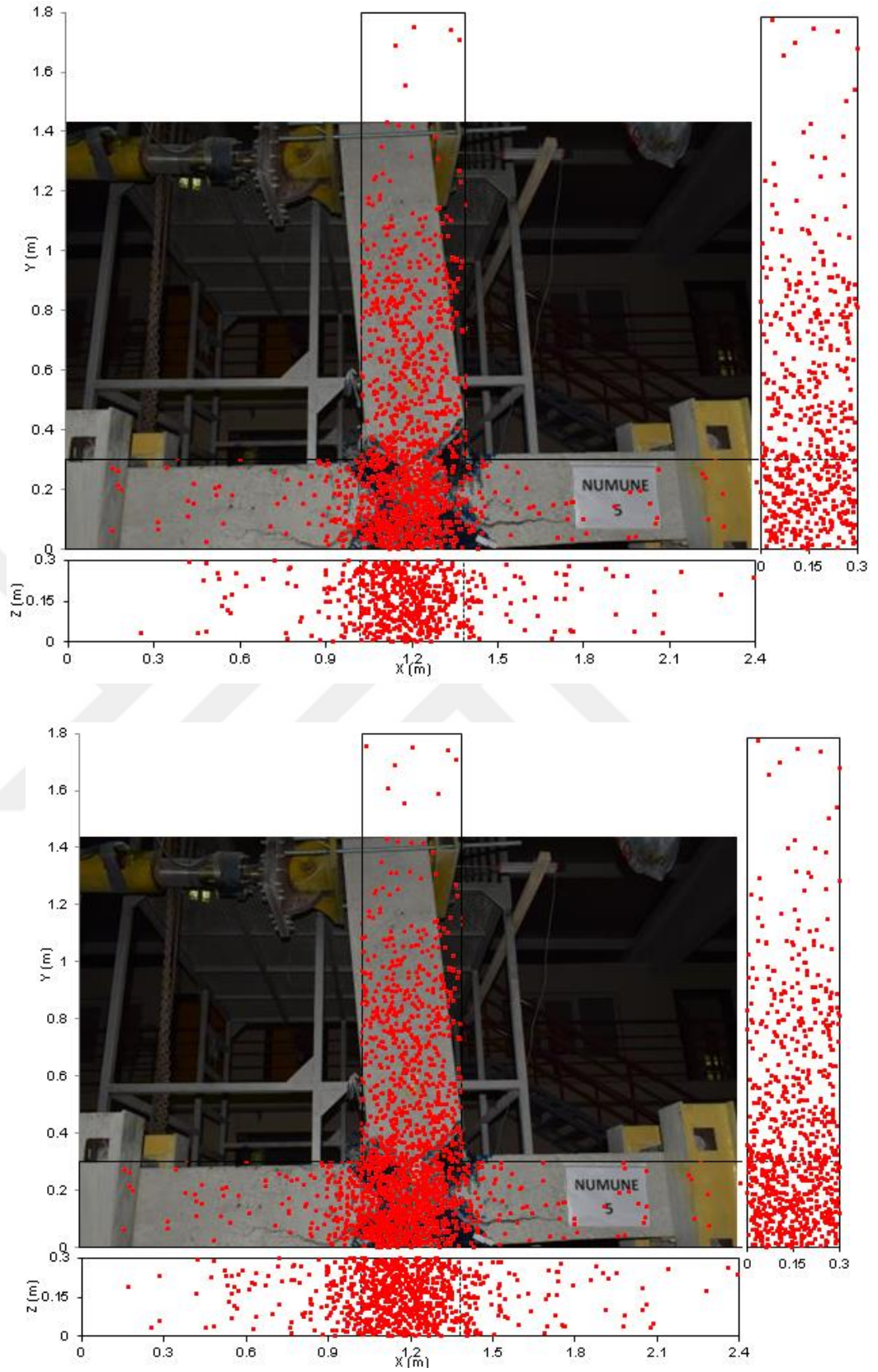


Şekil 4.18. Deney Elemanı-5'e ait AE parametre analizi bulguları

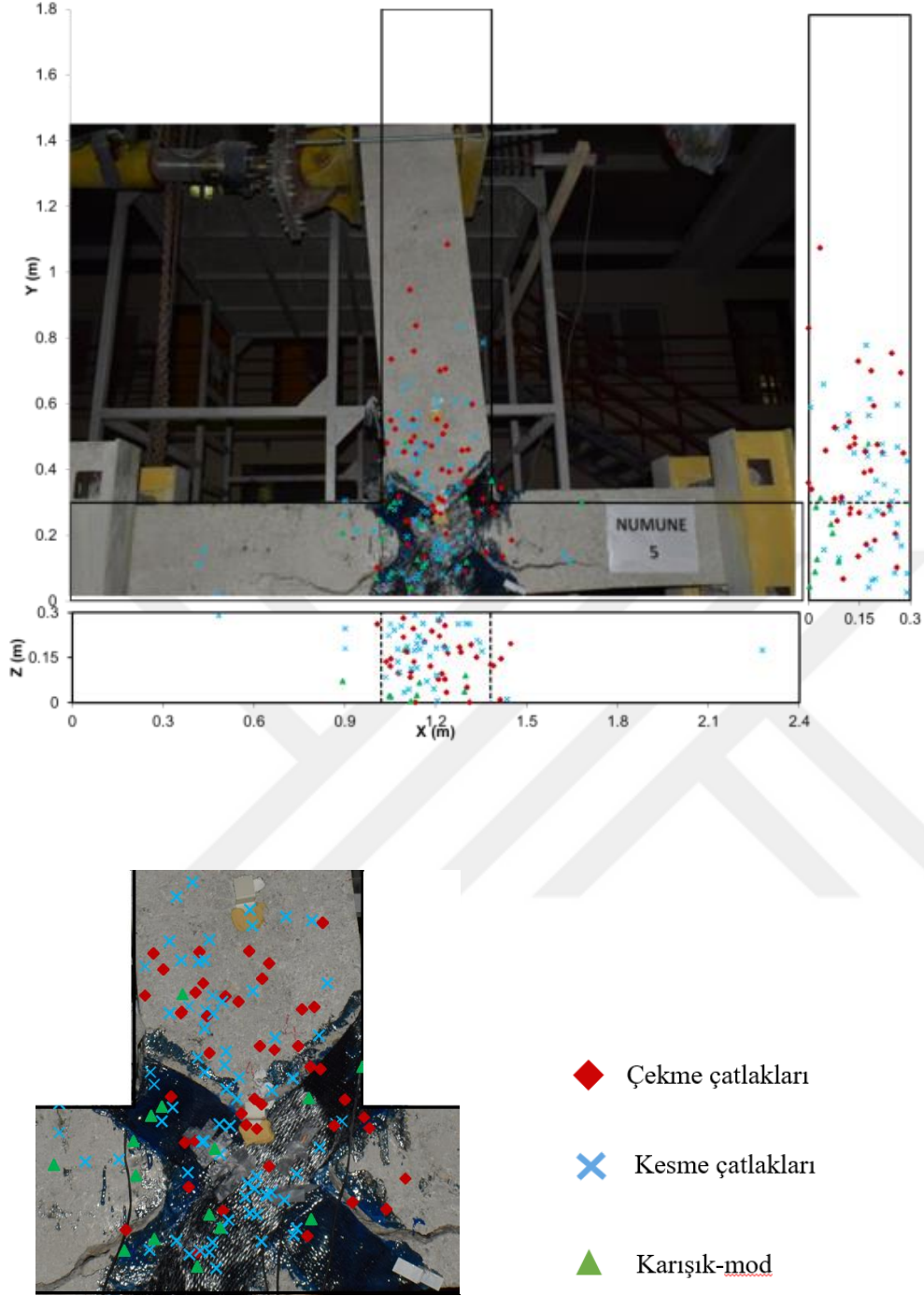
Deney Elemanı-5'in AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'de verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği 3. yük çevrimi, ilk kesme çatlaklarının gözlemlendiği 8. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 11. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.19. Deney Elemanı-5'in 3. ve 8. Yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.20. Deney Elemanı-5'in 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



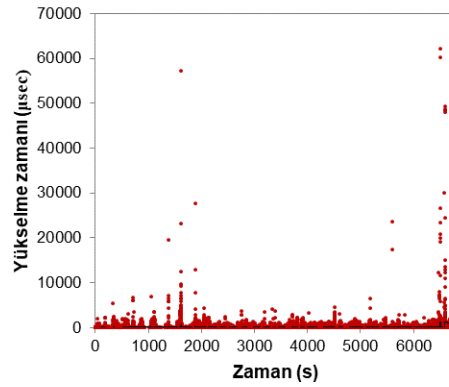
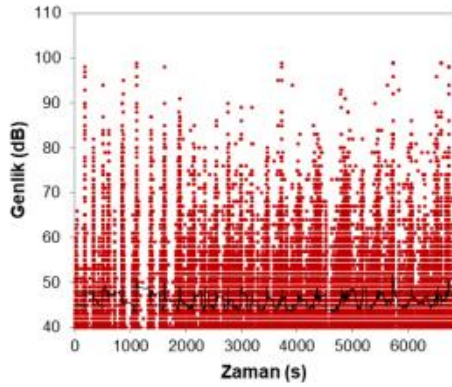
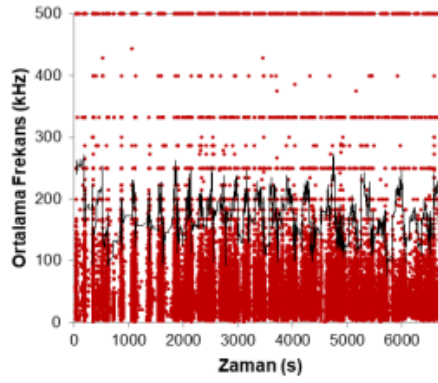
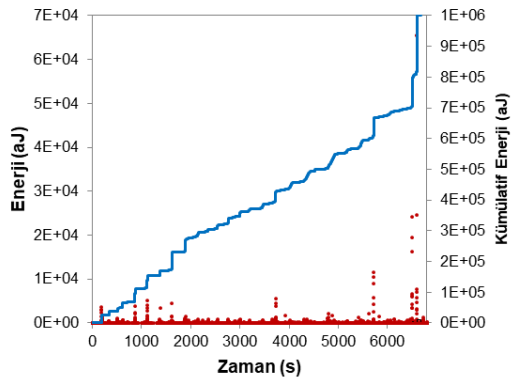
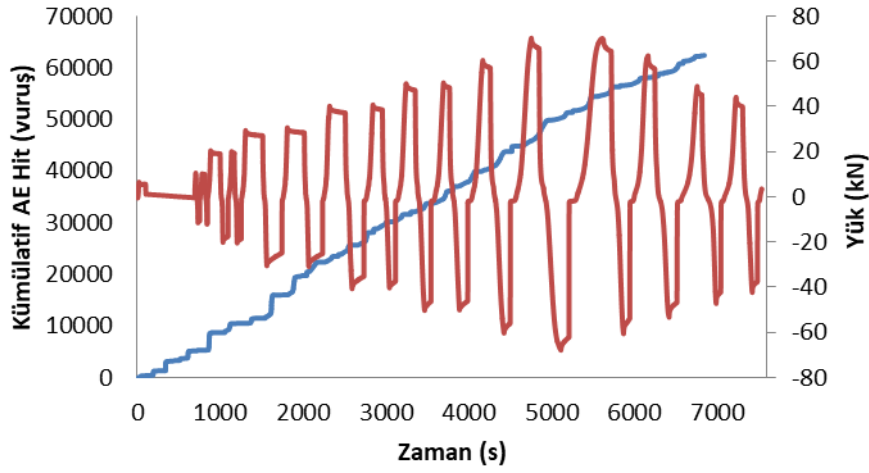
Şekil 4.21. Deney Elemanı-5'in SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

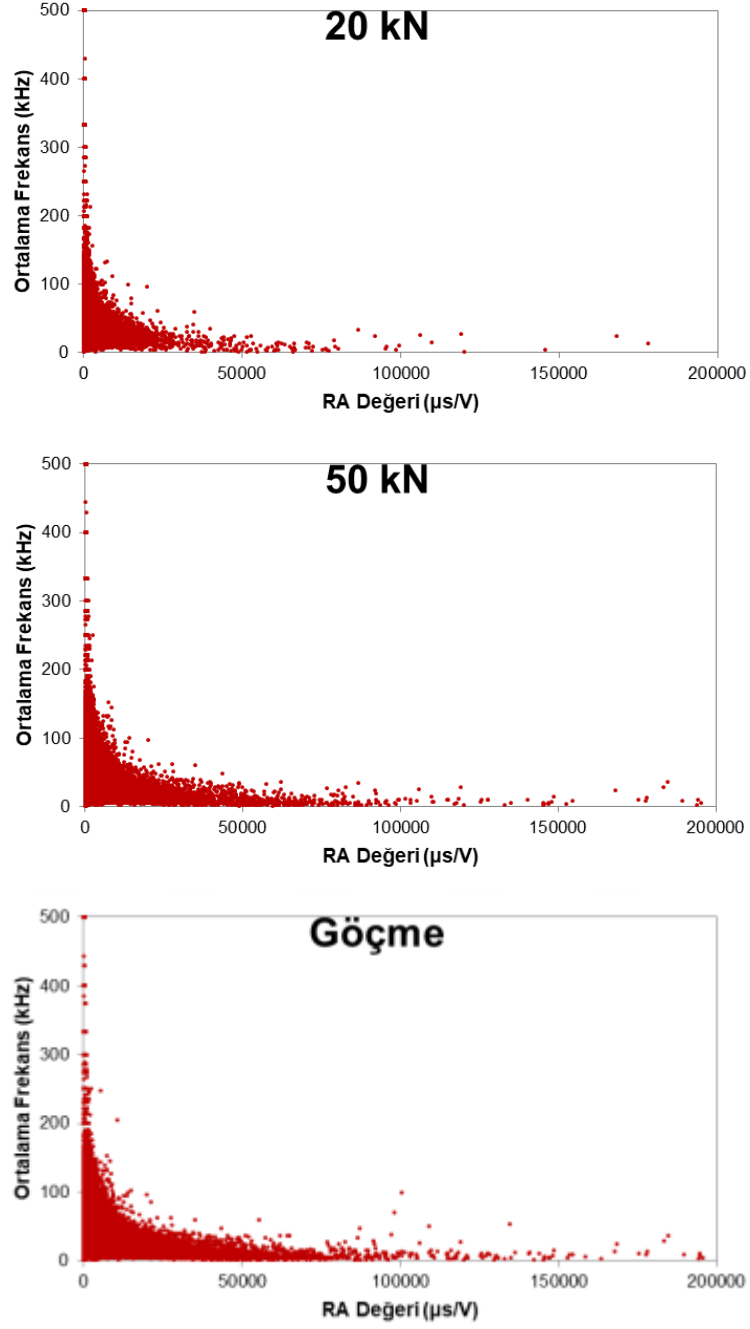
Deney Elemanı-5'in kaynak konumlandırma analizi sonuçları ve SiGMA analizi sonuçları Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'de verilmiştir. Deney Elemanı-4'e benzer olarak düşük yük seviyelerinde CFRP sargının da çalışması ile birlikte düğüm noktası daha rijit davranmış ve ilk AE aktiviteleri kirişte görülmüştür. Bu çatlaklar çekme niteliğindeki çatlaklardır. Yükün artması ile birlikte hem kiriş ve hem de düğüm noktasında çatlak sayıları artmıştır. İleri yük seviyelerinde

çatlaklar kesme çatlaklarına dönüşürken, yükün daha da artmasıyla beton ve CFRP arasındaki çekme gerilmelerinin artması çekme niteliğindeki aktivitelerin artmasına sebep olmuştur. Düğüm noktasında ileri yük seviyelerinde gözlenen çekme çatlakları bu sebeptendir. Bağlantının göbek betonunda oluşan kesme çatlakları daha düşük yük seviyelerinde mikro düzeylerde iken CFRP'nin ayrılmasıyla mezo ve makro düzeyde aktiviteler oluşmuştur. 11. Yük çevrimi sonrasında CFRP'nin de kopmasıyla birlikte düğüm noktasında kesme çatlakları artmıştır. Deney Elemanı-4 ile kıyaslandığında CFRP sargının kolonda devam etmemesi çatlakların hızlı bir şekilde ilerlemesine sebep olmuştur. Daha önceki çalışmalardan da tecrübe edilmiştir ki betonda oluşan çatlak CFRP'ye ulaştığında ilerleyememesi sebebiyle çok sayıda mikro çatlak oluşumuna sebep olmakta ve elemanın davranışı da daha sünek olmaktadır. Fakat bu elemanda olduğu gibi CFRP'nin çalışmamaya başladığı andan itibaren çok sayıda makro düzeyde çatlak görülmüştür. Yine CFRP liflerin kopması da ayrıca birer AE aktivitesidir.

4.2.6 Deney Elemanı-6

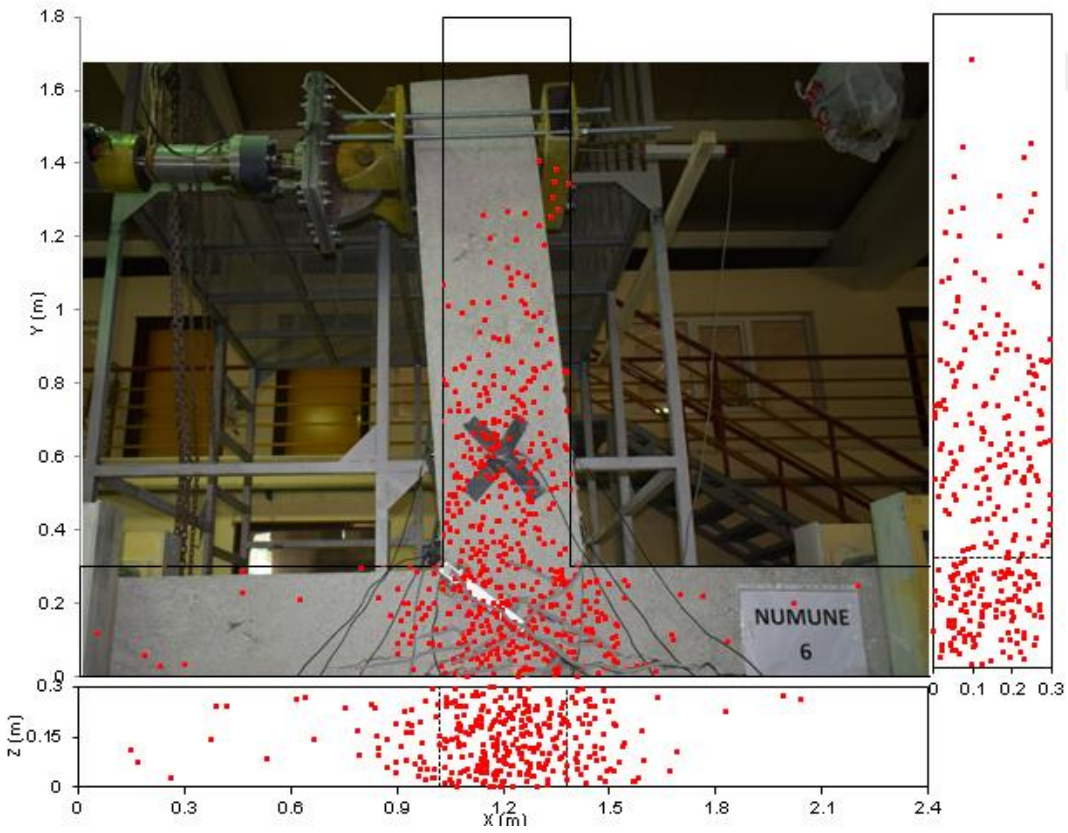
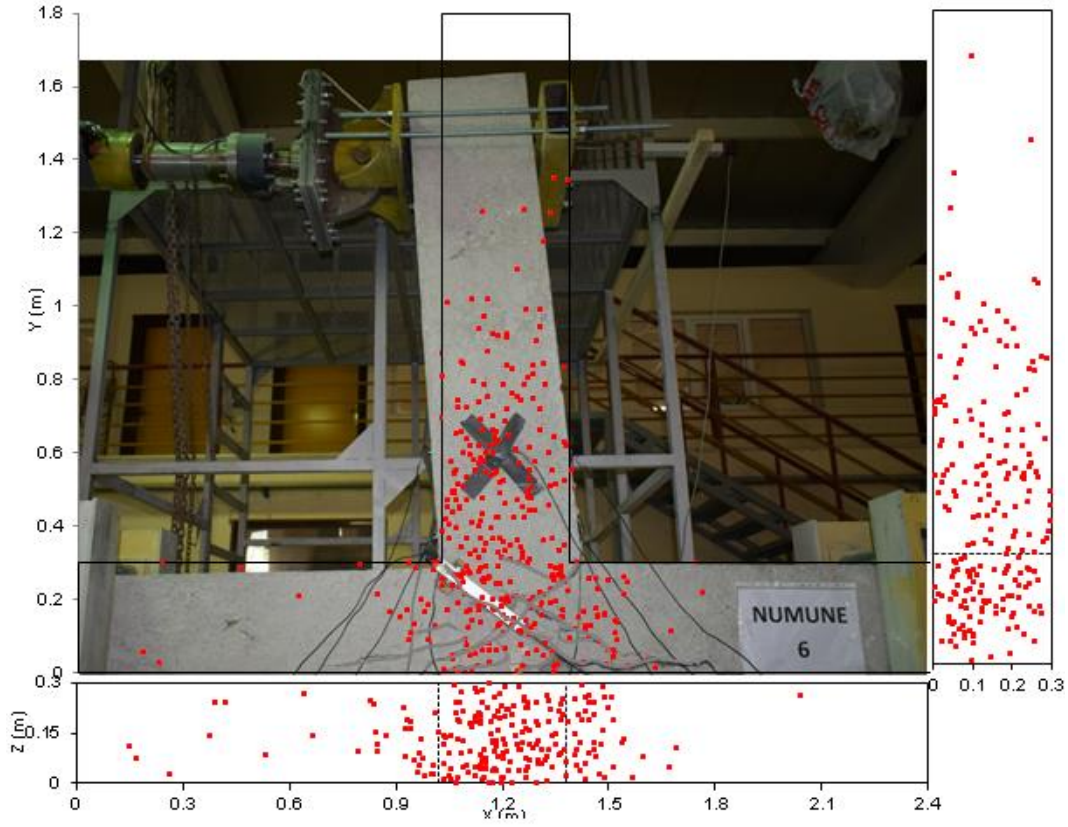
Deney Elemanı-6'nın AE aktiviteleri incelendiğinde (Şekil 4.22) kümülatif AE vuruşlarının 868. ve 1621. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. Kümülatif AE enerjisinin ise 868., 1622. ve 5722. saniyelerde aniden arttığı görülmektedir. Bu ani artışlar deney elemanının 3. çevrim (+20 kN'un ilk çevrimi), 5. çevrime (-30 kN'un ilk çevrimi) ve 13. çevrime (+80 kN'un ilk çevrimi) maruz kaldığı ve sırasıyla ilk çatlakların gözlemlendiği, ilk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği anlarda meydana gelmişlerdir. Ayrıca tüm deney boyunca maksimum genlik olan 99 dB, +20 kN'un ikinci çevriminde (1116. saniye) elde edilmiştir. AE hitlerine ait yükselme zamanı dağılımında 1375., 1617. ve 1883. saniyeler arasında yüksek değerler göze çarpmaktadır. Bu süreler boyunca (6. çevrime kadar) deney elemanında çok sayıda çatlak gözlenmiş ve mevcut çatlaklar ilerlemeye devam etmiştir. Ortalama frekans ve RA değeri ilişkileri incelendiğinde, deney elemanında ileri yük seviyelerinde yüksek RA değerli hitler meydana geldiği görülmektedir. Bu durum yükün artmasıyla elemanda kesme çatlaklarının arttığını göstermekte ve deney sırasında gözlenen diyagonal çatlaklar ile de uyum teşkil etmektedir.



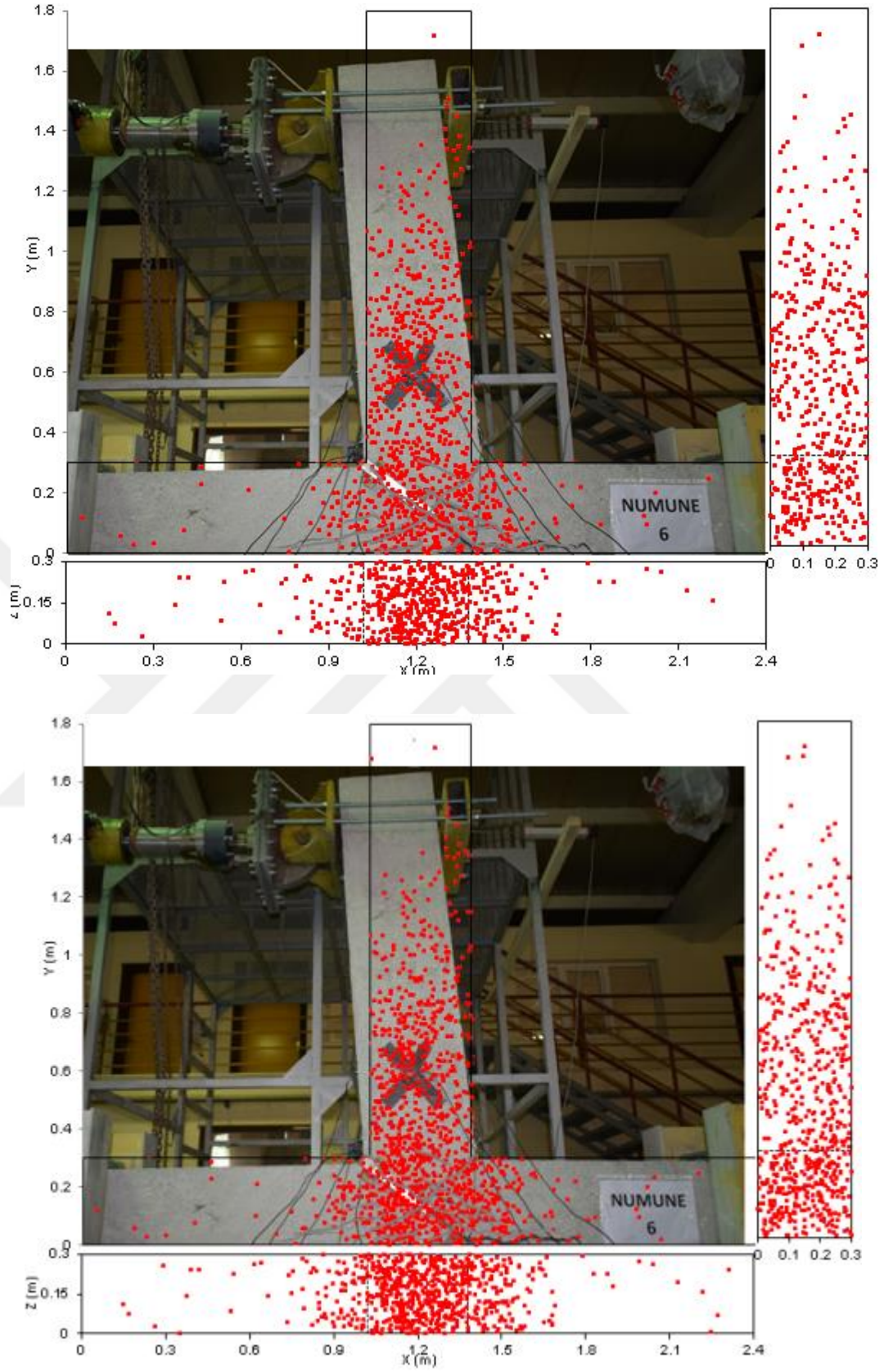


Şekil 4.22.Deney Elemanı-6'ya ait AE parametre analizi bulguları

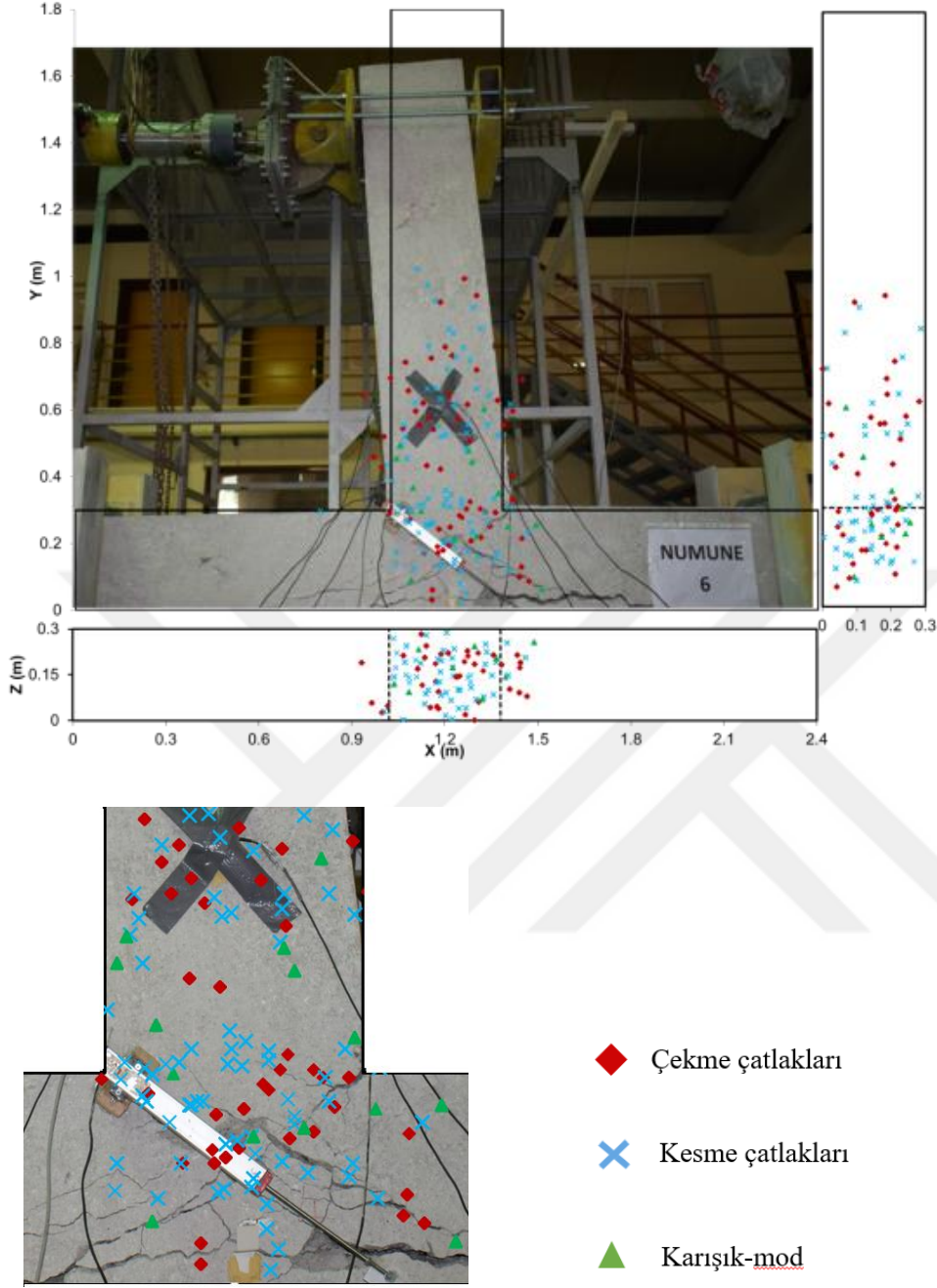
Deney Elemanı-6'nın AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'de verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlağının gözlemlendiği 5. yük çevrimi, ilk kesme çatlağının gözlemlendiği 7. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 11. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.23. Deney Elemanı-6'nın 5. ve 7. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.24. Deney Elemanı-6'nın 11. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



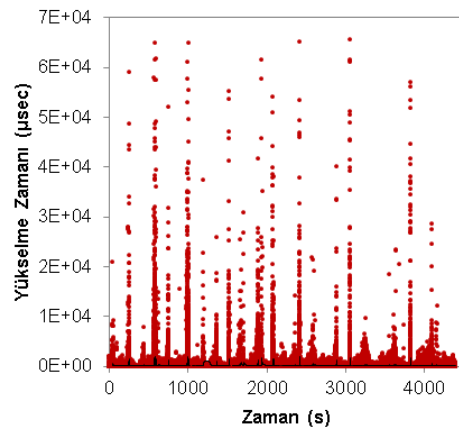
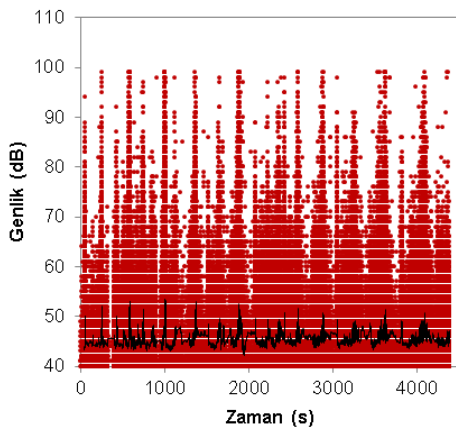
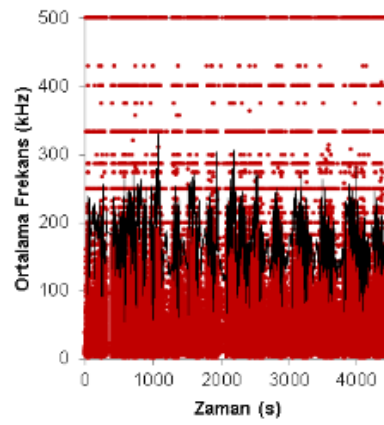
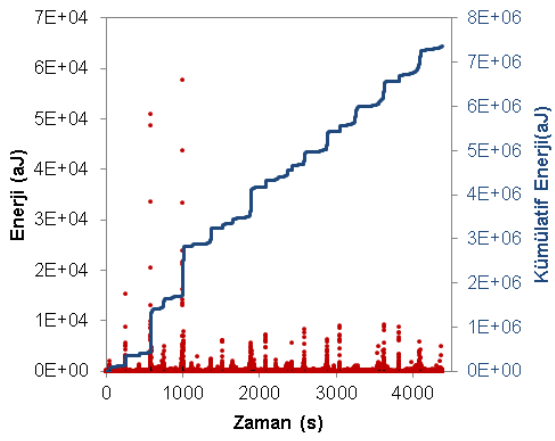
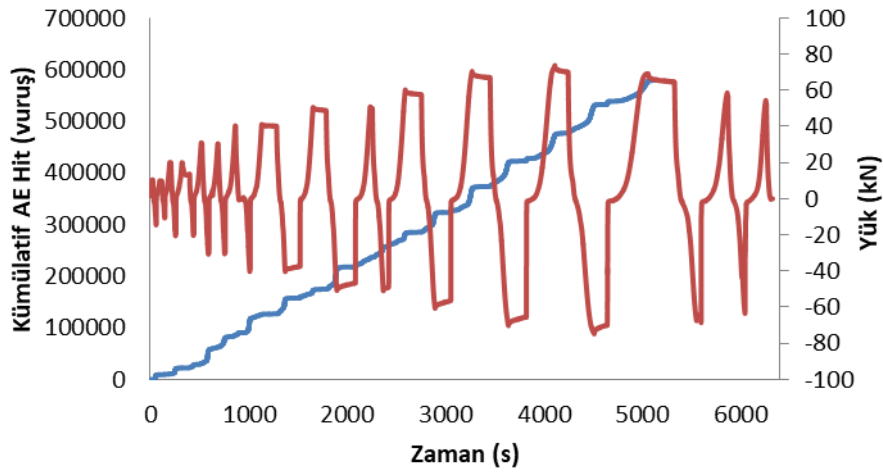
Şekil 4.25. Deney Elemanı-6'nın SIGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

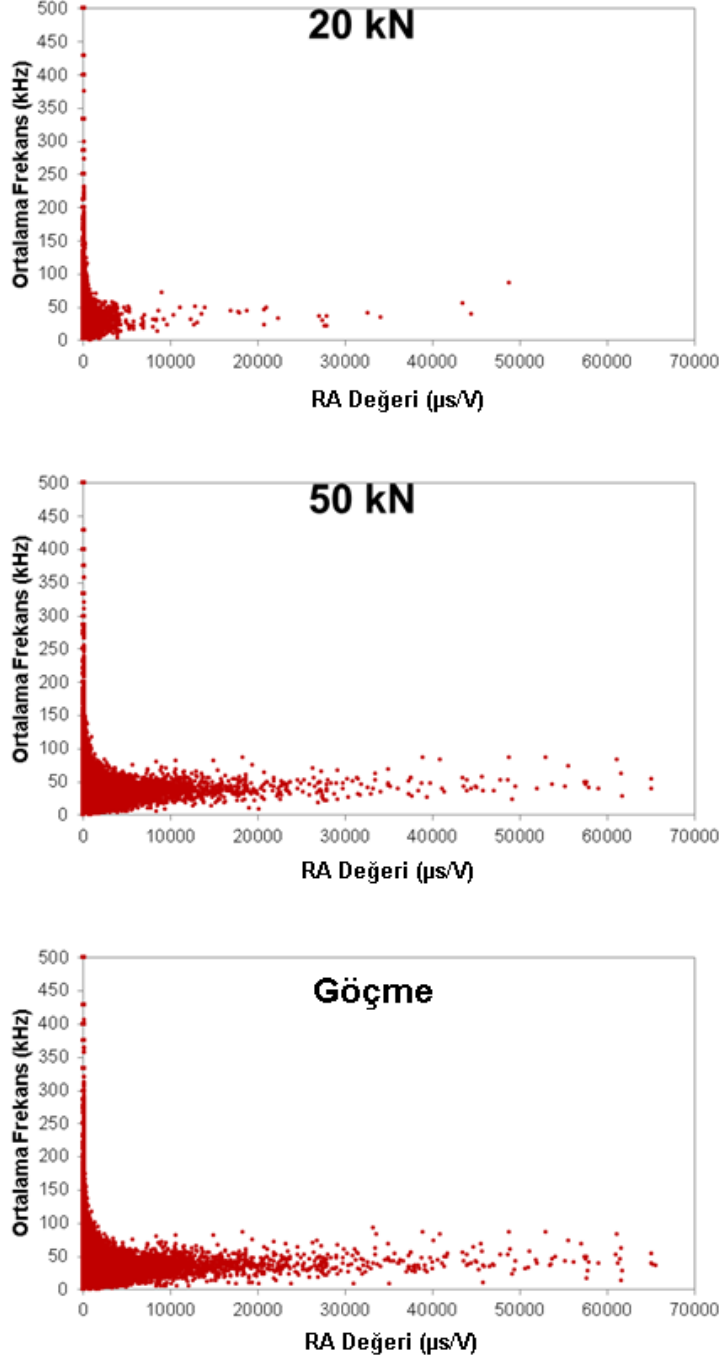
AE kaynak konumlandırma sonuçları incelendiğinde Deney Elemanı-6'da düşük yük seviyelerinde hem kirişte ve hem de düğüm noktasında AE aktiviteleri görülmektedir. İlerleyen yüklerde düğüm noktasında aktiviteler artmıştır. AE sonuçlarına bakıldığında çapraz firkete donatı ile düğüm noktası güçlendirilen bu numunede daha mikro düzeyde ve fazla sayıda AE aktivitesi olması numunenin de daha sünek davrandığı anlamına gelmektedir. İlerleyen yüklerde Deney Elemanı-7 ile kıyaslandığında sadece düğüm noktasında aktiviteler artmayıp

kirişte de aktiviteler artmıştır. Dügüm noktasının güçlü olması çatlakların kirişte daha fazla sayıda oluşmasına sebep olmuştur. Kaynak konumlandırma sonuçları gözle görülen çatlaklar ile uyumludur. Kiriş-kolon ara yüzeyinde gözlenen çekme çatlakları SIGMA analizi sonucunda da net bir şekilde belirlenmiştir. Bu numunede de düşük yük seviyesinde çekme nitelikli çatlaklar fazla iken ilerleyen yük seviyelerinde kesme çatlakları artmıştır.

4.2.7 Deney Elemanı-7

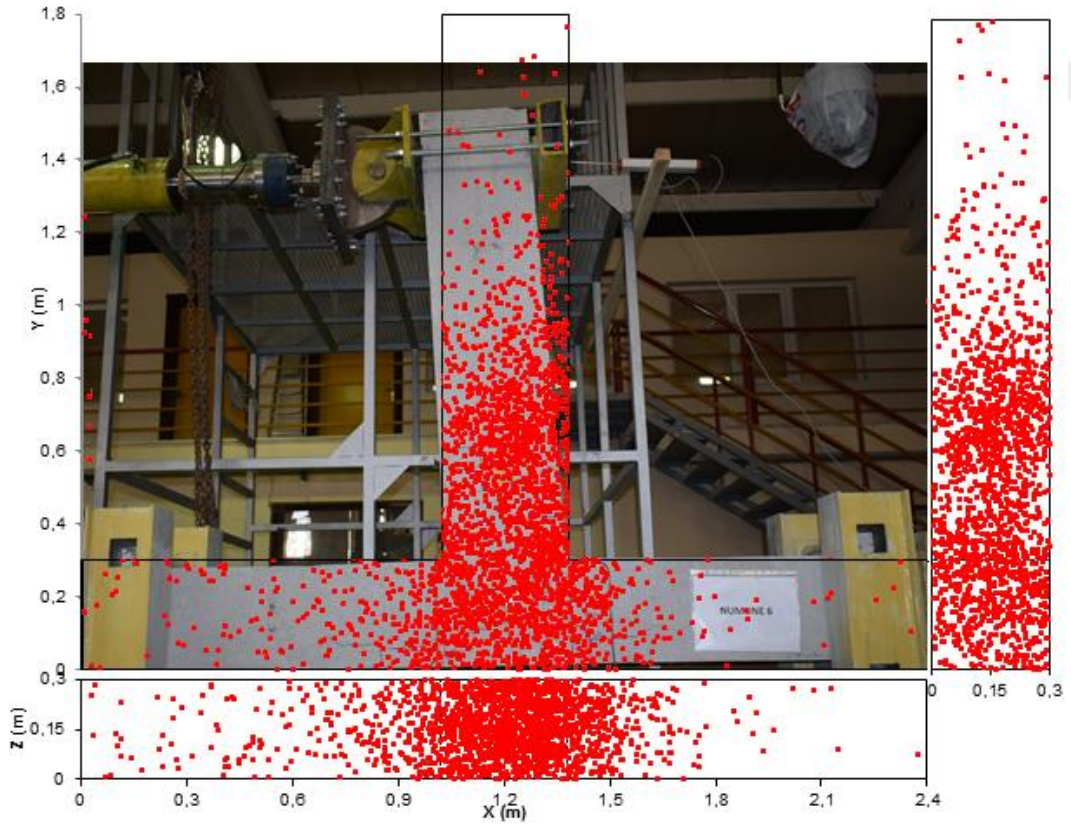
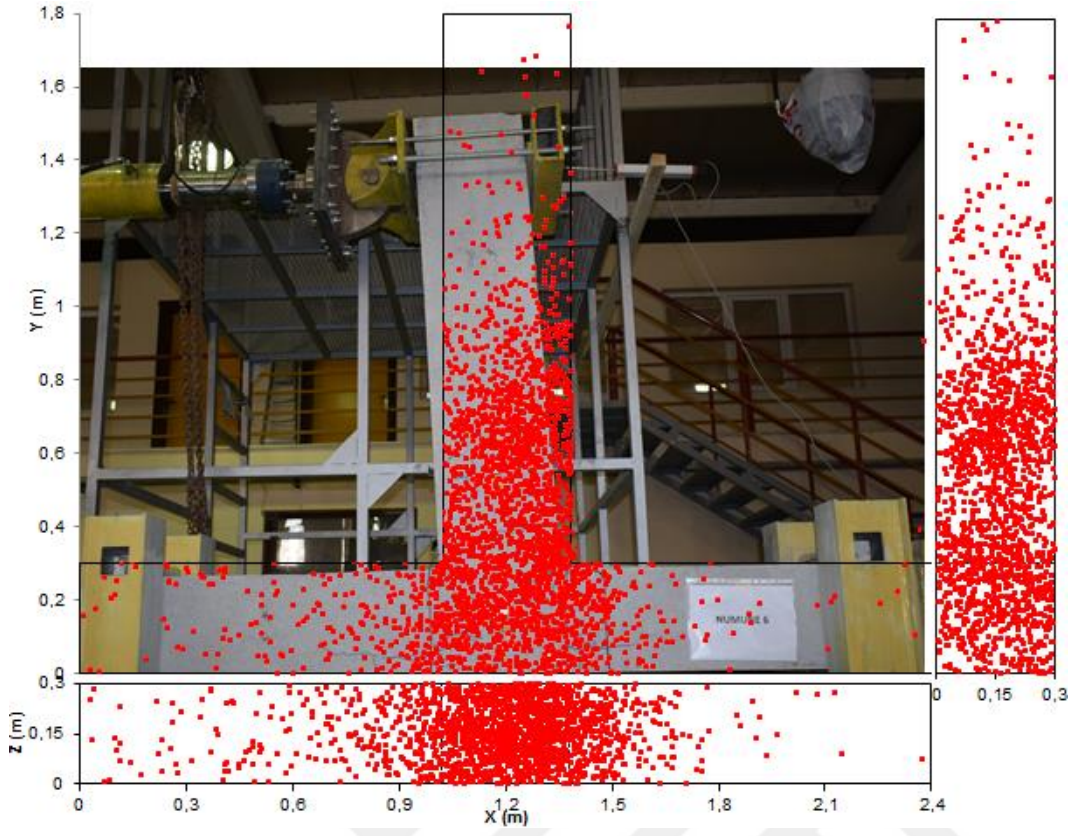
Deney Elemanı-7'nin AE aktiviteleri incelendiğinde (Şekil 4.26) kümülatif AE vuruşlarının 1101. ve 1865. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. 474., 919. ve 1763. saniyelerde ise kümülatif AE enerjisinde sıçramalı artışlar görülmektedir. Bu artışlar +30 kN'un ilk çevrimi ile -40 kN'un ilk çevriminde gözlenen diyagonal ve -50 kN'un ilk çevriminde gözlenen eğilme çatlaklarından kaynaklanan aktivitelerdir. Ayrıca bu aktivitelerin arasından en düşük yükselme zamanına sahip aktivite 1763. saniyede görülmektedir. Bu durum çekme aktivitesini kanıtlar niteliktedir. Genlik ve yükselme zamanı değerlerinin aynı anda arttığı 631. (+20 kN'un ikinci çevrimi), 758. (-20 kN'un ikinci çevrimi) ve 1013. (+40 kN'un ilk çevrimi) saniyelerin tümünde ortak olarak genlikte çok daha belirgin artışlar gözlenmesi, bu aktivitelerin RA değerlerinin daha düşük, dolayısı ile kesmeye daha yatkın olduklarını göstermektedir. Deney sırasında sadece +40 kN'un ilk çevrimi sırasında diyagonal bir çatlak gözle görülebilmıştır. 20 kN yük seviyelerindeki aktiviteler ise AE ile belirlenebilmiştir. Ortalama frekans ve RA değeri ilişkileri incelendiğinde ise ilerleyen yük seviyelerinde yüksek RA değerlerine sahip aktivitelerin sayıca artması, elemanda deney ilerledikçe kesme aktivitelerinin hakim olduğunu göstermektedir.



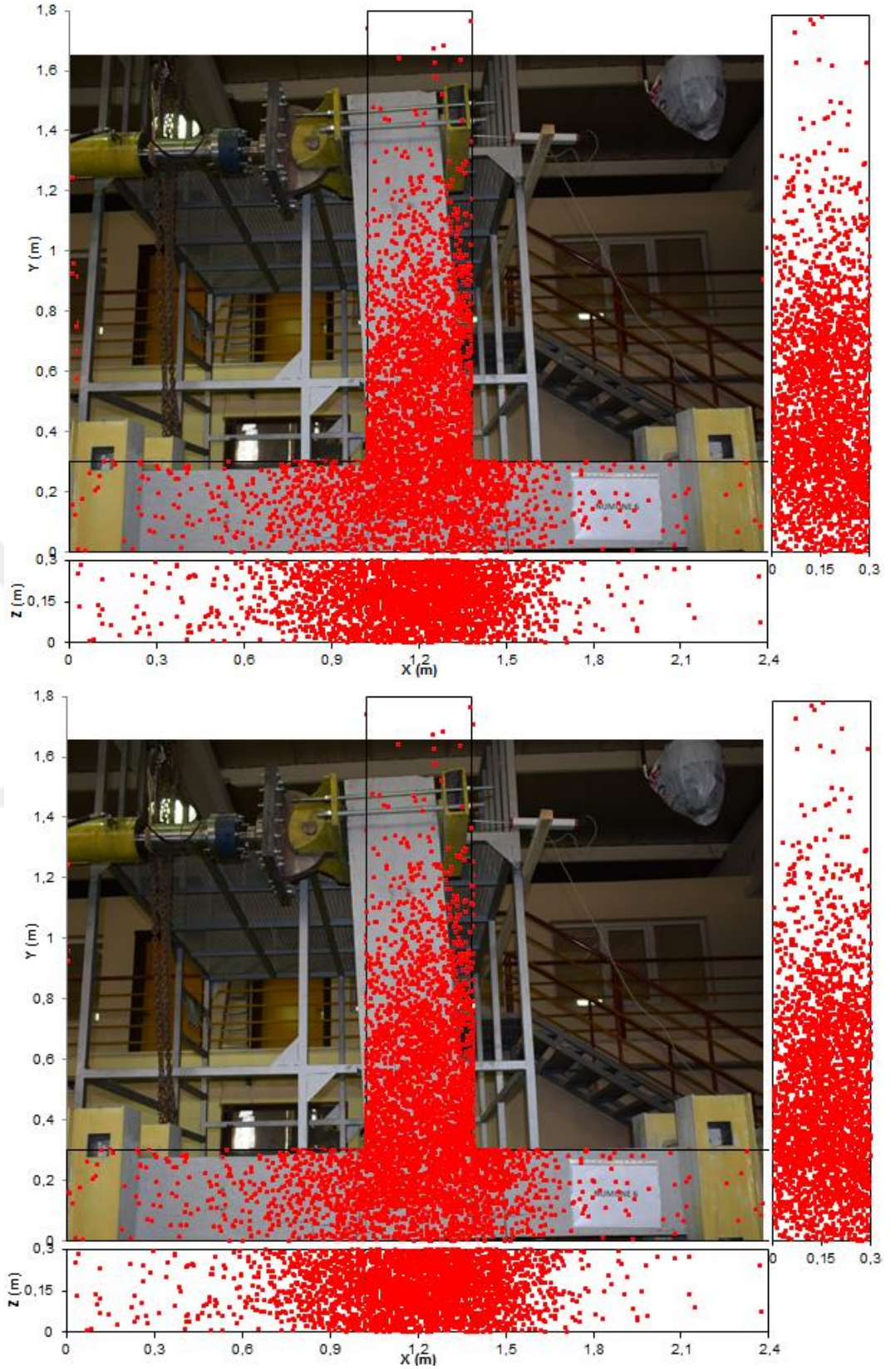


Şekil 4.26.Deney Elemanı-7'ye ait AE parametre analizi bulguları

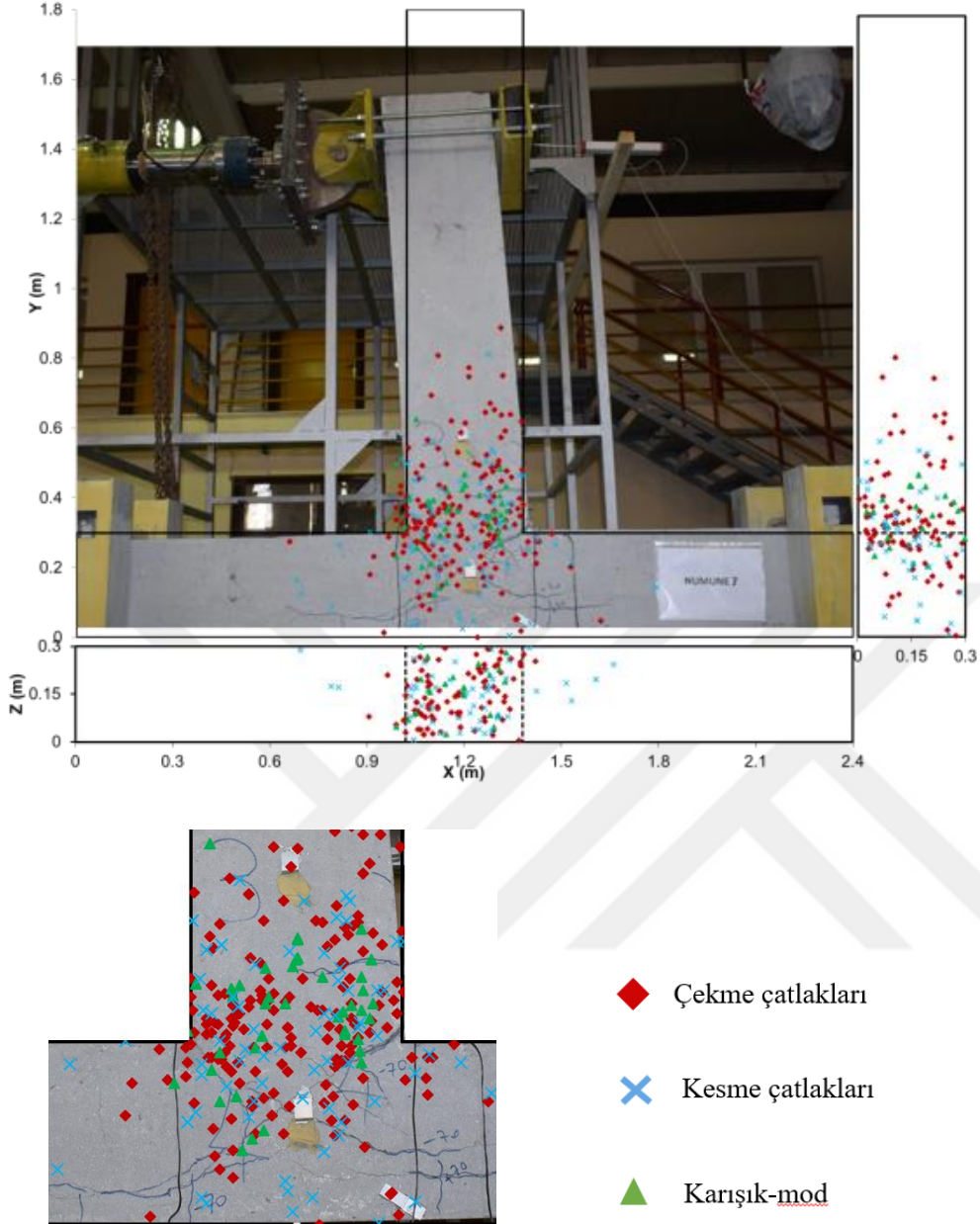
Deney Elemanı-7'nin AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'da verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği 8. yük çevrimi, ilk kesme çatlaklarının gözlemlendiği 9. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 14. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.27. Deney Elemanı-7'nin 8. ve 9. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.28. Deney Elemanı-7'nin 14. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları

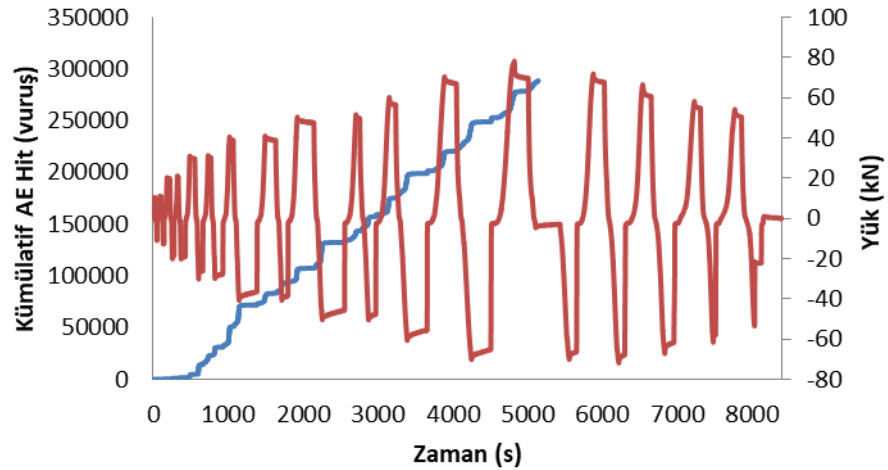


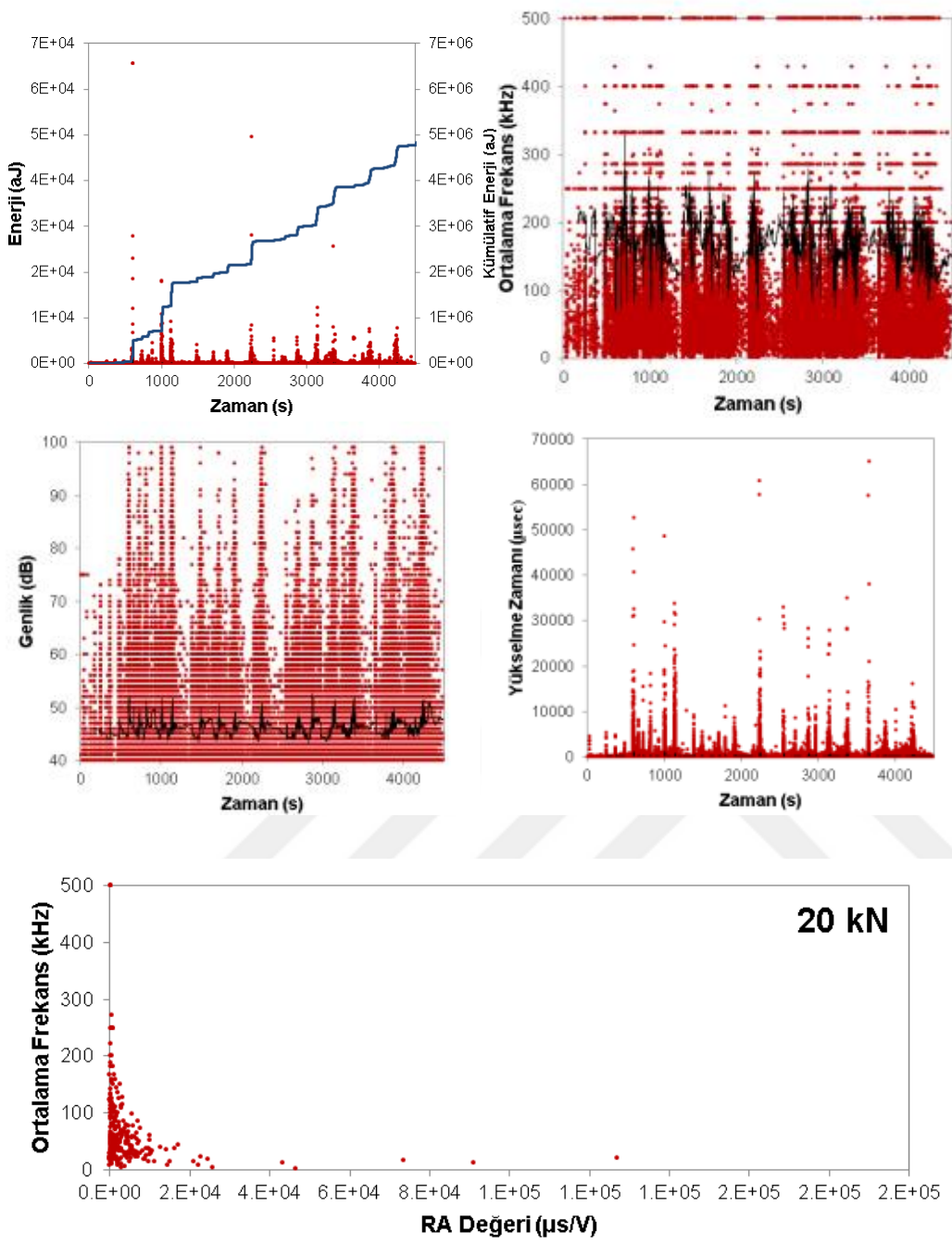
Şekil 4.29. Deney Elemanı-7'nin SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

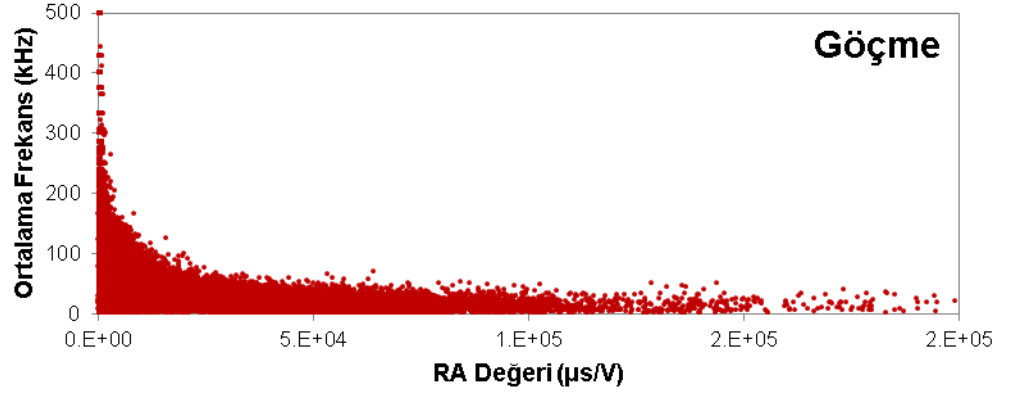
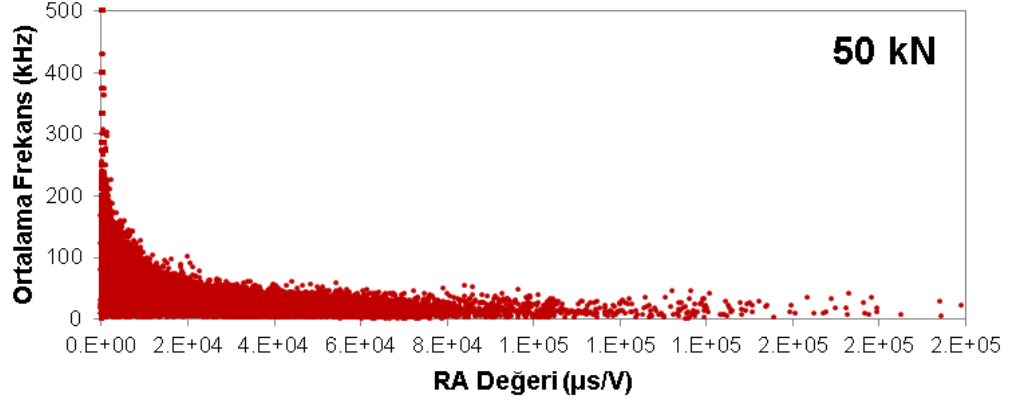
AE kaynak konumlandırma sonuçları incelendiğinde Deney Elemanı-7'de düşük yük seviyelerinde hem kirişte ve hem de düğüm noktasında çok sayıda ve mikro düzeyde AE aktiviteleri görülmektedir. Kiriş-kolon ara yüzeyinde gözlenen çekme çatlakları SiGMA analizi sonucunda da net bir şekilde belirlenmiştir. Bu numunede çekme nitelikli çatlaklar daha fazladır fakat yine de ilerleyen yük seviyelerinde kesme çatlakları artmıştır. SiGMA analizinde kiriş üst kısmında gözlenen çatlakların elde edilememesinin sebebi verilerin aşağıdaki sensörlere ulaşamaması sebebiyledir.

4.2.8 Deney Elemanı-8

Deney Elemanı-8'in AE aktiviteleri incelendiğinde (Şekil 4.30) kümülatif AE vuruşlarının 1106. ve 2219. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. 606., 1011., 1140. ve 2144. saniyelerde ise kümülatif AE enerjisinde büyük sıçramalı artışlar görülmektedir. Yük ilerledikçe ise bu sıçramalar oluşmaya devam etmiştir. Bahsedilen artışlar -30 kN'un ilk çevriminde duyulan CFRP malzemenin betondan ayrılma sesleri, +40 kN ve -40 kN'un ilk çevrimlerinde kirişte oluşan ilk eğilme çatlağı ve CFRP malzemedan gelen seslerin devam etmesi, +50 kN'un ilk çevriminde kolonun alt yüzeyindeki CFRP'nin liflerine dik doğrultusunda gözlenen ayrışmadan kaynaklanan aktivitelerdir. Ayrıca bu aktivitelerin arasından en yüksek yükselme zamanına sahip aktivite +70 kN'un ilk çevriminde 3661. saniyede oluşmuştur ve bu sırada kolonda ilk eğilme çatlağı oluşmuştur. Genlik ve yükselme zamanı değerlerinin aynı anda arttığı 606., 1011., 2288. ve 3661. saniyelerde bahsedilen aktivitelerin oluşmasıyla, genlik değerleri 99 dB seviyelerine ulaşmıştır. Ortalama frekans ve RA değeri ilişkileri incelendiğinde ise +20 kN yük seviyesine dek elemanda gözlenen en büyük RA değeri 1×10^5 $\mu\text{s}/\text{V}$ civarlarındadır. Yük artıp +50 kN seviyesine kadar ilerledikçe bu değerler 2×10^5 $\mu\text{s}/\text{V}$ 'lara ulaşmış ve eleman göçene dek benzer özellikli aktiviteler oluşmaya devam etmiştir. İlerleyen yük seviyelerinde yüksek RA değerlerine sahip aktivitelerin artması, CFRP malzemesinin betondan ayrıldıktan sonra AE aktivitelerinin kesme ile karakterize olduğunu göstermektedir.

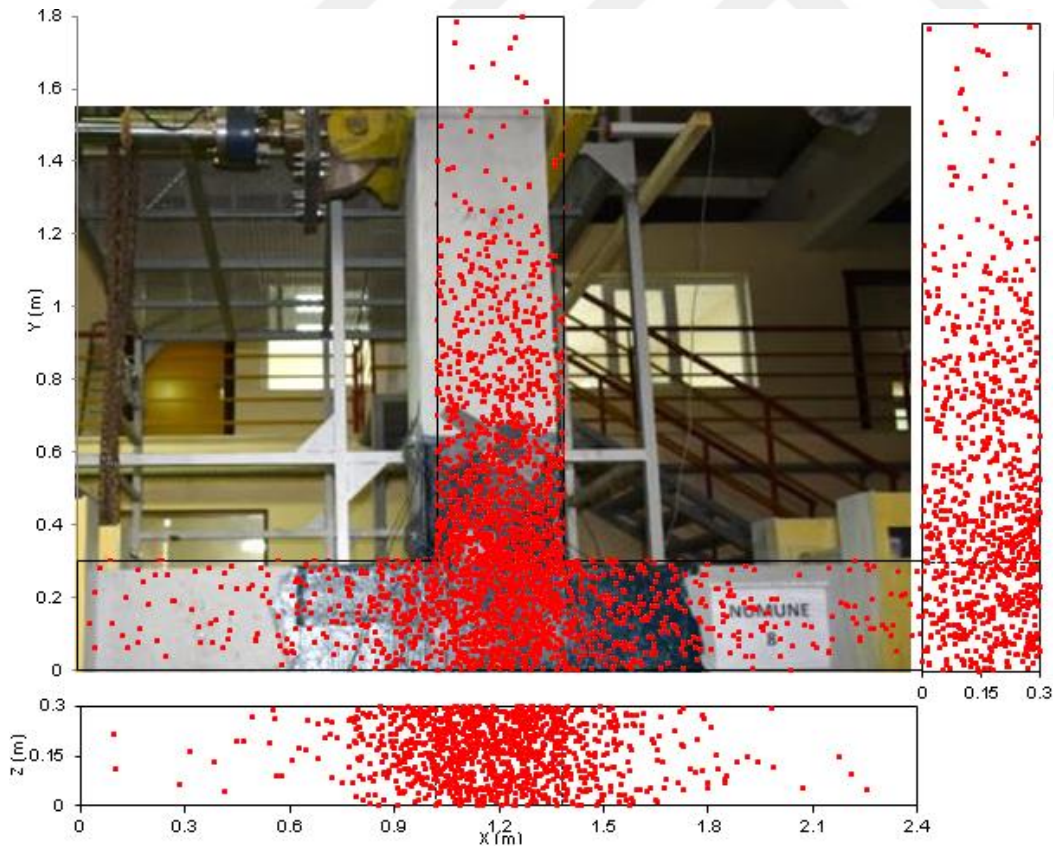
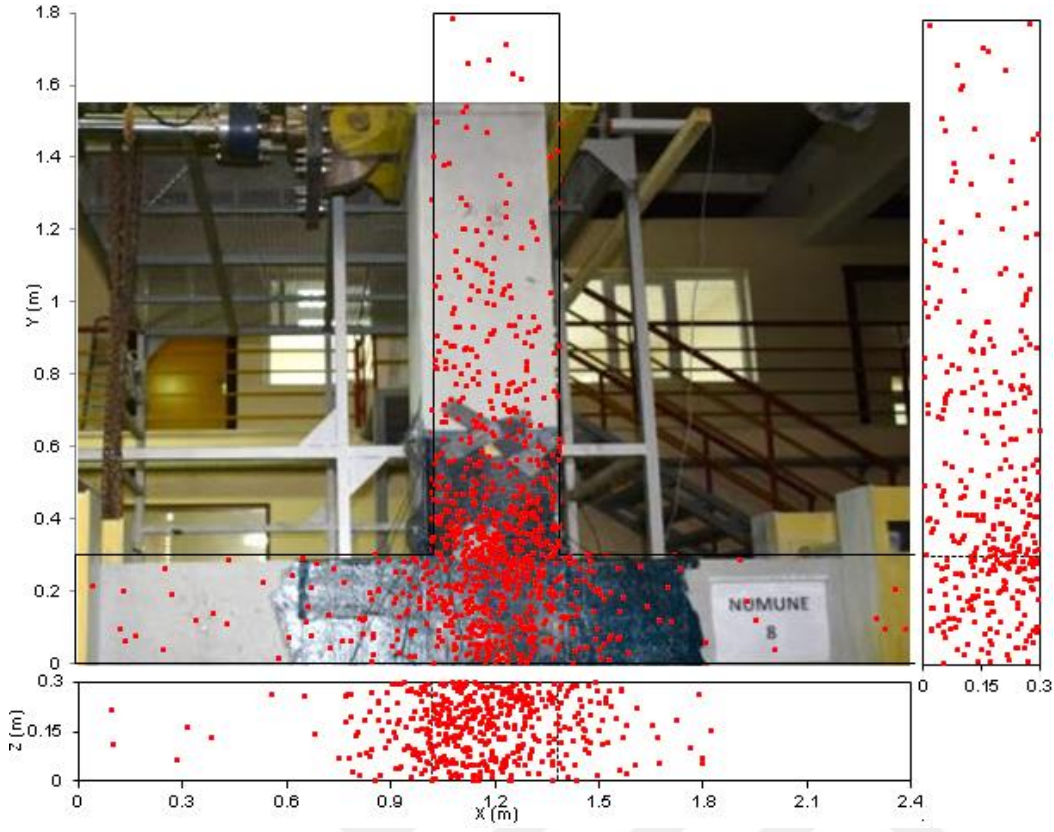




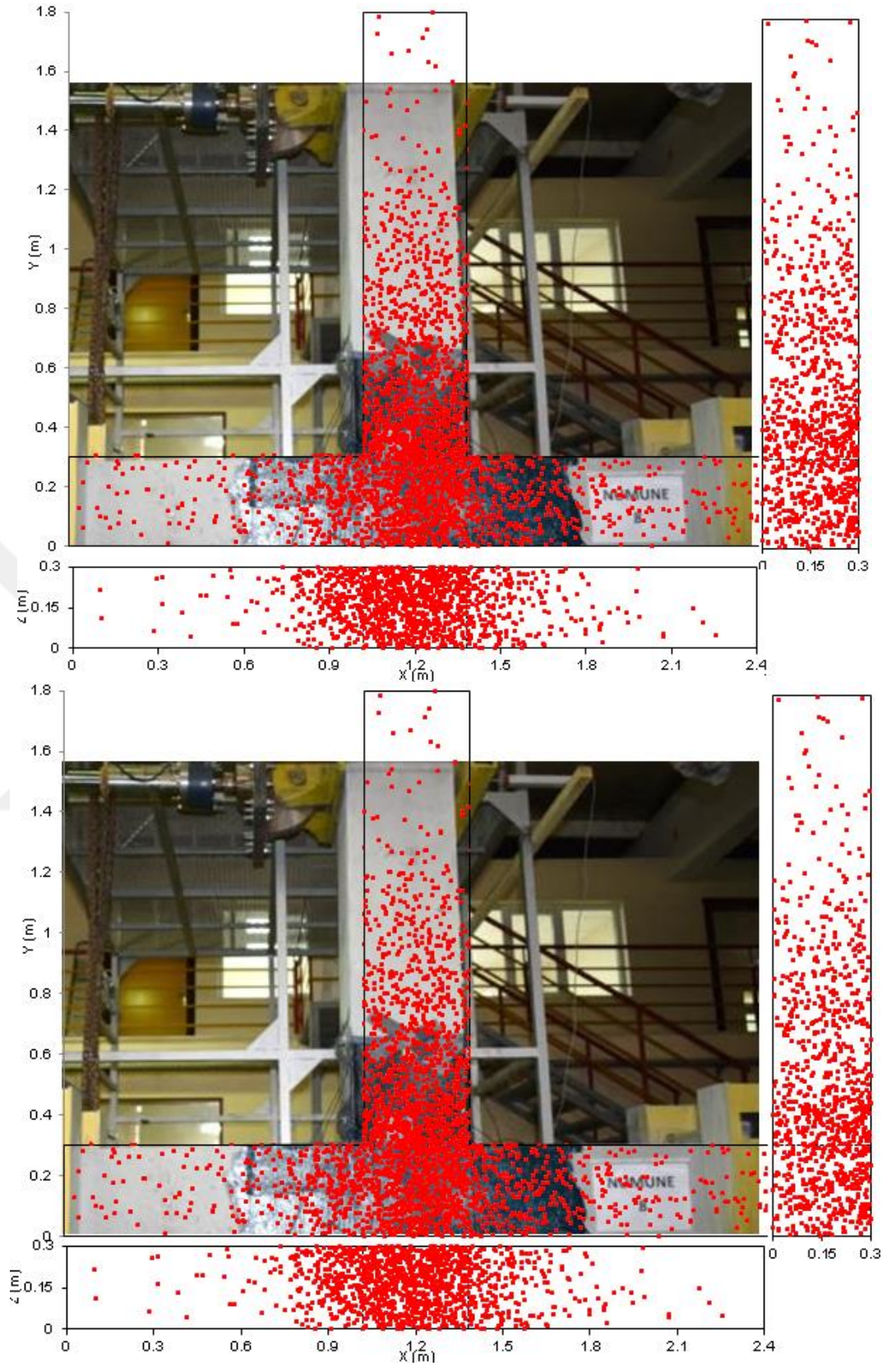


Şekil 4.30. Deneysel Eleman-8'e ait AE parametre analizi bulguları

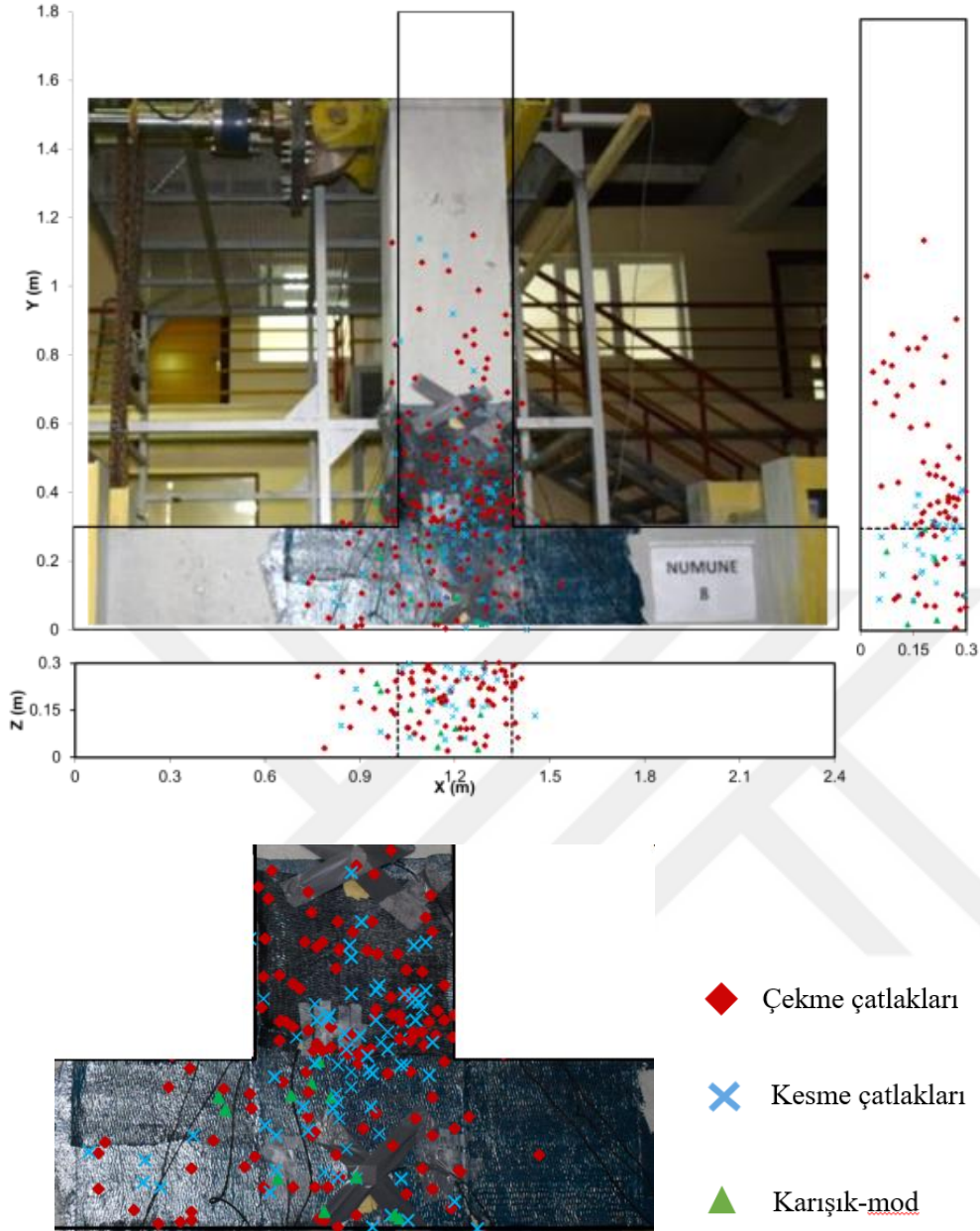
Deneysel Eleman-8'in AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'de verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlakının gözlemlendiği 7. yük çevrimi, CFRP malzemenin beton yüzeyden koptuğu 12. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 13. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.31. Deney Elemanı-8'in 7. ve 12. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.32. Deney Elemanı-8'in 13. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



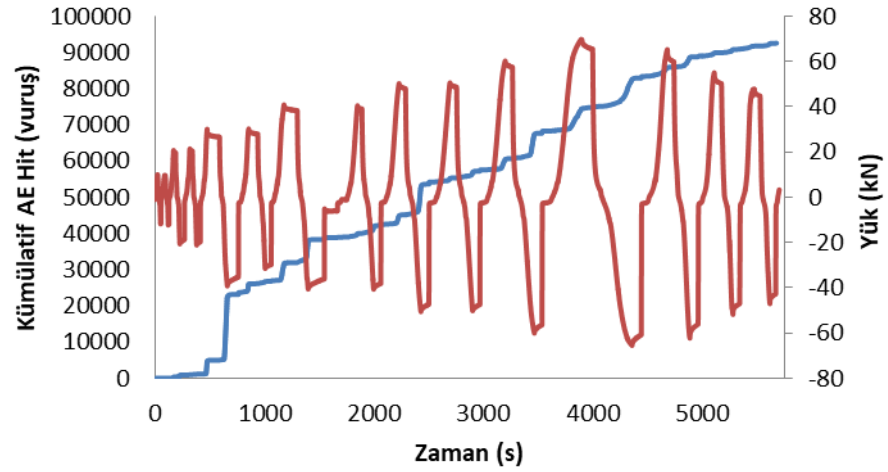
Şekil 4.33.Deney Elemanı-8'in SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

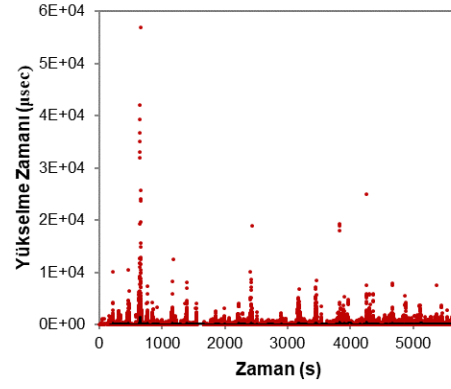
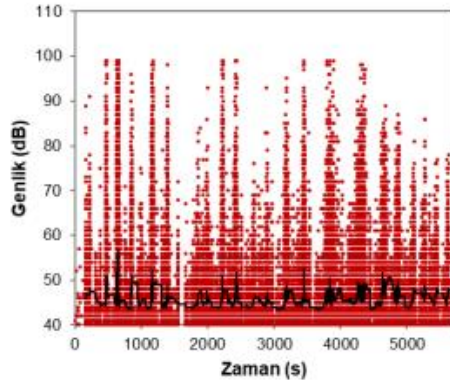
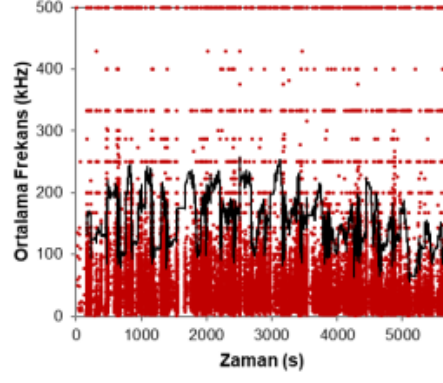
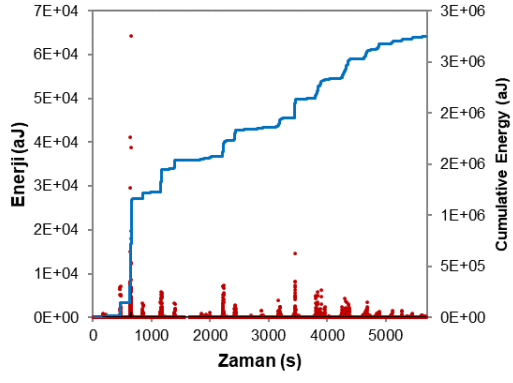
Deney Elemanı-8'in kaynak konumlandırma ve SiGMA analizi sonuçları incelendiğinde AE aktivitelerinin kiriş-kolon ara yüzeyinde yoğunlaştığı fakat düğüm noktasında daha fazla olmakla birlikte kirişte de aktivitelerin görüldüğü söylenebilir. Yükün artması ile birlikte aktiviteler artmış ve CFRP şeritlerin yüzeyden soyulmasıyla kesme çatlaklarını sayısında artış gözlenmiştir. CFRP liflerinin kopması da ileri yük seviyelerinde AE aktivitesi olarak algılanmıştır. Yüzeye CFRP uygulaması AE aktivitelerinde ileri yük seviyelerindeki çekme çatlaklarındaki artışa sebep olmaktadır ve bu artış CFRP'nin yüzeyden

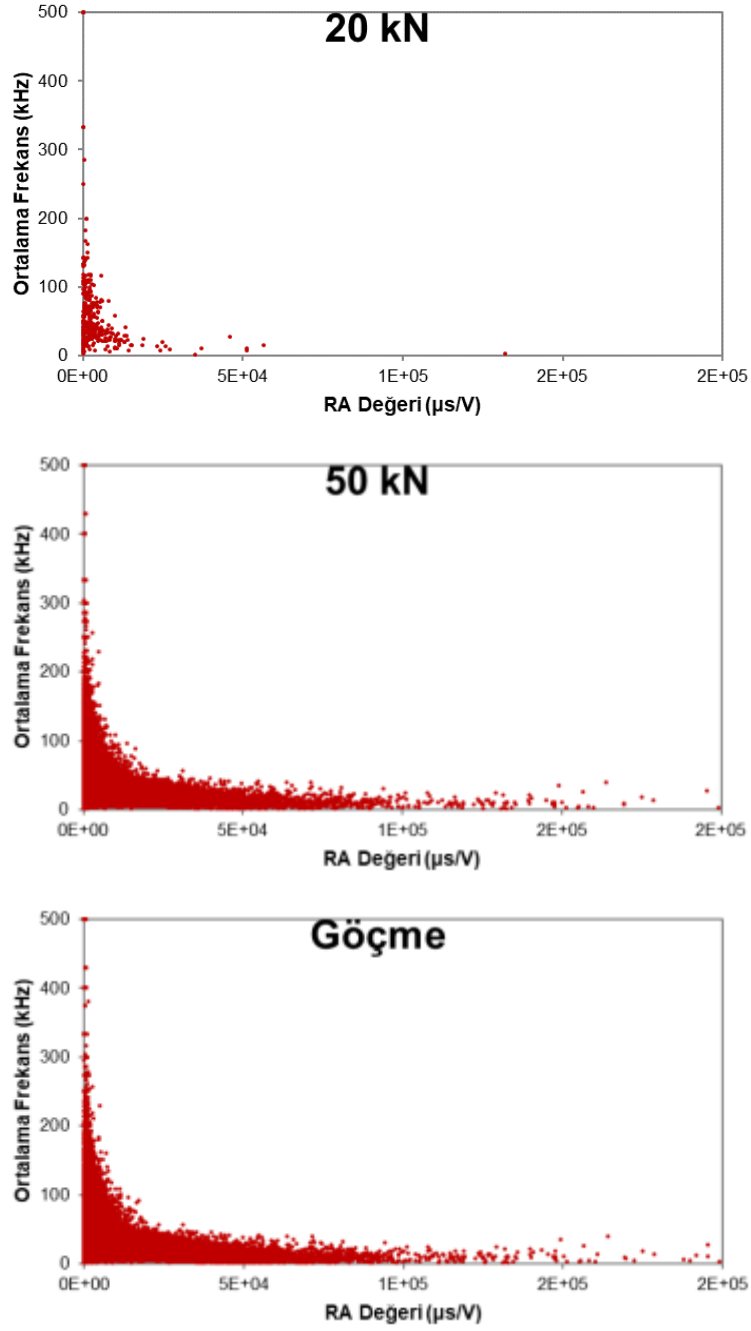
ayrılacağına işaret etmektedir. Numunede çok sayıda gözlenen mikro çatlaklar ise numunenin sünek davranmasına sebep olmuştur.

4.2.9 Deney Elemanı-9

Deney Elemanı-9'a ait zamana bağlı AE enerjisi grafiği incelendiğinde (Şekil 4.34) kümülatif AE vuruşlarının 643. ve 2506. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. Kümülatif AE enerjisinin ise 590. ve 641. saniyelerde sıçramalı artışlar gösterdiği görülmektedir. Bu zamanlar deney elemanın +30 kN'un ilk çevrimi ve -30 kN'un ilk çevrimine maruz bırakıldığı ve ilk eğilme çatlağının numune ön yüzüne doğru ilerlediği anlardır. 1174. saniyede kümülatif enerjide yine bir artış söz konusudur. Bu durum deney sırasında +40 kN'un ilk çevriminde çıtırtıların da duyulduğu üzere CFRP'nin beton yüzeyinden sıyrılmasından kaynaklanmaktadır. Bahsedilen bu sürelerde ortalama frekansın hareketli ortalamasında ani düşüşler gözlenmiş olup, yükselme zamanları ise artmıştır. Deney boyunca ise ortalama frekansın hareketli ortalama eğrisinin düşüş eğiliminde olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum ortalama frekans-RA değeri ilişkisinde ilerleyen yük seviyelerinde RA değerlerinin artmasıyla CFRP'nin de yüzeyden ayrılması ile kesme çatlaklarının arttığını kanıtlamaktadır.

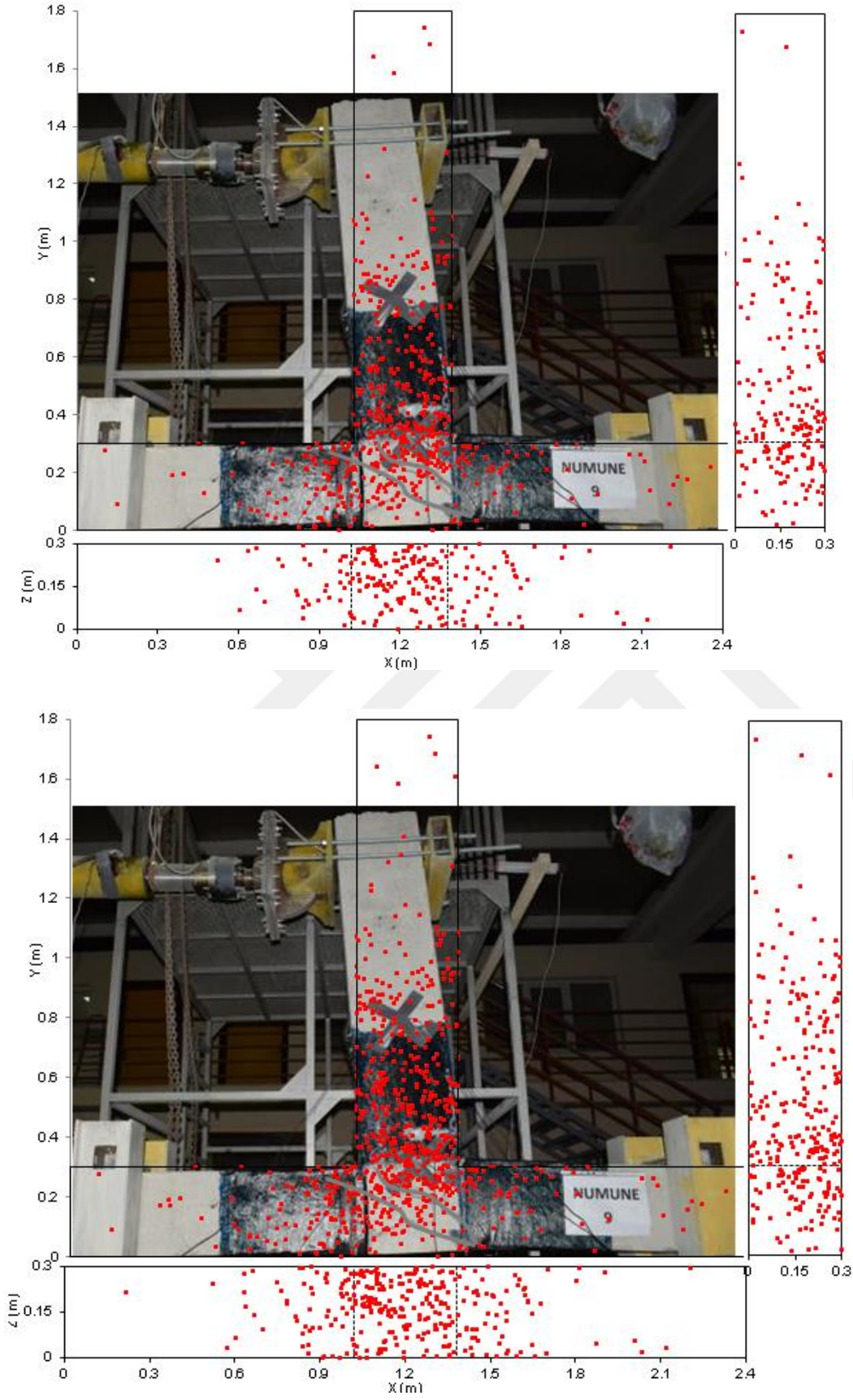




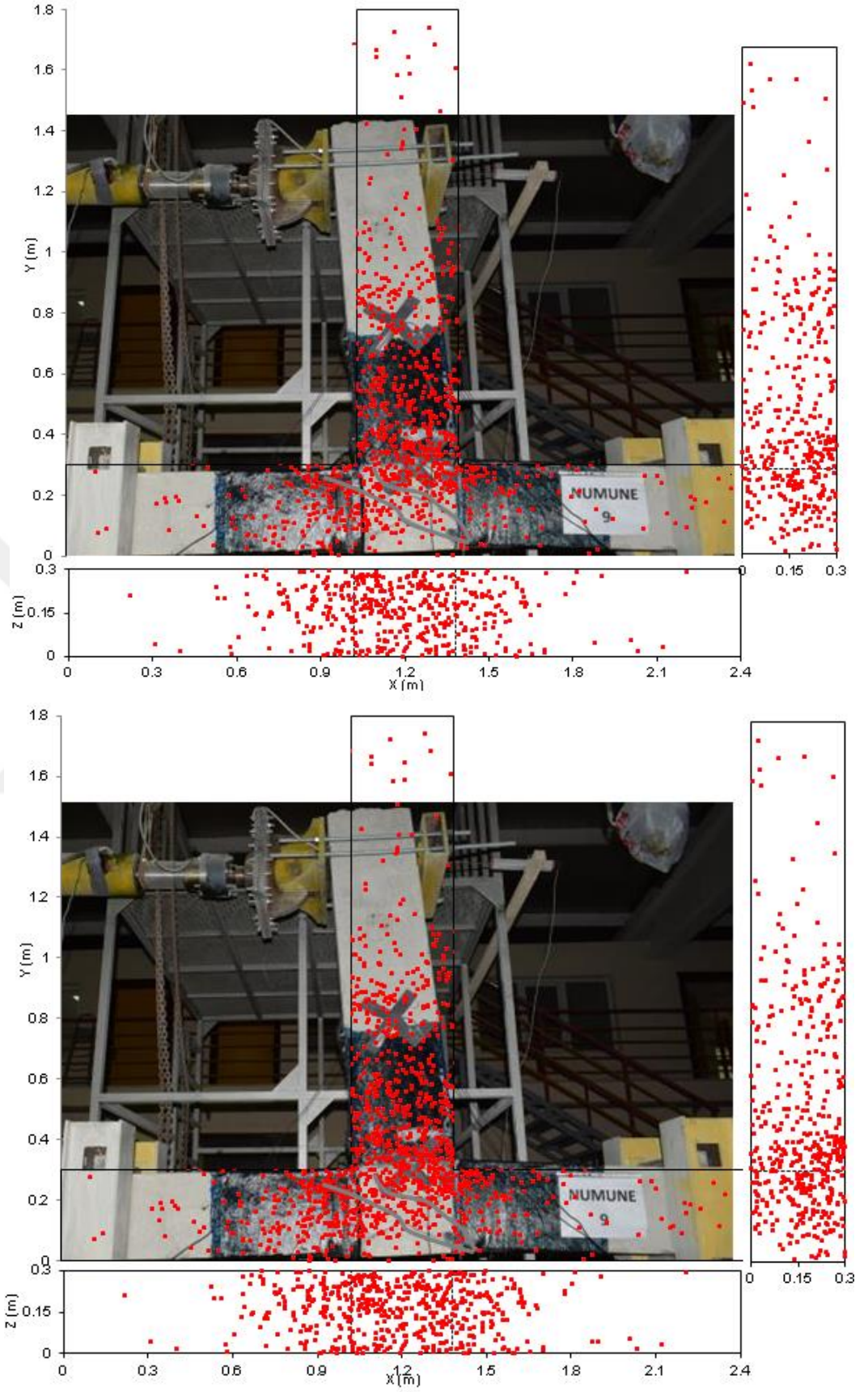


Şekil 4.34. Deney Elemanı-9'a ait AE parametre analizi bulguları

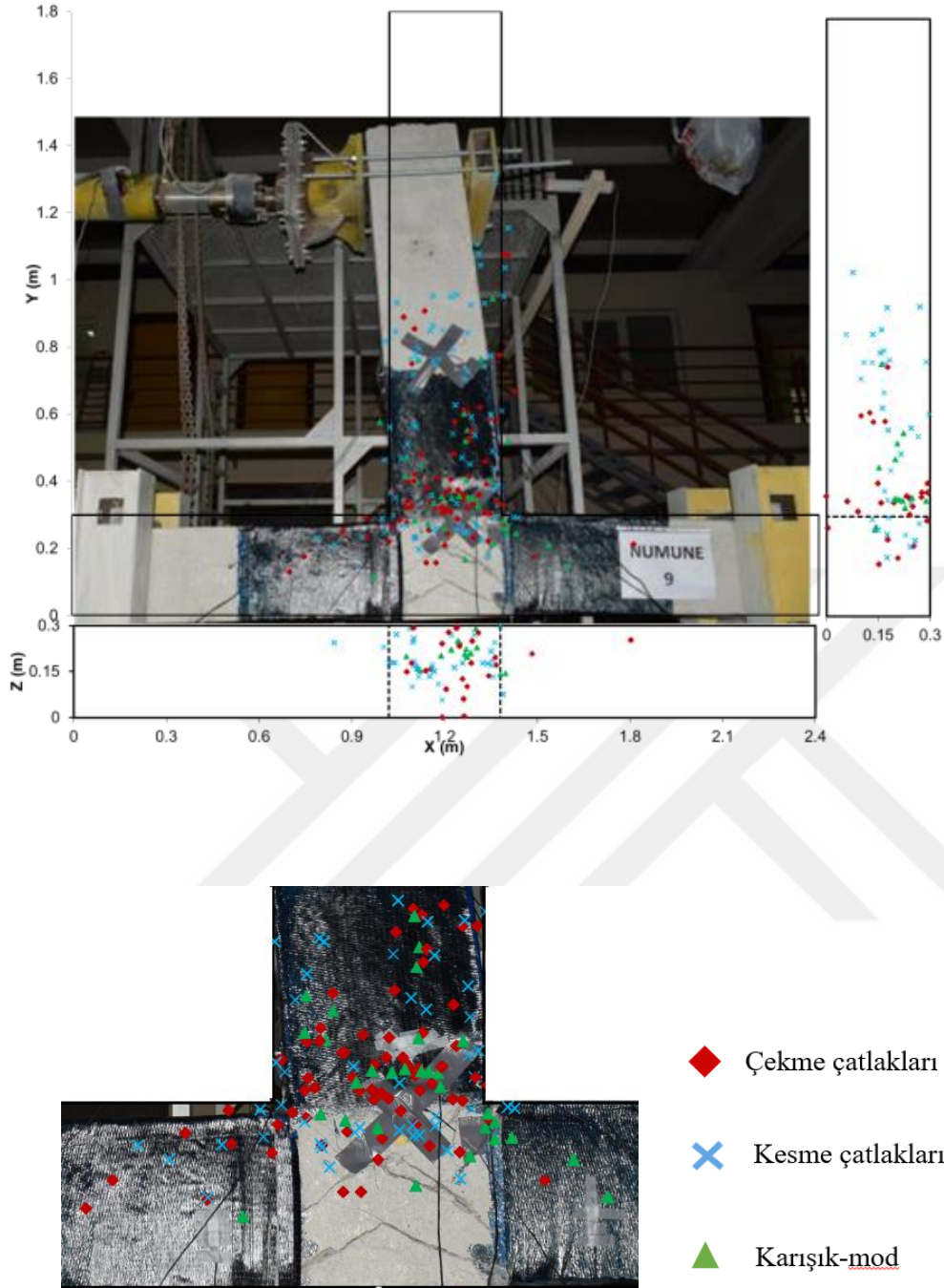
Deney Elemanı-9'un AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37'de verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk eğilme çatlaklarının gözlemlendiği 5. yük çevrimi, CFRP malzemenin beton yüzeyden ayrıştığı 10. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 12. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.35. Deney Elemanı-9'un 5. ve 10. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.36. Deney Elemanı-9'un 12. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



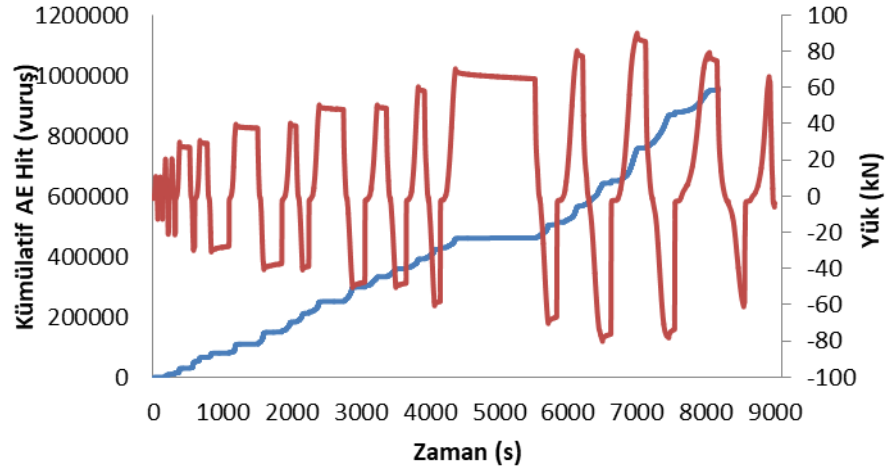
Şekil 4.37.Deney Elemanı-9'un SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

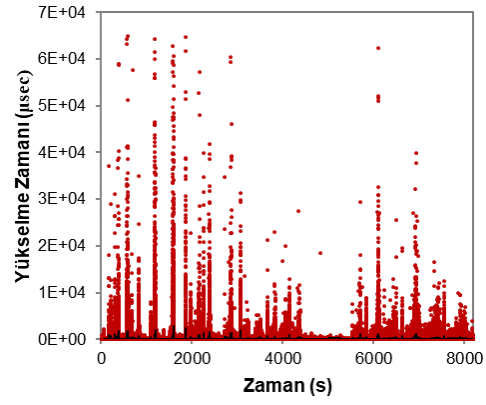
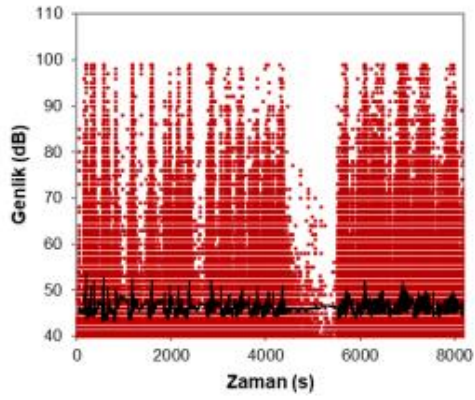
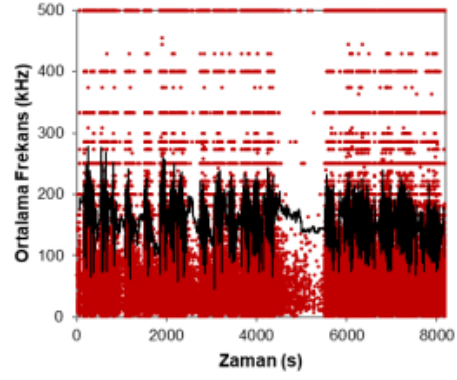
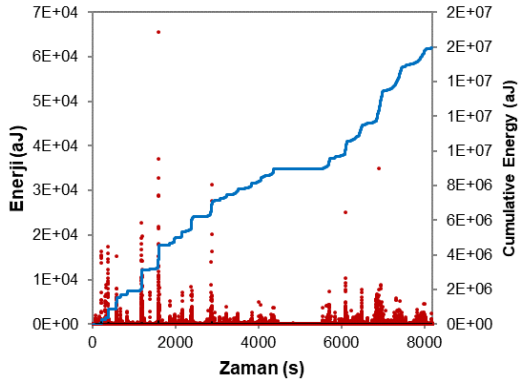
Deney Elemanı-9'un kaynak konumlandırma ve SiGMA analizi sonuçları incelendiğinde AE aktivitelerinin yük artışı ile birlikte arttığı fakat bir önceki numune ile kıyasla daha az sayıda ve daha büyük ölçekli çatlakların oluştuğu söylenebilir. Çatlaklar kiriş-kolon ara yüzeyinde yoğunlaşmaktadır fakat CFRP'nin düğüm noktasına yakın kısımlardaki uç bölgelerinde artan yüklerle birlikte artan gerilmeler sebebiyle AE aktiviteleri de çoğalmıştır. Yükün artması ile birlikte CFRP şeritlerin yüzeyden soyulmasıyla kesme çatlaklarının sayısında

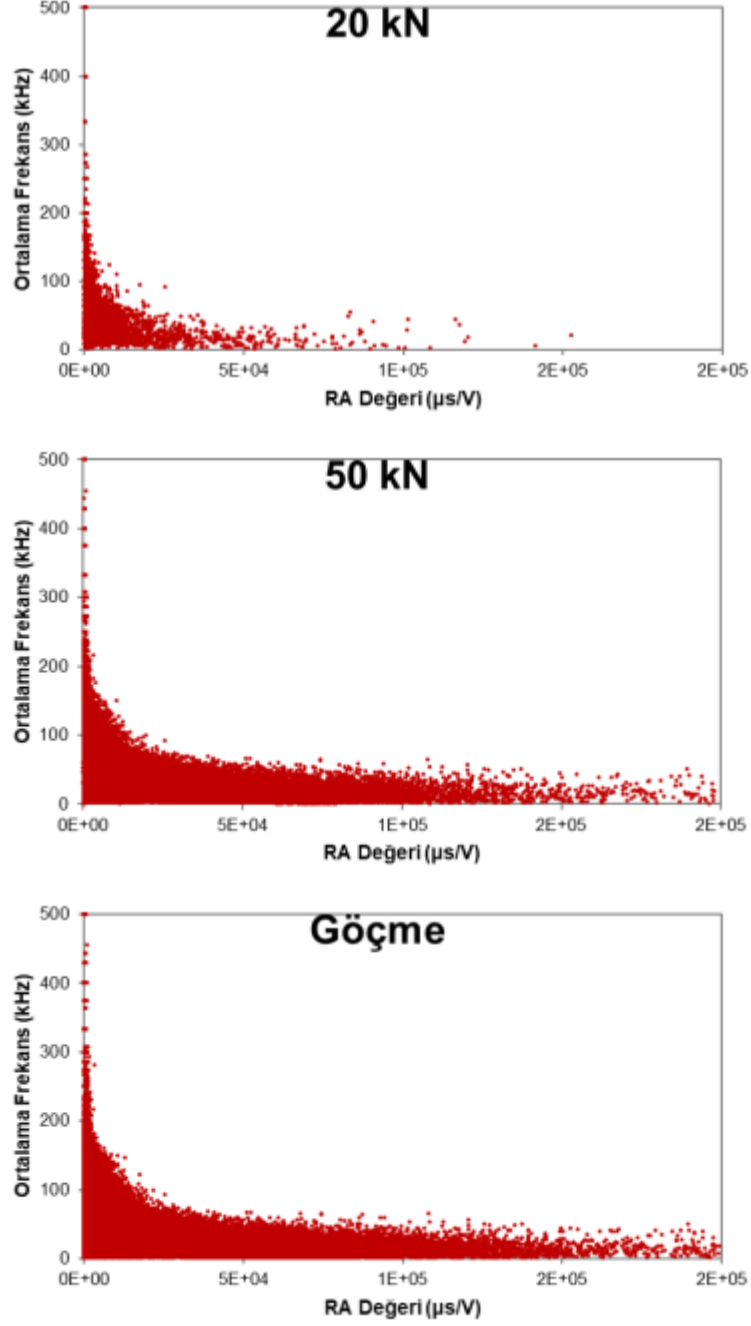
artış gözlenmiştir. CFRP liflerinin kopması da ileri yük seviyelerinde AE aktivitesi olarak algılanmıştır. Yüzeye CFRP uygulaması AE aktivitelerinde ileri yük seviyelerindeki çekme çatlaklarındaki artışa sebep olmaktadır ve bu artış CFRP'nin yüzeyden ayrılacağına işaret etmektedir. Nihai durumdaki kaynak konumlandırma sonuçları incelendiğinde düğüm noktasına yakın CFRP kısımlarındaki aktivite artışı rahatlıkla görülebilir.

4.2.10 Deney Elemanı-10

Deney Elemanı-10'un AE aktiviteleri incelendiğinde (Şekil 4.38) kümülatif AE vuruşlarının 684. ve 1215. saniyelerde ani olarak arttığı görülmektedir. 782., 1189. ve 1592. saniyelerde ise kümülatif AE enerjisinde sıçramalı artışlar görülmektedir. Bu artışlar +30 kN'un ikinci çevriminde gözlenen yeni bir eğilme çatlaklığı, +40 kN'un ilk çevriminde gözlenen yeni bir eğilme çatlaklığı ve -40 kN'un ilk çevriminde gözlenen eğilme çatlaklarının ilerlemesinden kaynaklanan aktivitelerdir. Ortalama frekans ve RA değeri ilişkileri incelendiğinde ise ilerleyen yük seviyelerinde yüksek ortalama frekans değerlerine sahip aktivitelerin sayıca artması, elemanın deney ilerledikçe eğilmeye çalıştığını göstermektedir.

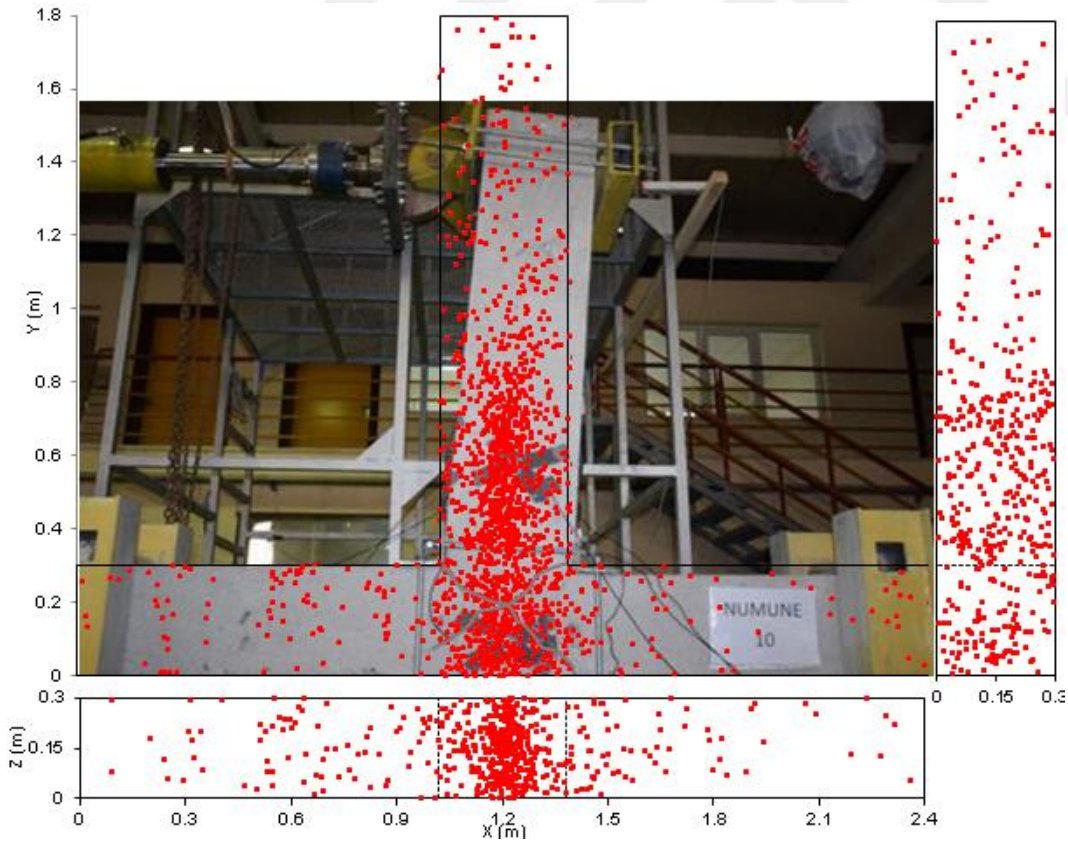
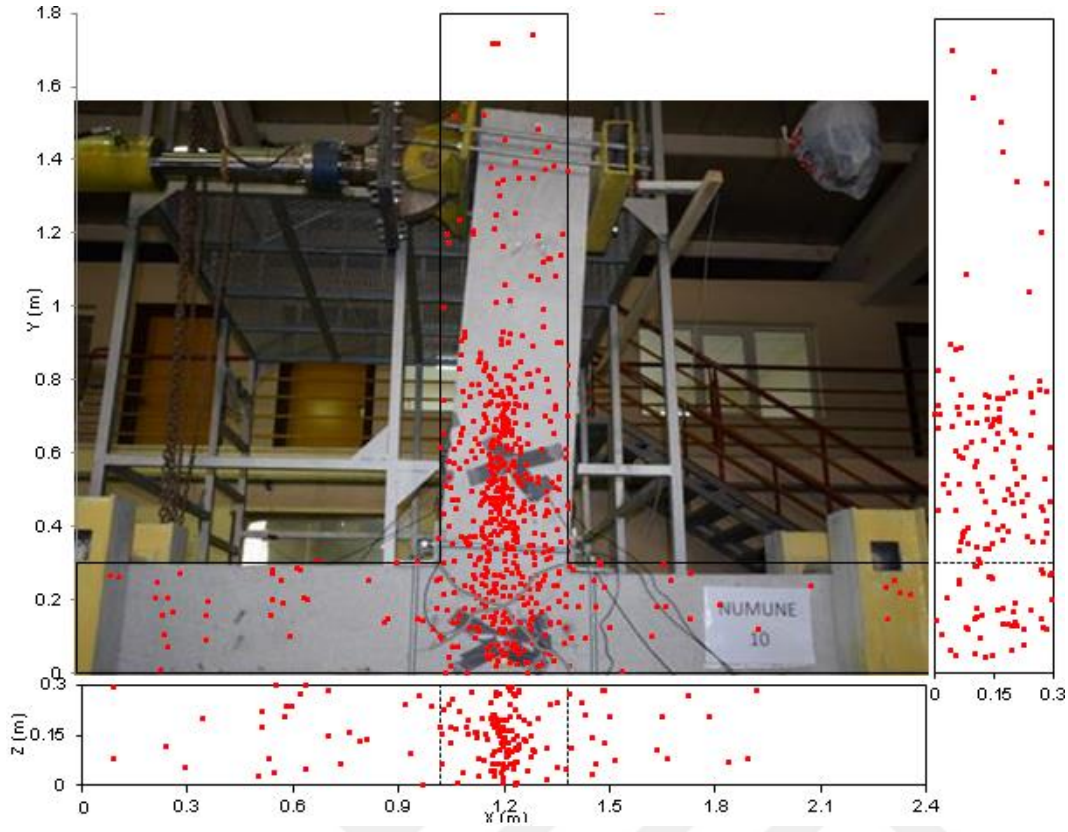




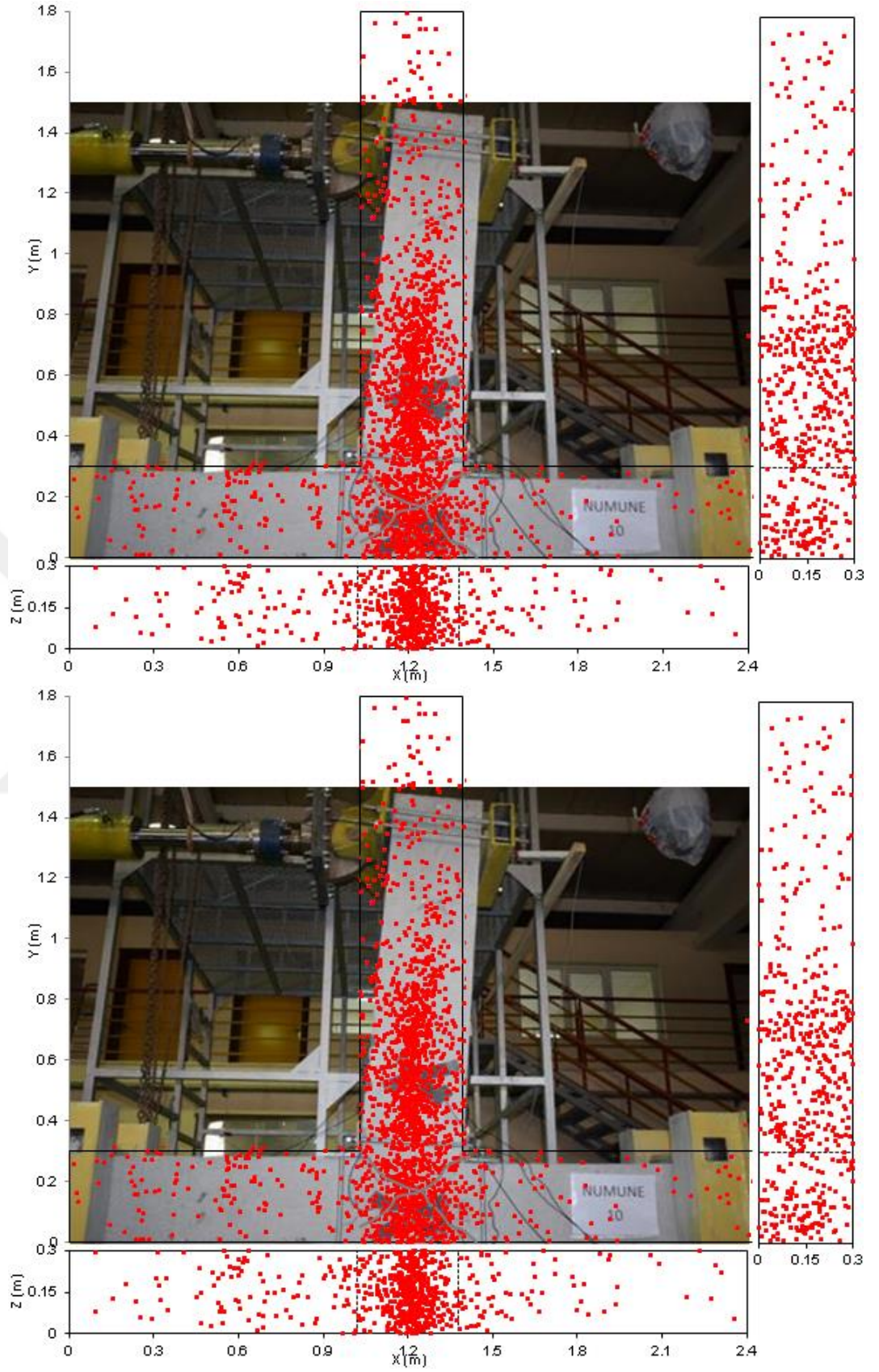


Şekil 4.38.Deney Elemanı-10'a ait AE parametre analizi bulguları

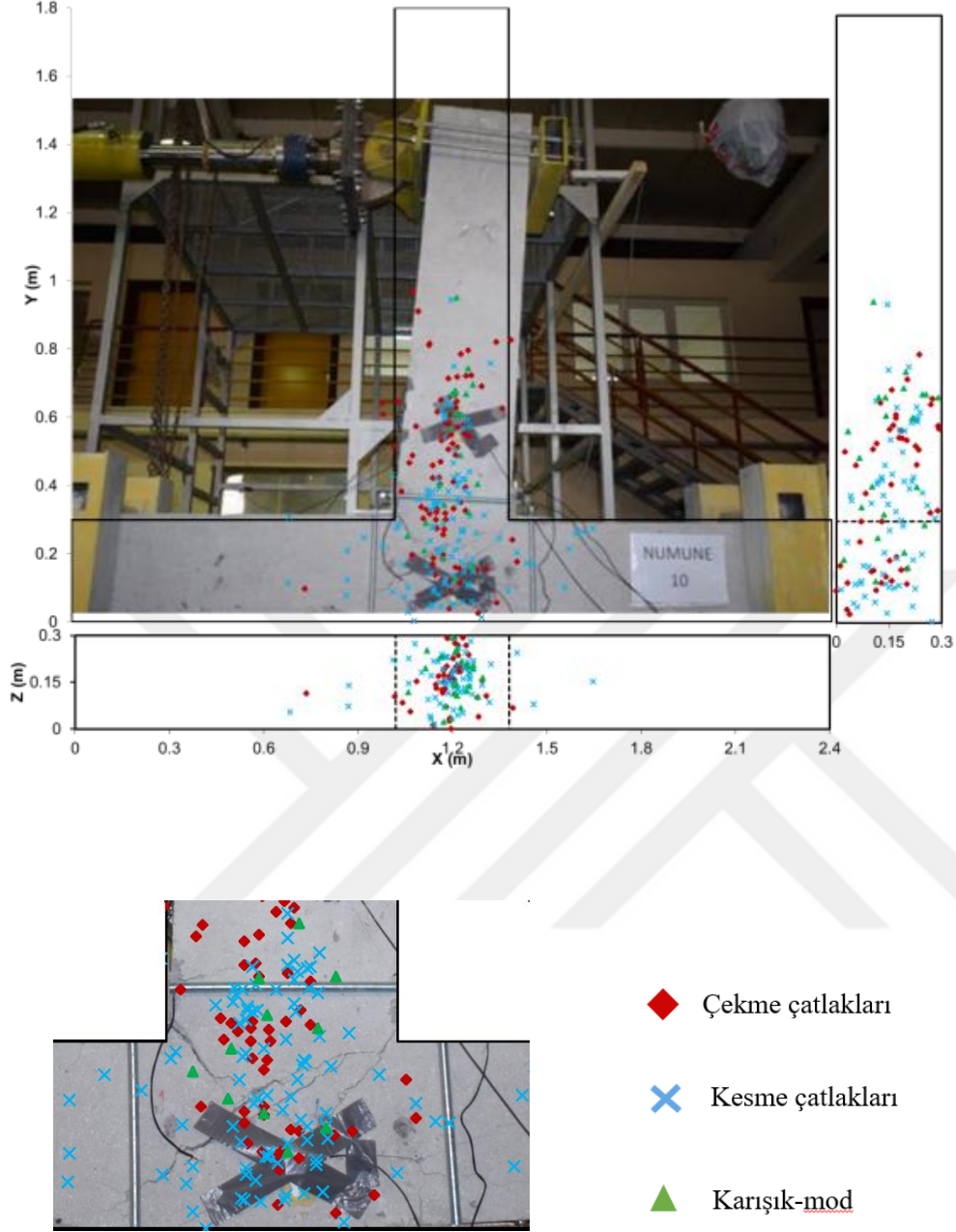
Deney Elemanı-10'un AE kaynak konumlandırma analizi ve SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritaları sırasıyla Şekil 4.39, 4.40 ve 4.41'de verilmiştir. Bu haritalarda elemanda meydana gelen önemli değişiklikler sonrası durumlar gösterilmektedir: İlk kesme çatlağının gözleendiği 5. yük çevrimi, ilk eğilme çatlağının gözleendiği 6. yük çevrimi, akmanın gerçekleştiği 14. yük çevrimi ve göçme durumu.



Şekil 4.39. Deney Elemanı-10'un 5. ve 6. yük çevrimleri sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



Şekil 4.40. Deney Elemanı-10'un 14. yük çevrimi ve göçme sonunda hasar haritaları: AE kaynak konumlandırma sonuçları



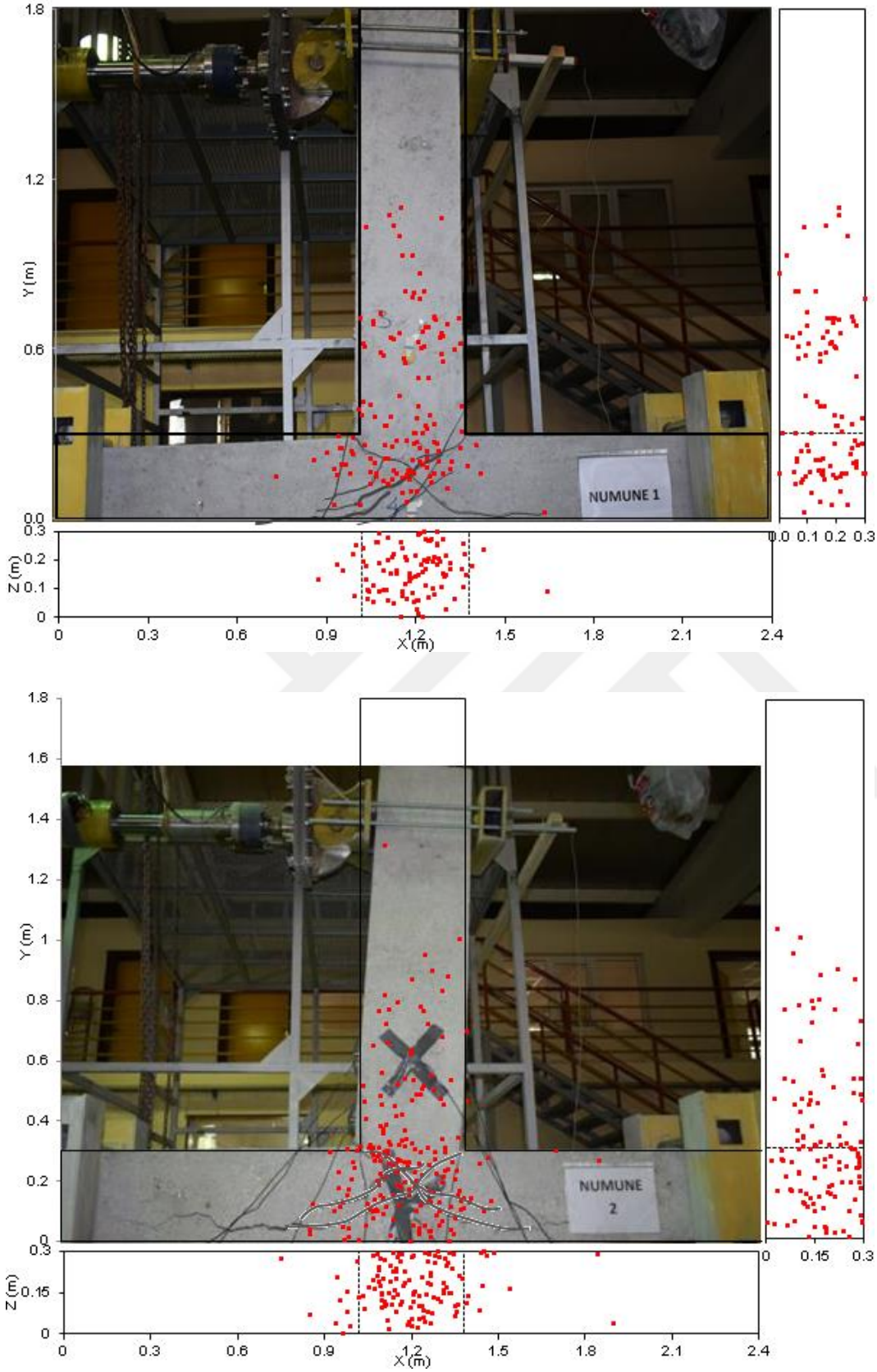
Şekil 4.41.Deney Elemanı-10'un SiGMA analizi ile elde edilen hasar haritası

Deney Elemanı-10 güçlendirilen elemanlar içinde en iyi sonucu veren numune olmuştur. AE kaynak konumlandırma ve SiGMA analizi sonuçları da bu sonucu destekler niteliktedir. Düğüm noktası düşük yük seviyelerinde oldukça rijit davrandığı için ilk AE aktiviteleri kirişte yoğunlaşmıştır. İlerleyen yük seviyelerinde düğüm noktasında da hasar başlayıp rijitlik azalınca AE aktiviteleri hızlanarak artmıştır. Çatlaklar genel olarak kirişte daha fazla olmakla birlikte düğüm noktasında da çok sayıda mikro seviyede aktivite gözlenmiştir. Bu mikro aktivitelerin çokluğu numunenin sünek davranmasına sebep olmuştur. Yük

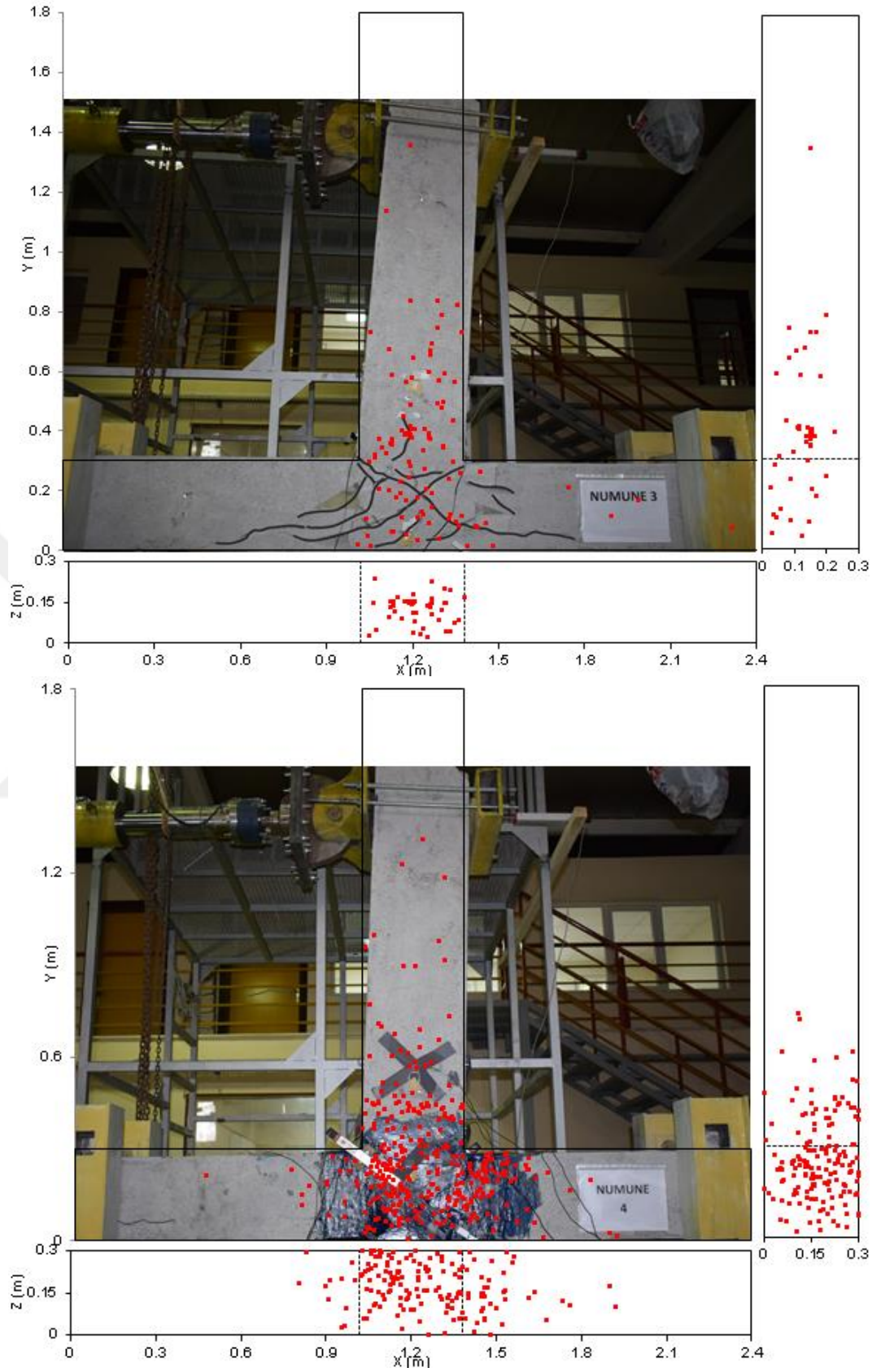
ilerledikçe kesme çatlakları özellikle düğüm noktasında ve giriş-kolon ara yüzünde gözlenmiştir.

4.2.11 En Az Altı Sensör Tarafından Algılanan Göçme Sonrası Hasar Haritaları

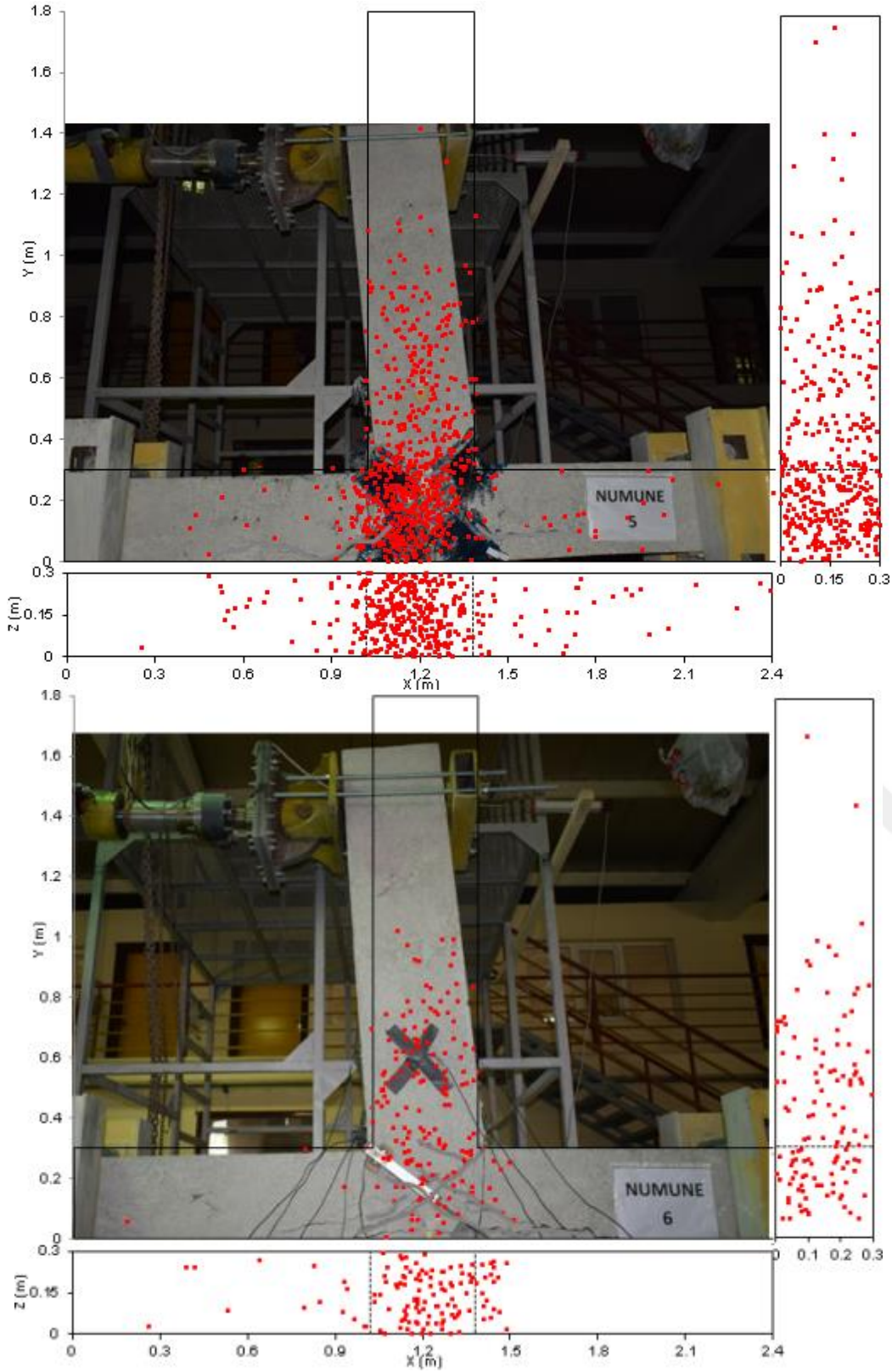
Yukarıda verilen AE kaynak konumlandırma sonuçları en az dört sensör tarafından algılanan aktivitelere aittir. Bu aktivitelere çok daha anlamlı olanları belirlemek için ise en az altı sensör tarafından algılanan AE olayları da ayıklanmış ve göçme sonrası hasar haritaları Şekil 4.42, 4.43, 4.44, 4.45 ve 4.46'da sunulmuştur. Görüldüğü üzere altı ve üzeri sayıda sensör tarafından algılanan AE aktivitelere ayıklanması ile deney sırasında gözlenen çatlak dokularıyla uyum netleşmiştir. Bu durumun sebebi sensör uzaklığının artması, malzemenin yapısı ve yük ilerledikçe hasarların artmasıyla AE dalgasında bozulmalar meydana gelmesidir. Böylelikle çok daha fazla sayıda sensör tarafından algılanan bu anlamlı aktiviteler gözlenen hasar dokularıyla karşılaştırma yapabilmede daha faydalı olmuşlardır.



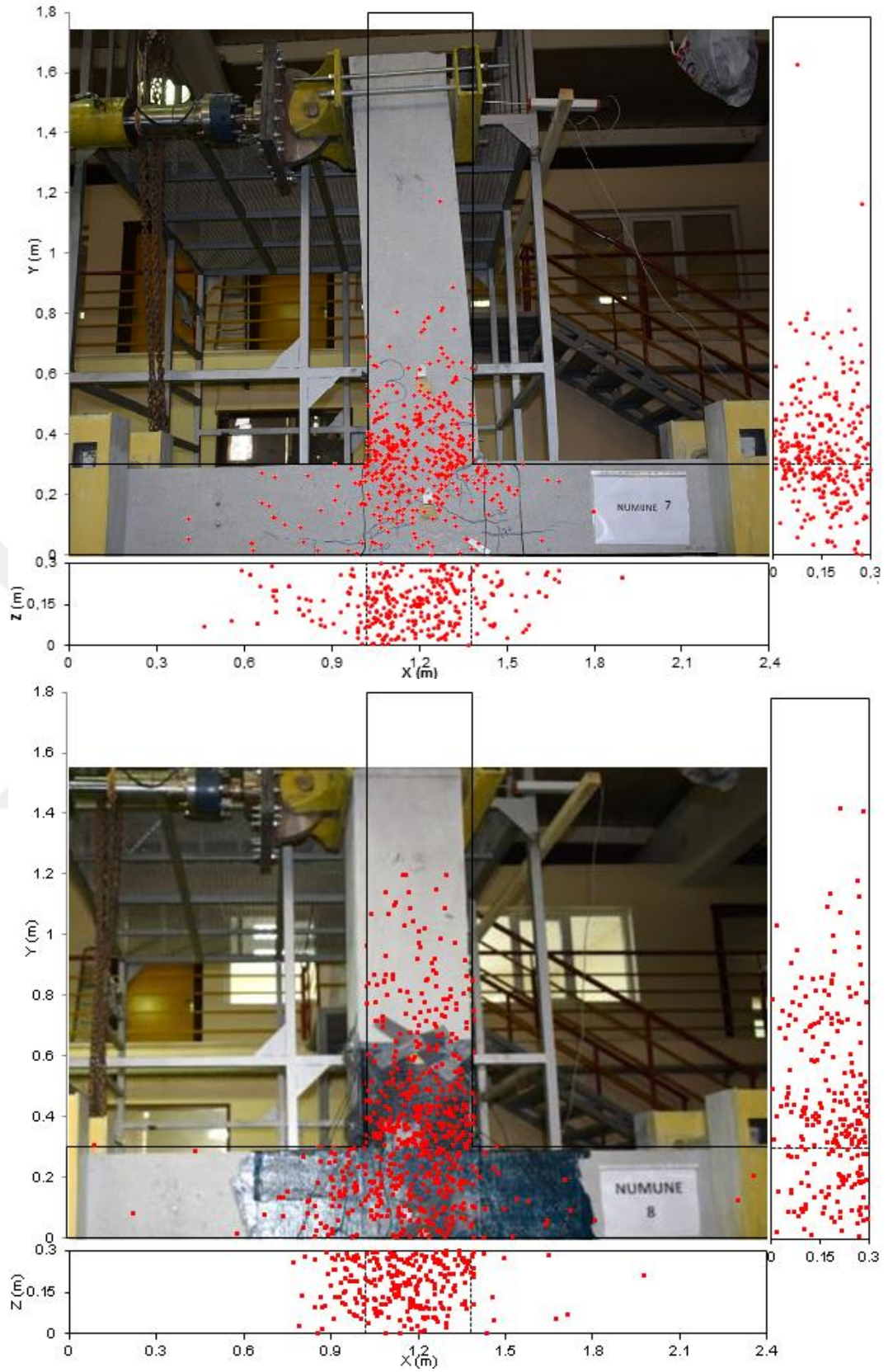
Şekil 4.42. Deney Elemanı-1 ve Deney Elemanı-2'ye ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivite­lerin AE konumlandırma sonuçları



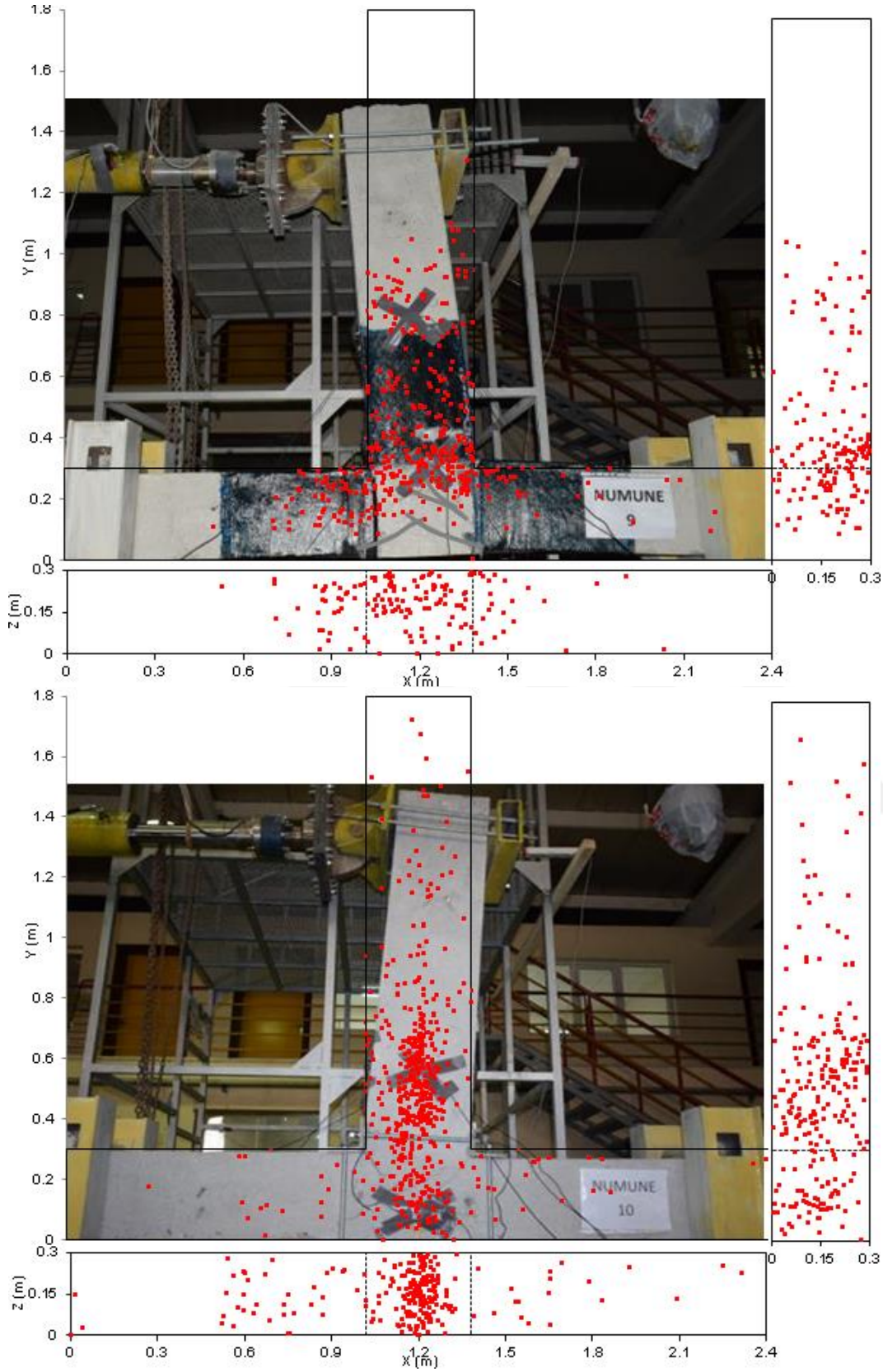
Şekil 4.43. Deney Elemanı-3 ve Deney Elemanı-4'e ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivitelerin AE konumlandırma sonuçları



Şekil 4.44. Deney Elemanı-5 ve Deney Elemanı-6'ya ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivite­lerin AE konumlandırma sonuçları



Şekil 4.45. Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-8'e ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivitelere ait AE konumlandırma sonuçları



Şekil 4.46. Deney Elemanı-9 ve Deney Elemanı-10'a ait en az altı sensör tarafından algılanan aktivite-lerin AE konumlandırma sonuçları

4.2.12 Ib Değer Analizi ile Numunelerin Kırılma Davranışlarının Karşılaştırılması

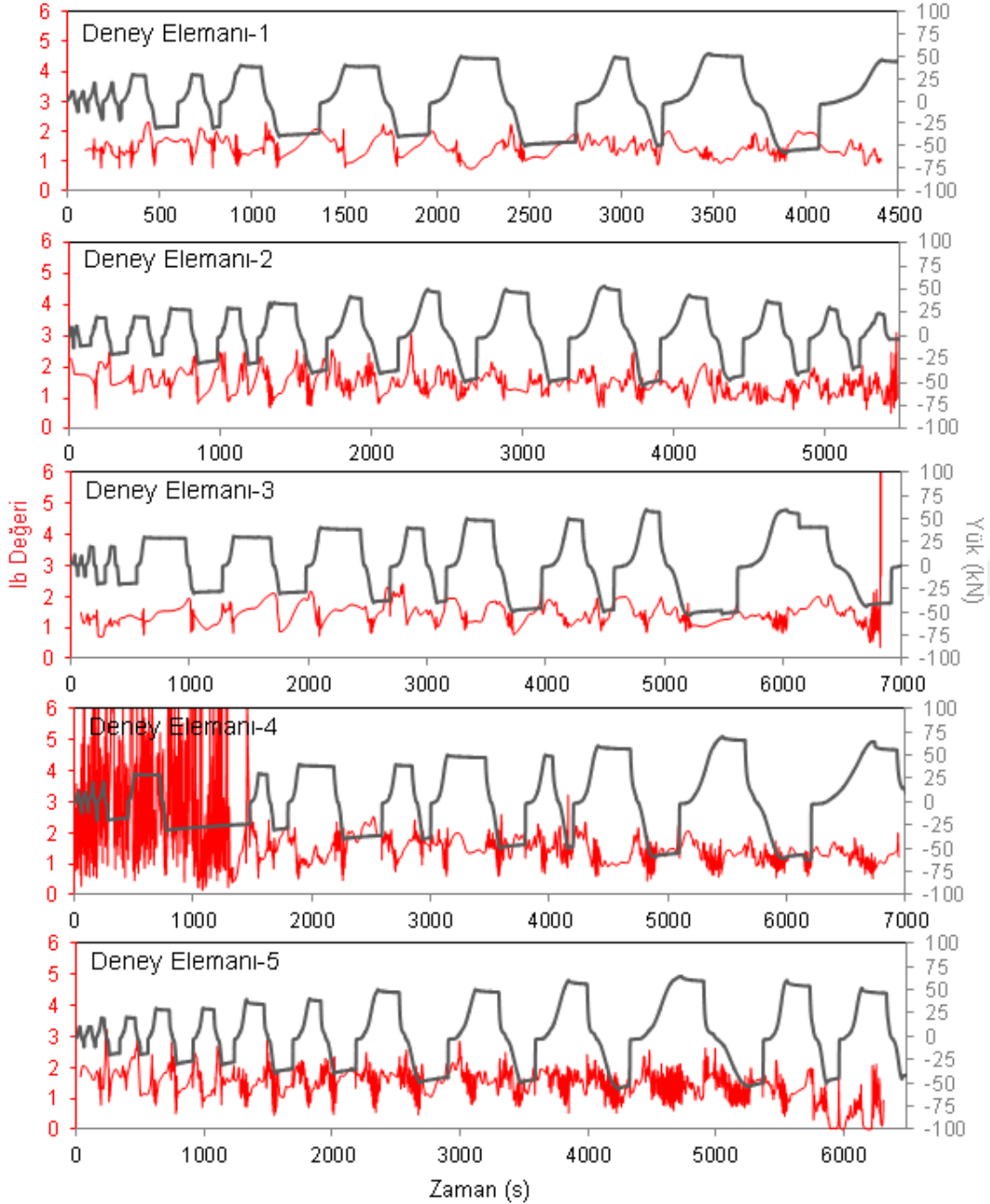
Kiriş-kolon birleşimlerinin güçlendirilmesinin ve farklı güçlendirme türlerinin deney elemanlarında gelişen hasarların yerlerinin yanı sıra büyüklükleri ve ilerleyişlerine de katkısını belirlemek için literatürde çok sayıda kullanımı bulunan *Ib* (*Improved b*) değerleri denklem 12 ile hesaplanmıştır. Deney elemanlarına ilişkin *Ib* değeri sonuçları Şekil 4.46 ve 4.47’de verilmiştir. *Ib* değeri, AE genlik dağılımına ait ortalama (μ) ve standart sapma (σ) gibi istatistiki değerlerin göz önüne alınmasıyla hesaplanmaktadır. *Ib* değeri analizi ile gerilme altındaki malzemede meydana gelen AE aktivitelerinin şiddet dağılımları ölçeklendirilebilmektedir. Bu sayede çok sayıda küçük AE aktivitelerini yeni veya mikro çatlak oluşumu, az sayıda büyük AE aktivitelerini ise makro çatlak oluşumu olarak nitelendirmeye olanak sağlanmaktadır. Yöntemde 1.-100., 21.-120. şeklinde ilerleyen genlik değerlerini içeren gruplar için *Ib* değerleri hesaplanmaktadır. Zamana bağlı elde edilen *Ib* değerlerinde gözlenen değişimler hasar ile ilişkilendirilebilmektedir.

$$Ib=20(\log_{10}N_1-\log_{10}N_2)/(a_2-a_1) \quad (12)$$

Burada a_1 , ($\mu-\sigma$)’den küçük en büyük genlik değerini, a_2 , μ ’den büyük en küçük genlik değerini, N_1 , a_1 ’den büyük genliğe sahip AE vuruş sayısını, N_2 ise a_2 ’den büyük genliğe sahip AE vuruş sayısını ifade etmektedir.

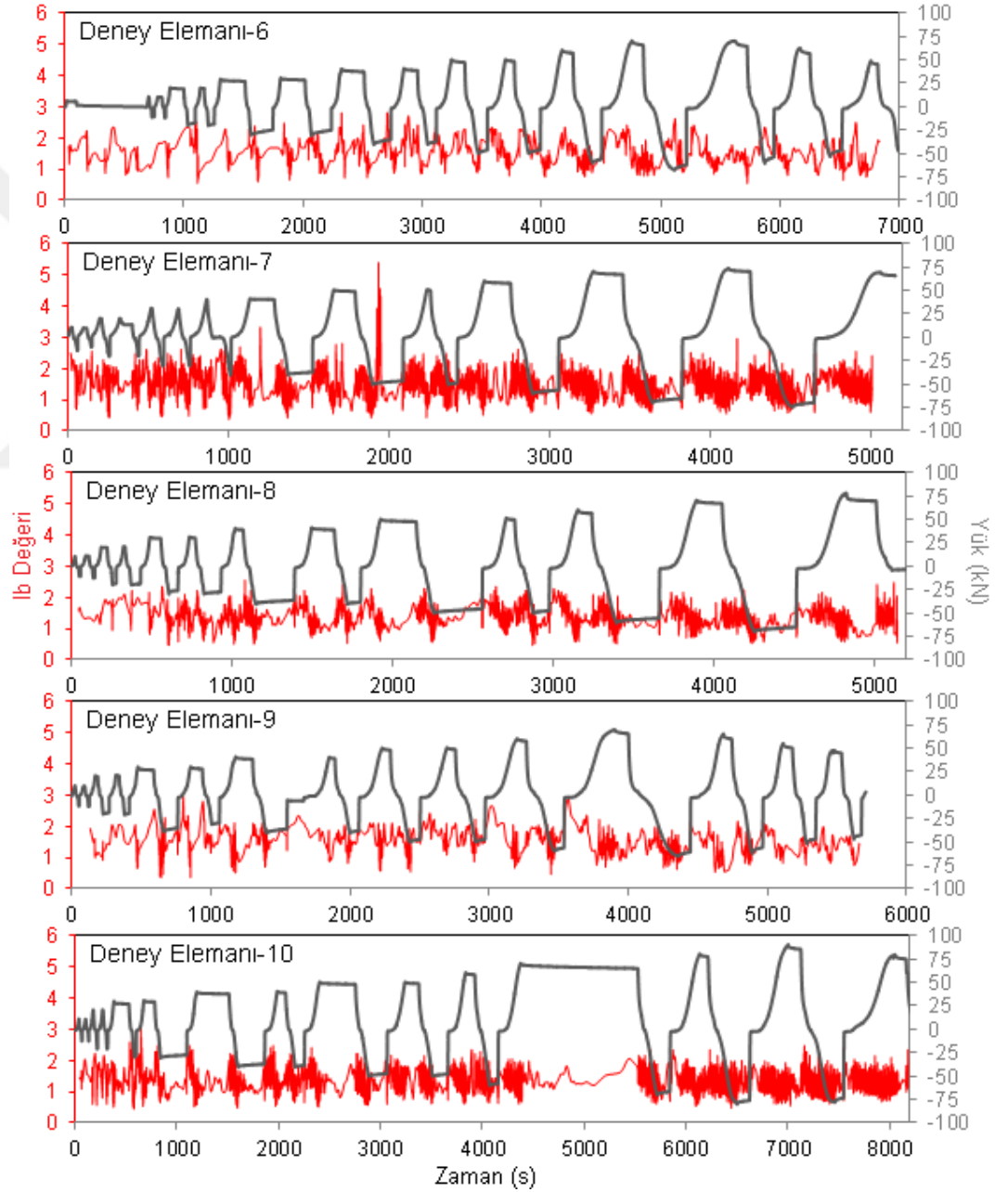
Şekil 4.47 incelendiğinde, yüksek *Ib* değerlerinin görüldüğü bölgelerde çok sayıda düşük genlikli AE vuruşlarının oluştuğu görülmektedir. Bu da yeni veya mikro çatlak oluşumlarının başladığını göstermektedir. Düşük *Ib* değerlerinin görüldüğü bölgelerde ise az sayıda yüksek genlikli AE vuruşlarının oluştuğu görülmüştür. Bu da makro çatlak gelişimlerinin oluştuğunu göstermektedir. Deney Elemanı-1’de 181., 281. ve 785. saniyelerde minimum *Ib* değerleri görülmüştür. Bu saniyeler sırasıyla 3. Çevrim (-20 kN’un ilk çevrimi), 4. Çevrim (-20 kN’un ikinci çevrimi) ve 6. Çevrim (-30 kN’un ikinci çevrimi)’e denk gelmektedir. Bu zamanlarda AE enerji ve genlik değerlerinde ani artışlar oluştuğu gözlenmiştir. Deney Elemanı 3’de 251. 612. ve 2090. saniyelerde minimum *Ib* değerleri görülmüştür. Bu saniyeler sırasıyla 3. Çevrim (-20 kN’un ilk çevrimi), 5. Çevrim (+30 kN’un ilk çevrimi) ve 7. Çevrim (+40 kN’un ilk çevrimi)’e denk gelmektedir. Bu zamanlarda AE enerji ve genlik değerlerinde ani artışlar oluştuğu gözlenmiştir. Deney Elemanı-1’de *Ib* değeri alt sınırı 0.75 iken, Deney elemanı-3’te bu değer 0.70 civarındadır. Bu da Deney Elemanı-3’ün, Deney Elemanı-1’e

göre daha fazla hasar aldığı göstermektedir. Deney Elemanı-3'ün düğüm noktası kesme yetersizliğine sahip olduğu için hasar fazlalığı beklenen bir durumdur. Deney Elemanı-4'te 925., 1886. ve 2259. saniyelerde minimum Ib değerleri görülmüştür. Bu saniyeler sırasıyla 5. Çevrim (-30 kN'un ilk çevrimi), 7. Çevrim (+40 kN'un ilk çevrimi) ve 7. Çevrim (-40 kN'un ilk çevrimi)'e denk gelmektedir. Bu zamanlarda AE enerji ve genlik değerlerinde ani artışlar oluşmuştur.



Şekil 4.47. Deney elemanlarının Ib değerleri (Deney Elemanı-1, 2, 3, 4 ve 5)

Deney Elemanı-5’de 780., 1548. ve 2014. saniyelerde minimum Ib değerleri görülmüştür. Bu saniyeler sırasıyla 5. Çevrim (-30 kN’un ilk çevrimi), 7. Çevrim (-40 kN’un ilk çevrimi) ve 8. Çevrim (-40 kN’un ikinci çevrimi)’e denk gelmektedir. Bu zamanlarda AE enerji ve genlik değerlerinde ani artışlar olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.48 incelendiğinde, Deney Elemanı-8’de 600., 1011. ve 1138. saniyelerde minimum Ib değerleri görülmüştür. Bu saniyeler sırasıyla 5. Çevrim (-30 kN’un ilk çevrimi), 7. Çevrim (+40 kN’un ilk çevrimi) ve 7. Çevrim (-40 kN’un ilk çevrimi)’e denk gelmektedir. Bu zamanlarda AE enerji ve genlik değerlerinde ani artışlar oluşmuştur.



Şekil 4.48. Deney elemanlarının Ib değerleri (Deney Elemanı-6, 7, 8, 9 ve 10)

Deney Elemanı-9'da 642., 854. ve 1178. saniyelerde minimum Ib değerleri görülmüştür. Bu saniyeler sırasıyla 5. Çevrim (-30 kN'un ilk çevrimi), 6. Çevrim (+30 kN'un ikinci çevrimi) ve 7. Çevrim (+40 kN'un ilk çevrimi)'e denk gelmektedir. Bu zamanlarda AE enerji ve genlik değerlerinde ani artışlar oluştuğu gözlenmiştir. Deney Elemanı-10'da 574., 1190. ve 1593. saniyelerde minimum Ib değerleri görülmüştür. Bu saniyeler sırasıyla 5. Çevrim (-30 kN'un ilk çevrimi), 7. Çevrim (+40 kN'un ilk çevrimi) ve 7. Çevrim (-40 kN'un ilk çevrimi)'e denk gelmektedir. Bu zamanlarda AE enerji ve genlik değerlerinde ani artışlar oluştuğu gözlenmiştir.

Deney Elemanı-4'te Ib değeri alt sınırı 0.41, Deney Elemanı-5'te 0.45, Deney Elemanı-8'de 0.48, Deney Elemanı-9'da 0.35 değerlerindedir. CFRP ile güçlendirilmiş elemanlar içerisinde en çok hasar alan eleman Deney Elemanı-9'dur. Deney Elemanı-9'un düğüm noktası CFRP ile sarılmadığı için bu beklenen bir durumdur. CFRP ile güçlendirilmiş elemanlarda çatlaklar ile birlikte fiber aktiviteleri de meydana geldiği için Ib değeri değişimi çok sık olmaktadır. Böylece CFRP sayesinde hasar oluşumunda ani değişimler önlenmektedir. Ani değişimler önlenerek kesme hasarlarının azalması sağlanmıştır. Çapraz şekilli CFRP şeritler ile güçlendirilen elemanlarda, tamamen CFRP ile güçlendirilen elemana göre Ib değeri yoğunluğu daha geç zamanlarda oluşmuştur. Bu çatlak yoğunluğunun daha geç bir sürede arttığını göstermektedir. Ayrıca tamamen CFRP ile sarılı olan elemanlarda, Ib değeri alt sınıra daha hızlı ulaşmıştır. Böylece bu elemanlarda büyük aktivitelerin daha erken oluşmaya başladığı görülmüştür. Birleşim noktası tamamen CFRP ile sarılı Deney Eleman-8 ile CFRP ile sarılı ancak birleşim noktası boş Deney Elemanı-9 karşılaştırıldığında ise büyük değer düşük yük seviyelerinde olmasına rağmen, Deney Elemanı-8'de çatlak oluşumları daha yoğun bir şekilde meydana gelmiştir.

Deney Elemanı-6'nın Ib değeri alt sınırı 0.54 iken Deney Elemanı-7'nin Ib değeri alt sınırı 0.36 değerindedir. Birleşim bölgesinde içten donatı ankrajı ile güçlendirilen deney elemanları arasında Deney Elemanı-7, Deney Elemanı-6'ya göre daha fazla hasar almıştır. Deney Elemanı-7 minimum Ib değerlerine daha erken ulaşmıştır ve Ib değerleri çok sık minimum değerlere düşmektedir. Böylece Deney Elemanı-7'de çatlak yoğunluğunun ve oluşan çatlakların Deney Elemanı-6'ya göre daha fazla olduğu görülmüştür. Yani birleşim bölgesinde içten donatı ankrajı ile güçlendirilen Deney Elemanı-7, içten firkete şeklinde donatı ile güçlendirilen Deney Elemanı-6'ya göre daha fazla hasar almıştır.

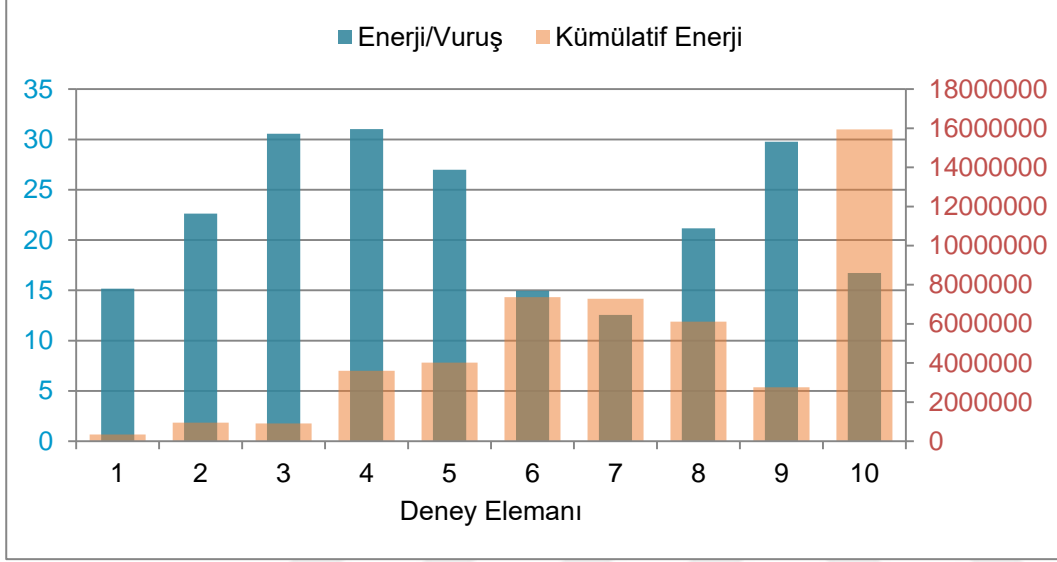
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

5.1 Bulguların Değerlendirilmesi

Şekil 5.1’de verildiği üzere tüm deney elemanlarının kümülatif AE enerjileri karşılaştırıldığında en düşük enerji Deney Elemanı-1’de, en yüksek enerji ise Deney Elemanı-10’da salınmıştır. Deney Elemanı-1 tüm numunede etriyeye sahip hedef numune olup, sadece betondaki çatlama aktivitelerinin saldıgı AE enerjilerine sahip olduğundan en düşük değere bu elemanda rastlanmıştır. Deney Elemanı-2 tüm numuneden, Deney Elemanı-3 ise sadece kolon-kiriş birleşim bölgesinden kesme zayıflığına sahip ancak Deney Elemanı-1’de olduğu gibi sadece çatlak aktiviteleri içerdiklerinden bu elemanlarda diğer deney elemanlarına göre düşük AE salınımları gözlenmiştir. Ancak bu elemanlar daha çok hasar gördükleri için Deney Elemanı-1’den daha yüksek AE enerjileri salmışlardır. Deney Elemanı-4’ten itibaren farklı yöntemlerle güçlendirilen zayıf numunelerde meydana gelen ekstra AE aktiviteleri, kümülatif AE enerjilerinin de ilk üç numuneden çok daha yüksek değerlerde seyretmesine sebep olmuştur. Bu elemanlar arasında en düşük toplam AE enerjisi çapraz CFRP ile güçlendirilmiş Deney Elemanı-4’te salınmış olup, Deney Elemanı-5’te U şeklinde sarılması sonucu CFRP malzemenin hasara daha çok direnebilmesi sebebiyle kümülatif AE enerjisi de yükselmiştir. Sırasıyla dıştan ve içten çapraz ankrajlarla güçlendirilen Deney Elemanı-6 ve Deney Elemanı-7’de ise toplam AE enerjisi değerleri hemen hemen aynıdır. Birleşim bölgesinde CFRP bulunmayan Deney Elemanı-9 ise, birleşim bölgesinde CFRP bulunan Deney Elemanı-8’e göre daha az kümülatif AE enerjisi salmıştır. Tüm deney elemanları arasında en yüksek AE enerjisi salınımına sahip Deney Elemanı-10 ise çelikle güçlendirilmiş numunedir.

Yalnızca elemanlarda deney boyunca salınan toplam AE enerjisinin incelenmesi eksik bir değerlendirmeye sebep olabilmektedir. Bu nedenle deneylerde oluşan toplam AE aktivitesinin salınan enerjiyle ilişkisini yorumlamak adına AE vuruşu başına düşen enerji miktarları hesaplanmış ve bu değerler de karşılaştırılmıştır. Her ne kadar Deney Elemanı-10 en yüksek AE enerjisini salmış olsa da, bu elemanda AE vuruşu başına düşen enerji miktarı oldukça düşüktür. Bu durum çelik güçlendirme ile çok daha düşük enerjili ve mikro ölçekli hasarlar elde edilebildiğini göstermektedir. Deney Elemanı-4, Deney Elemanı-5 ve Deney Elemanı-8 karşılaştırıldıklarında, çapraz ve kolonda düz devam eden, yalnızca düğüm noktasında çapraz şeklinde ve tam CFRP ile güçlendirme arasında en az enerjili hasarlar tam CFRP ile sarımda elde edilmiştir. Çapraz ankrajla

güçlendirilmiş Deney Elemanı-6 ve Deney Elemanı-7’de ise neredeyse aynı toplam AE enerjisi salınmışken, AE vuruşu başına düşen enerji değerleri de benzer olmuştur. Vuruş başına düşen enerji değerlerinin küçük olması çok sayıda daha mikro düzeyde aktivite olduğunu göstermektedir. Ayrıca Deney Elemanı-9’da görüldüğü üzere birleşim bölgesinde CFRP bulunmaması, hasar ölçeğini makro düzeye kaydırmış ve vuruş başına düşen AE enerjisi oranı yükselmiştir.



Şekil 5.1. Deney elemanlarının karşılaştırmalı kümülatif ve bir vuruş başına düşen AE enerjisi salınımları

Tüm bu durumlar öncelikle istenilen kapasitedeki bir betonarme kolon-kiriş birleşiminin tersinir tekrarlı yükleme altında çok daha az AE enerjisi saldıgını göstermektedir. Birleşimin zayıf olması ve çok daha fazla hasar görmesi ile ise daha fazla AE enerjisi salınmaktadır. Zayıf birleşimlerin güçlendirilmesi ile her ne kadar elemanlarda kapasite artışı meydana gelse ve hasar miktarları düşse de, güçlendirme malzemelerinin yüke karşı hasarı önlemek için gösterdiği direnç sebebiyle oluşan ekstra gerilmeler, çok daha fazla AE olayı ve enerjisinin salınmasına sebep olmaktadır. Kullanılan güçlendirme malzemeleri arasında ise CFRP toplamda daha az, vuruş başına daha çok; çelik ise toplamda daha fazla, vuruş başına daha az AE enerjisi salmaktadır.

Kaynak konumlandırma ve SIGMA analizleri sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde güçlendirme ile davranışın iyileştirilmesiyle daha fazla sayıda fakat mikro seviyede çatlaklar oluşurken, güçsüz numunelerde daha az sayıda fakat makro seviyede çatlak oluşmaktadır. Çatlakların mikro seviyede kalması numunenin daha çok enerji sönmemesine sebep olmakta ve eleman

daha sünek davranmaktadır. Numunenin düğüm noktasının yeterince güçlü olması Deney Elemanı-6, 8 ve 10'da olduğu gibi AE kaynaklarının kiriş bölgesinde daha fazla görülmesine sebep olmaktadır. CFRP ile güçlendirilen elemanlarda liflerin kopması ve CFRP'nin yüzeyden ayrılması ayrıca AE kaynağı oluşturmaktadır. Özellikle ileri yük seviyelerinde bu aktiviteler artmaktadır. AE kaynak konumlandırma sonuçları bu doğrultudadır.

SİGMA analizlerinde 8 sensöre birden gelen veriler bir AE olayı olarak kabul edildiğinden, daha az sayıda AE kaynağı gözlenebilmektedir. Fakat bu değerler en güvenilir değerlerdir. Deney elemanlarının AE davranışı açısından mutlaka tutarsız oldukları yanlar da vardır ve bu olumsuz durum deney numunelerinin üretimi esnasındaki işçilik hatalarından, deney esnasında sensörün altına büyük bir çatlak girdiğinde sensörün veri alamamasından gibi sebeplerden kaynaklanabilmektedir. AE-SİGMA sonuçlarına göre deney elemanlarında ilk çatlaklar öncelikli olarak numune iç bölgesinde gözlenmektedir. Tersinir yüklemeye maruz kalan konsol kirişte basınç ve çekme bölgeleri yükün yönüne göre değişim göstermektedir. Artan yükler altında içsel basınç gerilmesine maruz kalan bölgede, öncelikle betonun basınç dayanımının aşılmasıyla kiriş iç bölgesinde çatlak oluşumları gözlenmeye başlanmaktadır. Zayıflayan bu kesitte diğer yönde yükleme gerçekleştirildiğinde, basınç gerilmesi nedeniyle oluşan çatlaklara dik çekme çatlakları gelişmektedir. Bu çatlaklar artan yüklerin etkisiyle kiriş yan yüzlerine doğru ilerleyerek kiriş gövdesinde eğik çatlak oluşumlarına neden olmaktadır. Çatlakların gelişim yönleri güçlendirme düzeni ve uygulama şekline bağlı olarak farklılık göstermektedir. CFRP ile güçlendirilen elemanlarda ileri yük seviyelerinde CFRP ile betonun arasındaki çekme gerilmelerinin artması ekstra çekme çatlaklarına sebep olmaktadır. Gerilmelerin yoğunlaştığı bu bölgede ileri yük seviyelerindeki çekme aktivitelerinin artması CFRP'nin yüzeyden ayrılacağına işaret etmektedir. CFRP liflerin kopması ise kesme aktivitesi gibi algılanmaktadır. Özellikle Deney Elemanları-4 ve 5'te bu durum gözlenmiştir. CFRP ile güçlendirilen elemanlarda, ilk eğik çatlaklar göbek betonunda gelişmekte, çatlaklar CFRP şeritler ile kesiştiğinde gelişimleri sona ermektedir. Ancak yük düzeyi yükseldikçe çatlağın CFRP şeritle kesiştiği kesitteki dayanım azalmakta, çatlak gelişimine bu kesitte, CFRP şeridin altında devam etmektedir. CFRP şerit genişliği artıkça, CFRP şeritlere aktarılan eğik çekme gerilmeleri daha fazla lif tarafından karşılanmakta böylece çatlak gelişimine devam edememektedir. CFRP şerit genişliği çatlak gelişimini engelleyecek büyüklükte değilse çatlak CFRP şeridin altından gelişerek, ilerlemekte, gelişimine bu kesitte devam etmektedir. Yük düzeyi yükseldikçe eleman, zayıflayan bu kesitte gelişen

kesme çatlağı nedeni ile göçmektedir. Bu sebeple CFRP ile kolon bölgesi de sarılan Deney Elemanı-4, Deney Elemanı-5'e göre daha iyi performans göstermiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre CFRP şeritlerle güçlendirme yönteminin en önemli eksikliği CFRP şeritlerin beton yüzeyinden soyulması ile gerçekleşen göçmedir.

Kaynak konumlandırma ve SiGMA analizi, her yük seviyesine karşılık gelen aktivitelerin belirlenmesinde, özellikle tüm yüzeyi güçlendirme malzemesi ile sarılı elemanlarda gözle çatlaklar gözlenemediğinden önem arz etmektedir.

AE aktivitelerinin genlik parametrelerine uygulanan I_b değeri analizi ile görülmektedir ki, CFRP ile güçlendirilmiş elemanlarda çatlaklar ile birlikte fiber aktiviteleri de meydana geldiği için aktivite oluşumu çok sık olmaktadır. Böylece CFRP sayesinde hasar oluşumunda ani değişimler önlenmektedir. Bu da ani değişimlerin önlenerek kesme hasarlarının azaltılabildiğini göstermektedir. CFRP ile güçlendirilen elemanlar arasında en çok hasar alan ise birleşim bölgesi boş bırakılan Deney Elemanı-9'dur. Ayrıca birleşim bölgesinde içten donatı ankrajı ile güçlendirilen Deney Elemanı-7, içten firkete şeklinde donatı ile güçlendirilen Deney Elemanı-6'ya göre daha fazla hasar almıştır.

5.2 Sonuçlar Ve Öneriler

- Kaynak konumlandırma ve SiGMA analizleri sonuçları göstermektedir ki güçlendirme ile davranışın iyileştirilmesiyle daha fazla sayıda fakat mikro seviyede çatlaklar oluşurken, güçsüz numunelerde daha az sayıda fakat makro seviyede çatlak oluşmaktadır. Çatlakların mikro seviyede kalması numunenin daha çok enerji sönmemesine sebep olmakta ve eleman daha sünek davranmaktadır.
- SiGMA sonuçlarına göre CFRP ile güçlendirilen elemanlarda ileri yük seviyelerinde CFRP ile betonun arasındaki çekme gerilmelerinin artması ekstra çekme çatlaklarına sebep olmaktadır. Gerilmelerin yoğunlaştığı bu bölgede ileri yük seviyelerindeki çekme aktivitelerinin artması CFRP'nin yüzeyden ayrılacağına işaret etmektedir.
- Numunenin düğüm noktasının yeterince güçlü olması Deney Elemanı-6, 8 ve 10'da olduğu gibi AE kaynaklarının giriş bölgesinde daha fazla görülmesine sebep olmaktadır.

- Tüm deney elemanlarının kümülatif AE enerjileri karşılaştırıldığında en düşük enerji Deney Elemanı-1'de, en yüksek enerji ise Deney Elemanı-10'da salınmıştır.
- Toplam AE aktivitesinin salınan enerjiyle ilişkisini yorumlamak adına AE vuruşu başına düşen enerji miktarlarına bakıldığında her ne kadar Deney Elemanı-10 en yüksek AE enerjisini salmış olsa da, bu elemanda AE vuruşu başına düşen enerji miktarı oldukça düşüktür. Bu durum çelik güçlendirme ile çok daha düşük enerjili ve mikro ölçekli hasarlar elde edilebildiğini göstermektedir.
- AE aktivitelerinin genlik parametrelerine uygulanan Ib değeri analizi ile görülmektedir ki, CFRP ile güçlendirilmiş elemanlarda çatlaklar ile birlikte fiber aktiviteleri de meydana geldiği için aktivite oluşumu çok sık olmaktadır. Böylece CFRP sayesinde hasar oluşumunda ani değişimler önlenmektedir. Bu da ani değişimlerin önlenerek kesme hasarlarının azaltılabildiğini göstermektedir.
- Ib değerleri kıyaslandığında çapraz şekilli CFRP şeritler ile güçlendirilen elemanlarda, tamamen CFRP ile güçlendirilen elemana göre Ib değeri yoğunluğu daha geç zamanlarda oluşmuştur. Bu çatlak yoğunluğunun daha geç bir sürede arttığını göstermektedir. Ayrıca tamamen CFRP ile sarılı olan elemanlarda, Ib değeri alt sınıra daha hızlı ulaşmıştır.
- Deney Elemanı-7 minimum Ib değerlerine daha erken ulaşmıştır ve Ib değerleri çok sık minimum değerlere düşmektedir. Böylece Deney Elemanı-7'de çatlak yoğunluğunun ve oluşan çatlakların Deney Elemanı-6'ya göre daha fazla olduğu görülmüştür. Böylece birleşim bölgesinde içten donatı ankrajı ile güçlendirilen Deney Elemanı-7, içten firkete şeklinde donatı ile güçlendirilen Deney Elemanı-6'ya göre daha fazla hasar almıştır.
- Çalışma sonucunda güçlendirme yöntemleri değerlendirildiğinde en iyi sonucu çelik plakalarla güçlendirme vermiştir. Sonrasında ise CFRP ile güçlendirmenin de oldukça etkin bir yöntem olduğu söylenebilir. Aktif çatlakların görüntülenmesinde AE oldukça kullanışlı bir yöntemdir. AE ile

hasar izleme, özellikle önemi büyük olan yapılarda taşıyıcı sistemin kritik noktalarına sensörlerin yerleştirilmesi ve zaman zaman elde edilen verilerin değerlendirilmesi suretiyle sürekli durum izleme şeklinde yapılabilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alver N., Tanarlan H.M., Sülün Ö.Y., Ercan E., Karcılı M., Selman E., Ohno K.,** 2014, Effect of CFRP-spacing on fracture mechanism of CFRP-strengthened reinforced concrete beam identified by AE-SiGMA, *Construction and Building Materials*, 67:146-156 pp.
- Behnia A., Chai H.K., Shiotani T.,** 2014, Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 65:282-302 pp.
- Benavent A., Castro E., Gallego A.,** 2010, Evaluation of low-cycle fatigue damage in RC exterior beam-column subassemblages by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 24:1830-1842 pp.
- Ma G., Li H.,** 2017, Acoustic emission monitoring and damage assessment of FRP-strengthened reinforced concrete columns under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 144:86-98 pp.
- NDT Resource Center,** “A Brief History of AE Testing”, https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_History.php (Erişim Tarihi: 24 Mart 2019)
- NDT Resource Center,** “Theory-AE Sources”, https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Theory-Sources.php (Erişim Tarihi: 24 Mart 2019)
- Ohno K., Ohtsu M.,** 2010, Crack classification in concrete based on acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 24:2339-2346 pp.
- Ohtsu M.,** 2009, Acoustic emission theory for moment tensor analysis, *Research in Nondestructive Evaluation*, 6(3):169-184 pp.
- Ohtsu M.,** 2015, Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete, *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 57*.

- Ohtsu M., Kaminaga Y., Munwam M.C.**, 1999, Experimental and numerical crack analysis of mixed-mode failure in concrete by acoustic emission and boundary element method, *Construction and Building Materials*, 1999, 13: 57-64 pp.
- Ohtsu M., Kawasaki Y.**, 2010, AE-SiGMA Analysis in Brazilian Test and Accelerated Corrosion Test of Concrete, EWGAE 2010 Vienna, 29th European Conference on Acoustic Emission Testing, Vienna.
- Ohtsu M., Ohno K., Tokai M.**, 2007, Visualized NDT for concrete cracking by AE-SiGMA and SIBIE, NDT for Safety, 4th International Workshop NDT in Progress, Prague.
- Sagasta F., Zitto M.E., Piotrkowski R., Benavent-Climent Amadeo., Suarez E., Gallego A.**, 2018, Acoustic emission energy b-value for local damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to seismic loading, *Construction and Building Materials*, 102:262-277 pp.
- Selman E., Ghiami A., Alver N.**, 2015, Study of fracture evolution in FRP-strengthened reinforced concrete beam under cyclic load by acoustic emission technique: An integrated mechanical-acoustic energy approach, *Construction and Building Materials*, 95:832-841 pp.
- The American Society for Nondestructive Testing**, "Introduction to NondestructiveTesting",
<https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT>
(Erişim Tarihi: 24 Mart 2019)
- Türk E.**, 2019, Güçlendirilmiş betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin mekanik davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 173 s. (yayınlanmamış)
- Uddin A.K.M.F., Numata K., Shimasaki J., Shigeishi M., Ohtsu M.**, 2004, Mechanism of crack propagation due to corrosion of reinforcement in concrete by AE-SiGMA and BEM, *Construction and Building Materials*, 18:181-188 pp.

Yue J., 2015, Damage prediction in RC columns under low-cyclic loading using AE monitoring technique, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78: 110-115 pp.





TEŞEKKÜR

Tez çalışmam aşamasında; çalışmalarımın yönlendirilmesinde, şekillendirerek sonuçlandırılmasında her zaman yanımda olan, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşıp yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Ninel ALVER'e ve çalışmalarım süresince bilgi birikimleri ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, her konuda desteğini her zaman hissettiren kıymetli hocalarım Sayın Doç. Dr. Emre ERCAN ve Arş. Gör. Sena TAYFUR'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi bu tez çalışması döneminde de maddi ve manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

315M084 numaralı 1001 projesi ile bu çalışmaya sağladığı desteği için ve bilimin ve bilim insanının destekçisi olan TÜBİTAK'a bilime olan katkılarından dolayı şükranlarımı sunarım.

20 / 05 / 2019

Mustafa MENTEŞOĞLU



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılı Denizli ili doğumlu olup, öğrenim hayatını sırasıyla Ahmet Nuri Özsoy İlköğretim Okulu, Denizli Anadolu Lisesi ve Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. 2011 yılında başladığı lisans eğitimini 2016 yılında bitirerek aynı yıl İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı'nda lisansüstü eğitime başlamıştır. Lisansüstü eğitimi süresince yürütücülüğünü Doç. Dr. Ninel Alver'in yaptığı "Güçlendirilmiş Betonarme Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Kırılma Mekanizmalarının ve Hasar Durumlarının Akustik Emisyon ve Elastik Dalga Hızı Tomografi Yöntemleriyle Belirlenmesi" adlı TÜBİTAK projesinde bursiyer olarak görev yapmıştır.

