T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

AKUSTİK EMİSYON PARAMETRELERİNİN DÜZELTİLMESİNİN BETONDA HASAR TESPİTİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Sena TAYFUR

Danışman: Doç. Dr. Ninel ALVER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Doktora Programı

İzmir
2021

Sena TAYFUR tarafından doktora tezi olarak sunulan “Akustik emisyon parametrelerinin düzeltilmesinin betonda hasar tespiti üzerindeki etkisi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 22/02/2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:		İmza
Jüri Başkanı	: Doç. Dr. Ninel ALVER	.....
Raportör Üye	: Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU	.....
Üye	: Prof. Dr. Necati ÇATBAŞ	.....
Üye	: Prof. Dr. Yeliz PEKBEY	.....
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk SAATCI	.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum "Akustik Emisyon Parametrelerinin Düzeltilmesinin Betonda Hasar Tespiti Üzerindeki Etkisi" başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, 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.

22/02/2021

İmzası

Sena TAYFUR

ÖZET

AKUSTİK EMİSYON PARAMETRELERİNİN DÜZELTİLMESİNİN BETONDA HASAR TESPİTİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

TAYFUR, Sena

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ninel ALVER

Şubat 2021, 133 sayfa

Bu tez çalışmasında, betonun heterojen yapısından kaynaklanan sönümleyiciliğinin Akustik Emisyon (AE) tekniği ile hasar tespitine etkilerini ortadan kaldırmak için üç boyutlu Parametre Düzeltme Tekniği (3D-PCT) geliştirilmiş ve beton ve betonarmede ilk uygulamaları gerçekleştirilmiştir. 3D-PCT AE parametrelerinin malzemenin sönümleyicilik özelliklerine göre düzeltilmesini sağlamaktadır. Ayrıca tezde hasar konumlandırma için bu durumu göz önünde bulunduran bir iyileştirme yapılmıştır.

Çalışma kapsamında sekiz adet standart eğilme elemanı ve dört adet betonarme kiriş üretilmiştir. Standart eğilme elemanlarında betonun heterojenliği deneysel değişken olarak belirlenmiş; beton, çimento harcı ve fiber içeren beton numuneler incelenmiştir. Betonarme kirişler ise kesme ve eğilme zayıflığına sahip referans kirişler ile CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerdir. 3D-PCT'nin ilk uygulamaları eğilme deneylerinin öncesinde gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarının sönümleyici özelliklerini ortaya koyan üç boyutlu kontur haritaları oluşturulmuş, parametre düzeltme ilişkileri kurulmuş, eğilme deneyleri sırasında kaydedilen AE aktiviteleri konumlandırılmış ve sinyal parametreleri düzeltilmiştir. Deneyler sırasında gözlenen mekanik bulgular ile ham ve düzeltilen AE parametrelerine uygulanan AE analizi sonuçları değerlendirilerek, parametre düzeltmenin betonda AE ile hasar tespitine etkileri ortaya konmuştur.

Anahtar sözcükler: Akustik Emisyon (AE), 3 boyutlu Parametre Düzeltme Tekniği (3D-PCT), Hasar Tespiti, Beton.

ABSTRACT

EFFECT OF ACOUSTIC EMISSION PARAMETER CORRECTION ON DAMAGE DETECTION IN CONCRETE

TAYFUR, Sena

PhD in Civil Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ninel ALVER

February 2021, 133 pages

In this thesis, 3D Parameter Correction Technique (3D-PCT) has been developed to eliminate the effects of attenuative features of concrete on damage detection with Acoustic Emission (AE) technique due to its heterogeneous structure and the first applications of the technique have been carried out on concrete and reinforced concrete members. 3D-PCT provides to correct AE parameters according to attenuation properties of the material. In addition, an improved damage localization algorithm has been developed taking this situation into account in the thesis.

Within the scope of the study, eight standard beam members and four reinforced concrete beams were produced. Heterogeneity of concrete was selected as an experimental variable; plain and fiber-added concrete and cement mortar specimens were examined. Reinforced concrete beams consisted of shear- and flexural-deficient beams and their CFRP-strengthened versions. The first applications of 3D-PCT were carried out before the bending tests. 3D contour maps showing attenuation properties of the specimens were created, parameter correction relationships were established, AE activities recorded during the bending tests were localized and signal parameters were corrected. By evaluating the mechanical findings from AE analysis results applied on raw and corrected AE parameters, effects of parameter correction on the AE damage detection in concrete were revealed.

Keywords: Acoustic Emission (AE), 3D Parameter Correction Technique (3D-PCT), Damage Detection, Concrete.

ÖNSÖZ

Tahribatsız yöntemler yapı elemanlarına zarar vermeden kullanıcıya gözle görülmeyen hasarlar hakkında tümsel bilgi alma olanağı sunan hasar tespit yöntemleridir. Bu yöntemlerden olan ve inşaat mühendisliği alanında da yaygın kullanılan Akustik Emisyon (AE) yöntemi, gerilme kaynağı sebebiyle oluşan elastik dalgaların malzeme içerisinde yayılması, yüzeye yerleştirilen sensörler tarafından algılanması ve sinyale dönüştürülerek çeşitli tekniklerle işlenip analiz edilmesi temeline dayanmaktadır. AE ile inşaat mühendisliğinin temel malzemelerinden olan betonda düşük yük seviyelerinde bile çatlakların konumları, oluşma zamanları ve gelişimleri hakkında detaylı bilgi edinilebilmektedir.

Hasarlarla ilgili bu bilgilere ulaşılması, AE dalga formuna ait sinyal parametrelerinin işlenip analiz edilmesi ile mümkündür. Bu sebeple elde edilen AE parametrelerinin doğruluğu betonun hasar durumunu gerçekçi belirlemeyi doğrudan etkilemektedir. Betonun heterojen yapısı içerisinde yayılan elastik dalgaların sönümlenmesine ve dispersiyonuna sebep olmaktadır. Bu durum betondaki hasarların AE ile tespitinde bir dezavantaj oluşturmakta ve çözülmesi gereken önemli bir sorun olarak varlığını sürdürmeye devam etmektedir.

Bu tez çalışması ile literatürdeki çalışmalardan farklı olarak 3 boyutlu Parametre Düzeltme Tekniği (3D-PCT) geliştirilmiş ve tekniğin beton ve betonarmede ilk uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürde yer alan hasar konumlandırma algoritmasına bu durumu göz önünde bulunduran bir iyileştirme yapılmıştır. Deneyler sırasında gözlenen mekanik bulgular ile AE'ye yapılan bu iyileştirmeler değerlendirilmiş ve AE ile betonda hasar tespitinde bir gelişme sağlanmıştır.

İZMİR

22/02/2021

Sena TAYFUR

İÇİNDEKİLER

ÖZET vii
ABSTRACT ix
ÖNSÖZ xi
İÇİNDEKİLER xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ xv
ÇİZELGELER DİZİNİ xxiii
1. GİRİŞ 1
2. YÖNTEM 3
2.1. Akustik Emisyon (AE) 3
2.1.1 AE parametreleri 5
2.1.2. AE analizleri 6
2.1.2.1. Parametre tabanlı analiz 6
2.1.2.2. Sinyal tabanlı analiz 9
2.2. Üç Boyutlu Parametre Düzeltme Tekniği (3D-PCT) 13
2.3. Örüntü Tanımanın AE ile Hasar Tespitinde Kullanımı 15
3. LİTERATÜR TARAMASI 19
3.1. AE ile Betonda Hasar Tespitinin Güncel Uygulamaları 19
3.2. AE ile Hasar Tespitinde Karşılaşılan Sorunlar 28
4. AE VERİ ANALİZİ PROGRAMLARININ OLUŞTURULMASI 45
4.1. AE Veri Analizi Programları 45
4.1.1. Dalga hızı belirleme 45
4.1.2. Sinyal ayıklama 45
4.1.3. *I*b değeri hesabı 46
4.1.4. Sinyal varış zamanı hesabı 47
4.1.5. Hasar konumu ve oluşma zamanı hesabı 48
4.2. Hasar konumlandırma algoritmasının iyileştirilmesi 49

İÇİNDEKİLER (Devam)

4.3. 3D-PCT Programı 51

5. DENEYSEL ÇALIŞMA 55

5.1. Standart Beton Eğilme Deneyleri 55

5.1.1. Malzemeler 55

5.1.2. Deney elemanlarının üretimi 57

5.1.3. AE düzeneği 57

5.1.4. Yükleme düzeneği 61

5.2. Betonarme Kiriş Eğilme Deneyleri 61

5.2.1. Malzemeler 62

5.2.2. Deney elemanlarının üretimi 63

5.2.3. AE düzeneği 64

5.2.4. Yükleme düzeneği 66

6. BULGULAR 69

6.1. Standart Eğilme Deneyleri Bulguları 69

6.1.1. Mekanik bulgular 69

6.1.2. AE bulguları 71

6.1.3. 3D-PCT bulguları 79

6.2. Betonarme Kiriş Deneyleri Bulguları 88

6.2.1. Mekanik bulgular 88

6.2.2. AE bulguları 91

6.2.3. 3D-PCT bulguları 96

6.3. Ortak Bulgular ve Genel Değerlendirme 109

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 117

KAYNAKLAR DİZİNİ 121

TEŞEKKÜR 131

ÖZGEÇMİŞ 133

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. AE oluşumu ve algılanması. 3

Şekil 2.2. AE işlem sırası. 4

Şekil 2.3. AE parametreleri: a) zamana bağlı dalga, b)FFT spektrumu. 5

Şekil 2.4. Kaiser ve Felicity etkileri. 6

Şekil 2.5: AE tekniğinin veri gösterim tipleri. 7

Şekil 2.6. JCMS-IIIB5706 2003'e göre çatlak sınıflandırması. 8

Şekil 2.7. AIC fonksiyonu ile varış zamanı yakalanan bir AE sinyali. 10

Şekil 2.8. a) AE kaynağı ve sensörlerinin konumları, b) Sinyal formunda kaynak oluşumu ve *i.* sensöre varış süresi. 11

Şekil 2.9: Temel kırılma modları: a) mod I, b) mod II, c) mod III. 13

Şekil 2.10. Al-Jumaili et. al. (2014)'da kullanılan iki boyutlu PCT metodolojisi: a) PCT ağı, b) PCT ağında yapay kaynaklardan elde edilen genlik dağılımı, c) her sensöre ait genlik haritaları, d) farklı lokasyonlardaki PCT ilişkileri. 15

Şekil 3.1. SiGMA analizi ile AE aktivitelerinin konumlandırılması ve türlerinin belirlenmesi (Tayfur et. al., 2018). 20

Şekil 3.2. Beton kirişlerde AE ile belirlenen hasar değerinin deplasmanla ilişkisi (Nguyen-Tat et al., 2018). 21

Şekil 3.3. Tayfur et. al. (2018) tarafından AE aktivitelerinin çelik fiber aktivitesi ile beton matris çatlaması olarak PCA ile kümelendirilmesi. 21

Şekil 3.4. Matris çatlaması ve CFRP delaminasyonu hasarlarından elde edilen farklı frekanslara sahip AE sinyalleri (Aggelis et al., 2019). 22

Şekil 3.5. Ren et al. (2020) tarafından *T*-değeri ile oluşturulan betonda çatlak görselleri. 23

Şekil 3.6. Farklı fiber türleri içeren beton elemanlarda AE enerjisi ve kırılma enerjisi arasındaki korelasyon (Bhosale et al., 2019). 24

Şekil 3.7. Bir GFRP kirişin farklı yük seviyelerinde kaydedilen AE sinyallerinin ortalama frekans ve RA değeri ilişkileri (Dev et al., 2020). 24

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil 3.8. Goldaran and Turer (2020)'nin çalışmalarındaki AE aktivitelerine göre tanımladıkları ortalama frekans ve RA değerleri arasındaki ampirik ilişki. 25

Şekil 3.9. Korozyon oluşumu süresince zamana bağlı AE genliği ve enerjisi ilişkisi (Goldaran et al., 2020).....26

Şekil 3.10. Shadid et al. (2020)'ın korozyona maruz betonarme kirişlerin farklı yükleme setlerine göre elde ettikleri Felicity ve Durgunluk Oranları ilişkileri.....26

Şekil 3.11. Yu et al. (2020)'ın çalışmalarında elde ettikleri korozyon ve AE olayı sayısı ilişkisi. 27

Şekil 3.12. Çatlak ve korozyon kaynaklı sürtünmenin AE karakteristikleri (Van Steel et al., 2019). 27

Şekil 3.13. AE olayı ve enerjilerinin dağılımına dayanan istatistiksel bir yaklaşımla betonda çatlak konumlandırması (Boniface et al., 2020).....28

Şekil 3.14. Sönümlenme değişimine S/Ç oranının etkisi: (Phillippidis and Aggelis, 2005). 30

Şekil 3.15. Yapay hasar boyutunun Rayleigh dalga hızı ve uyum fonksiyonuna etkisi (Aggelis and Shiotani, 2008).....30

Şekil 3.16. Betonun çimento enjeksiyonu ile onarılmasının frekansa bağlı P-dalgası hızı değişimine etkisi: onarım öncesi (mavi), onarım sonrası (kırmızı) (Aggelis et al., 2009).....31

Şekil 3.17. Betonda gönderilen ve alınan sinyal (Chai et al., 2011).....32

Şekil 3.18. a) Yapay hasar oranının betonda sönümlenmeye etkisi, b) Sensör uzaklığının sinyal varış zamanı ve genliğe etkisi: R1 (yakın), R2 (uzak) (Aggelis and Shiotani, 2012). 32

Şekil 3.19. Çimento harcında AE sinyalinin sönümlenmesi: S1 (kaynağa yakın sensör), S2 (kaynaktan uzak sensör) (Aggelis et al., 2012). 33

Şekil 3.20. Çimento hamurunda ultrasonik sinyalin sönümlenmesi: a) gönderilen, b) alınan sinyal (Yim et al., 2012). 34

Şekil 3.21. Fiberli çimento harç levhada farklı uzaklıktaki sensörler tarafından algılananan AE dalgalarının sönümlenmeleri (Carpinteri et al., 2013). 34

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil 3.22. Farklı miktarlarda yapay hasar içeren çimentı harcı numunelerinde dalga hızılarının frekansa bağlı değişimi (Mpalaskas et al., 2014). 35

Şekil 3.23. Taze ve sertleşmiş betonun dalga dispersiyonuna etkisi: a) Taze, b) Sertleşmiş beton (w/c: S/Ç oranı) (Iliopoulos et al., 2016)..... 36

Şekil 3.24. Betonda yayılan AE dalgasının genliğinin dalga yayılım uzunluğu ve frekansa bağlı olarak değişimi (Feng and Yi, 2017)..... 36

Şekil 3.25. Yönlendirilmiş dalganın sonlu elemanlar simülasyonunda görselleştirilen sönümlenme özelliği ile çelik-beton ara yüzü durumunun değerlendirilmesi (Song and Popovics, 2017)..... 37

Şekil 3.26. Dalga yayılım mesafesinin betonda sönümlenmeye etkisi (Li et al., 2018). 38

Şekil 3.27. EPS betonda tane miktarının boyuna ve kayma dalgalarının formlarına ve hızlarına etkisi (Nogueria and Rens, 2018). 38

Şekil 3.28. Aynı agrega şekli için (yuvarlak) agrega boyutunun kayma ve boyuna dalgaların sönümlenmelerine etkisi (Assadollahi and Khazanovich, 2019). 39

Şekil 3.29. Alüminyumda sensör-kaynak mesafesinin sinyal formu ve spektrumlarına etkileri (Khon et al, 2019). 40

Şekil 3.30. Betonda ara yüz geçiş bölgesindeki empedans farkının sönümlenmeye ve temas seviyesi parametresinin sönümlenmeye ve hıza bağlı değişimleri (Ramaniraka et al., 2019). 41

Şekil 3.31. Çimento hamuru, harcı ve beton için hidratasyon süresi ile dalga hızı ilişkileri ve dalga yayılım mesafesi ile sönümlenme ilişkileri (Thirumalaiselvi and Sasmal, 2019). 42

Şekil 3.32. Al-Jumaili et al. (2014)'te elde edilen AE sinyallerinin genlik değerleri: a) Ham, b) PCT ile düzeltilmiş veriler..... 43

Şekil 3.33. Al-Jumaili et al. (2015)'te elde edilen AE sinyallerinin k-ortalamalarına göre kümelendirilmesi: a) Ham, b) PCT ile düzeltilmiş veriler. 43

Şekil 4.1. AE analizinde takip edilen işlem prosedürü. 45

Şekil 4.2. AE olaylarının ayıklanma algoritması..... 46

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil 4.3. *I*b değeri hesabı algoritması. 47

Şekil 4.4. AE sinyallerinin varış zamanlarının AIC fonksiyonu ile yakalanma algoritması. 48

Şekil 4.5. Hasarların Geiger Yöntemi ile konumlandırılma algoritması 49

Şekil 4.6. a) Geiger Metodu'nun genel algoritması, b) geliştirilen yöntemle her sensör-hasar arası yörünge için elastik dalga hızı hesabı algoritması. 50

Şekil 4.7. Kaynak konumlandırma algoritmasının iyileştirilmesi: a) sabit dalga hızının, b) farklı dalga hızlarının kullanılması. 50

Şekil 4.8. 3D-PCT deneyi verilerinin noktalara ve sensörlere göre ayıklanması. . 52

Şekil 4.9. Gerçek AE aktivitelerine parametre düzeltme ilişkilerinin uygulanması. 53

Şekil 4.10. 3D-PCT ile tez çalışmasında düzeltilen örnek bir AE sinyali. 54

Şekil 5.1. Standart beton eğilme elemanlarının üretiminde kullanılan fiberler. 57

Şekil 5.2. Standart beton eğilme elemanlarının üretimi. 58

Şekil 5.3. Micro II SAMOS AE sistemi: a) Kayıt kasası, b) ön yükselteç, c) sensör. 59

Şekil 5.4. Standart beton eğilme deneylerinde AE sensörlerinin deney elemanları üzerindeki yerleşimi ve 3D-PCT düzeneği (Birim: m). 60

Şekil 5.5. 3D-PCT deneylerinde yapay kaynak üretiminde kullanılan sinyal jeneratörü bağlantısı. 61

Şekil 5.6. Standart beton eğilme deney düzeneği: üç-nokta-eğilme. 61

Şekil 5.7. Betonarme kirişlerin donatı detayları ve CFRP ile güçlendirilme şemaları (mm). 62

Şekil 5.8. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan a) CFRP, b) epoksi yapıştırıcı. 63

Şekil 5.9. Betonarme kirişlerin üretimi. 64

Şekil 5.10. Betonarme kiriş deneylerinde AE sensörlerinin deney elemanları üzerindeki yerleşimi ve 3D-PCT düzeneği (Birim: mm). 65

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil 5.11. Betonarme kirişler üzerinde 3D-PCT deneyi. 66

Şekil 5.12. Betonarme kirişlerin test edildiği üç-nokta-eğilme düzeneği (Birim: mm). 67

Şekil 5.13. Betonarme kiriş deneylerinde kullanılan a) Hidrolik güç ünitesi, b) veri toplama sistemi (TestBOX1001). 67

Şekil 6.1. Mekanik ve akustik deney verilerinin değerlendirilmesinde takip edilen akış şeması. 69

Şekil 6.2. Fiber katkılı betonun eğilme davranışında hasar fazları. 70

Şekil 6.3. Standart eğilme elemanlarının yük-deplasman davranışları. 71

Şekil 6.4. Standart eğilme elemanlarının AE aktiviteleri. 72

Şekil 6.5. Standart eğilme elemanlarının AE enerjileri. 73

Şekil 6.6. Standart eğilme elemanlarının AE aktivitesi ve tokluk miktarlarının karşılaştırılması. 74

Şekil 6.7. Standart eğilme elemanlarının AE aktivitesi ve enerjilerinin karşılaştırılması. 75

Şekil 6.8. Standart eğilme elemanlarının hasar fazlarına göre AE aktiviteleri ve enerjileri. 76

Şekil 6.9. Standart eğilme elemanlarının normalize AE aktivitesi miktarı ve enerjisi arasındaki ilişki. 76

Şekil 6.10. WPF ve PP1'e göre standart eğilme elemanlarında kaydedilen AE aktivitelerinin kümelendirilmesi (●Matris çatlaması, ●Fiber aktivitesi). 78

Şekil 6.11. Standart eğilme elemanlarının kümelendirilen AE aktivitelerinin zamana bağlı oluşumları. 79

Şekil 6.12. Standart eğilme elemanlarının 24V (108 dB) genlikli yapay kaynağı S6 sensörü tarafından algılama düzeylerini gösteren üç boyutlu kontur haritaları. ... 81

Şekil 6.13. Standart eğilme elemanlarında kaydedilen ve düzeltilen AE genlikleri. 82

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil 6.14. Standart eğilme elemanlarında kaydedilen genliklerin düzeltilen genliğe yakınlıkları. 83

Şekil 6.15. Standart eğilme elemanlarında a) kaydedilen genlik-düzeltilen genlik eğrileri, b) kaydedilen genlik-düzeltilen genliğe yakınlık eğrileri. 84

Şekil 6.16. Standart eğilme elemanlarında AE aktivitelerinin ham RA değerleri. 86

Şekil 6.17. Standart eğilme elemanlarında AE aktivitelerinin düzeltilen RA değerleri. 87

Şekil 6.18. Standart eğilme elemanlarında AE aktivitelerinin ortalama frekansları. 88

Şekil 6.19. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişin eğilme davranışında hasar fazları. 89

Şekil 6.20. Betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışları. 90

Şekil 6.21. Betonarme kirişlerin AE aktiviteleri. 93

Şekil 6.22. Betonarme kirişlerin AE enerjileri. 93

Şekil 6.23. Betonarme kirişlerin AE aktivitesi ve enerjilerinin tokluk değerleriyle karşılaştırılması. 94

Şekil 6.24. Betonarme kirişlerin hasar fazlarına göre AE aktiviteleri ve enerjileri. 95

Şekil 6.25. Betonarme kirişlerin normalize AE aktivitesi miktarı ve enerjileri arasındaki ilişki. 96

Şekil 6.26. Betonarme kirişlerde AE aktivitelerinin 3 boyutlu konumlandırma sonuçları. 97

Şekil 6.27. Üç boyutlu kontur haritalarının dokusu ile gönderilen sinyalin genliği ilişkisine K/REF (1 sensörü) örneği. 98

Şekil 6.28. Betonarme kirişlerin 24V (108 dB) genlikli yapay kaynağı A1 ve 1 sensörü tarafından algılama düzeylerini gösteren üç boyutlu kontur haritaları. 99

Şekil 6.29. Betonarme kirişlerde kaydedilen ve düzeltilen AE genlikleri. 100

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil 6.30. Betonarme kirişlerde kaydedilen genliklerin düzeltilen genliğe yakınlıkları. 101

Şekil 6.31. Betonarme kirişlerde a) kaydedilen genlik-düzeltilen genlik eğrileri, b) kaydedilen genlik-düzeltilen genliğe yakınlık eğrileri. 101

Şekil 6.32. Betonarme kirişlerde kaydedilen AE aktivitelerinin sönümlenme miktarının hasar-sensör mesafesiyle değişimi. 102

Şekil 6.33. Betonarme kirişlerde AE aktivitelerinin ham RA değerleri. 104

Şekil 6.34. Betonarme kirişlerde AE aktivitelerinin düzeltilen RA değerleri. 105

Şekil 6.35. Betonarme kirişlerin AE aktivitelerinin ham ve düzeltilen *I*b değerleri. 106

Şekil 6.36. E/REF ve E/FRP'nin düzeltilen RA değeri ve ortalama frekans ilişkileri. 108

Şekil 6.37. E/FRP'deki ayrılan kesme aktivitelerinin ham ve düzeltilen RA değeri ve ortalama frekans ilişkisinde durumları. 108

Şekil 6.38. E/FRP'nin 3D-PCT ile elde edilen kesme aktivitelerinin oluşumları. 109

Şekil 6.39. Normalize AE miktarı ve enerjileri arasındaki ilişki. 109

Şekil 6.40. 3D-PCT deneylerinde gönderilen sinyallerin kaydedilen genlik değerlerine örnekler. 110

Şekil 6.41. AE olaylarında genliklerin düzeltilmesine örnekler: a) standart eğilme elemanları, b) betonarme kirişler (♦ ham, ♦ düzeltilen)..... 111

Şekil 6.42. AE aktivitelerinin kaydedilen genlik değerlerinin a) düzeltilen genlikle, b) düzeltilen genliğe yakınlığıyla ilişkisi. 112

Şekil 6.43. AE aktivitelerinin miktarları (- ham, - düzeltilen). 114

Şekil 6.44. AE aktivitelerinin genlik ve enerji kayıpları. 115

Şekil 6.45. 3D-PCT sonuçlarına göre önerilen çıkarım: sönümlenme sebebiyle AE sinyalindeki genlik ve enerji kayıpları ile hasar türü ilişkisi. 116

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1. Standart beton eğilme deneylerinde üretilen deney elemanları. 55

Çizelge 5.2. Standart beton eğilme deneylerinde kullanılan beton karışım tasarımları (kg/m^3). 56

Çizelge 5.3. BetonFiber HE 0735 çelik fiberlerin özellikleri. 56

Çizelge 5.4. KraTos Mikro poliamid fiberlerin özellikleri. 57

Çizelge 5.5. KraTos Makro polipropilen fiberlerin özellikleri. 57

Çizelge 5.6. Betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan beton karışım tasarımı (kg/m^3). 63

Çizelge 5.7. BetonFiber HE 0735 çelik fiberlerin özellikleri. 63

Çizelge 5.8. Betonarme kiriş deneylerinde AE sensörlerinin koordinatları. 66

Çizelge 6.1. Standart eğilme elemanlarının mekanik özellikleri. 71

Çizelge 6.2. Betonarme kirişlerde deneyler sırasında gözlenen hasarlar. 91

Çizelge 6.3. Betonarme kirişlerin mekanik özellikleri. 91

1. GİRİŞ

Yapıların deprem ve çevresel etkiler gibi farklı etkiler dolayısıyla hasar almaları gerek can kayıplarına sebebiyet vermeleriyle sosyolojik, gerekse büyük mal kayıpları sonucu ekonomik sorunlar doğurmaktadır. Meydana gelen bu hasarların belirlenmesinde çeşitli yöntemler mevcuttur. Ülkemizde bu amaçla sıklıkla kullanılan karot alma yöntemi hasar durumu incelenen elemanın bütünlüğünü bozmakta ve yapının taşıyıcılığına zarar vermektedir. Bu noktada tahribatsız muayene (Non-Destructive Testing, NDT) yöntemlerinin kullanımı bu sorunu ortada kaldırdığı gibi yerinde, pratik ve hızlı uygulama kolaylığı da sağlamaktadır.

NDT yöntemleri genel olarak ses veya elektromanyetik dalgalarının malzeme içerisindeki yayılımı ve termal görüntülemeye dayalı yöntemlerdir. Bunlardan sıklıkla kullanılanlar ultrasonik yöntem, radar, manyetik parçacık yöntemi ve termografidir. Bu yöntemler malzemenin mevcut durumunu görüntülemeye yaramaktadır. Yük altındaki bir elemandaki hasar ilerleyişini izlemek için ise Akustik Emisyon (AE) yöntemi efektiftir. AE düşük yük seviyelerinde gelişen mikroskobik ve her türlü çatlak gelişimlerinin belirlenmesini sağlayan bir tahribatsız test tekniğidir. Yöntem kırılmadan dolayı boşalan enerjinin oluşturduğu elastik dalgaların malzemede yayılması ve yüzeye yerleştirilen sensörler ile algılanıp analiz edilmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu yöntem ile kırılmanın ne zaman ve nerede başladığı bulunabilmektedir. Elde edilen AE verilerinin işlenip analiz edilmesini ve çatlak türlerini belirlenmesini sağlayan çeşitli algoritmalar mevcuttur.

Bu verilerin doğruluğu hasar tespit sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Ancak betonun heterojen ve anizotrop yapısından dolayı hasardan salınan elastik dalgalar yüzeye yerleştirilen sensörlere ulaşana dek bozulmakta ve sönümlenmektedir. Bu durum sinyalin genliğini azaltmakta ve AE analizlerinde kullanılan sinyal özelliklerini değiştirmektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için bu tez çalışmasında parametre düzeltme prosedürü üzerine çalışılmıştır. Laboratuvar koşullarında AE ile eşzamanlı eğilme davranışları izlenen beton ve betonarme elemanlardaki hasarlar tez çalışmasında geliştirilen ve ortamın heterojenliğini göz önünde bulunduran bir algoritma ile konumlandırılmıştır. Eğilme deneyleri öncesinde gerçekleştirilen 3D-PCT testleri sonucu deney

elemanlarının kontur haritalarından elde edilen sönümlenme ilişkileri kullanılarak AE aktiviteleri düzeltilmiştir. Ham ve düzeltilen AE sinyallerinin parametreleri mekanik bulgularla ilişkilendirilmiş ve parametre düzeltmenin AE ile betonda hasar tespitine etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçta bir AE sinyalinin sönümlenmesinin hangi parametreyi nasıl değiştirdiği incelenmiş, bu değişimlerin birbirleriyle ilişkileri ortaya konmuş ve çeşitli çıkarımlar önerilmiştir.

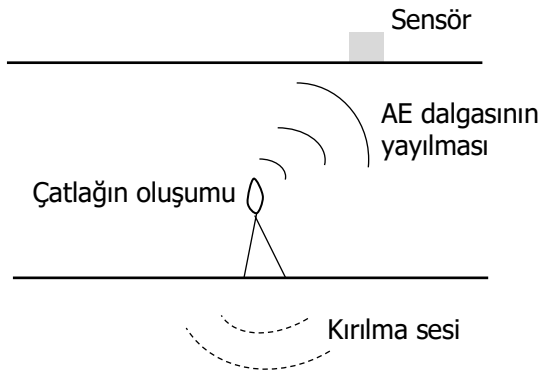
Tezin ilk bölümünde konuya giriş yapılmış, ikinci bölümünde AE yöntemi, 3D-PCT ve örüntü tanımanın temelleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde özellikle yakın tarihli literatür incelenerek geniş bir literatür taraması sunulmuştur, dördüncü bölümde bu yöntemler için yazılan programların algoritmaları sunulmuş ve beşinci bölümde deneysel çalışmanın detayları verilmiştir. Altıncı bölümde tüm bulgular değerlendirilmiş ve yedinci bölümde sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2. YÖNTEM

2.1. Akustik Emisyon (AE)

ASTM E1316 standardına göre, tahribatsız muayene yöntemleri (Non-Destructive Testing, NDT), yapının gelecekteki yararlığını ve servis ömrünü azaltmayacak şekilde malzemeleri ve bileşenlerini incelemek için kullanılan teknik yöntemlerdir. NDT, geometrik özellikleri ölçmek ve bütünlüğü, özellikleri, birleşimi değerlendirmek için yapıdaki kusurları belirlemek, yerini tespit etmek ve ölçmek için kullanılır. Akustik Emisyon (AE) yöntemi de bu yöntemlerden bir tanesidir. Bu çalışmada hasar tespiti için tahribatsız test yöntemi olarak AE yöntemi kullanılmıştır.

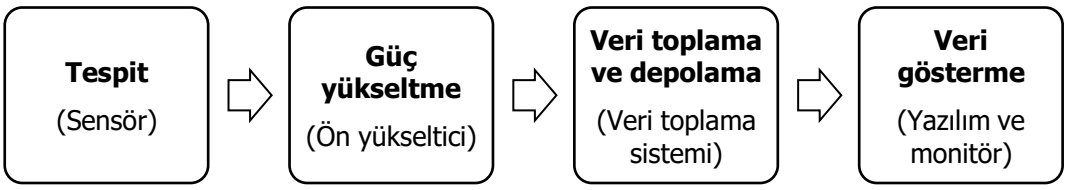
AE, gerilme altındaki malzemelerde oluşan hasar tarafından salınan enerjinin elastik dalgalar şeklinde yayılması olarak tanımlanır. AE, mikro ölçekli bir sismik olaydır. Malzeme içindeki kırılmanın başladığı noktalarda bir enerji açığa çıkar ve bu da AE elastik dalgaları olarak malzeme içerisinde yayılırlar. Malzeme yüzeyine yerleştirilen AE sensörleri yardımı ile yüzeye ulaşan elastik dalgalar algılanabilir ve analiz edilirler (Şekil 2.1). AE yöntemiyle kırılmanın başladığı yer (kaynak) ve kırılma zamanı tayin edilebilmektedir.



Şekil 2.1. AE oluşumu ve algılanması.

AE dalgaları, mikro çatlakların oluşmasıyla meydana gelen enerjinin yarattığı, geniş frekans aralığına sahip (kHz-MHz) dalgalardır. AE sinyalleri ise akustik emisyon aygıtlarının akustik emisyon dalgalarını işlemesi sonucu oluşan sinyallerdir. Bütün katı malzemeler belli bir elastikliğe sahiptir. Dış kuvvetler altında genleşirler veya sıkışırlar. Dış kuvvet kaldırıldığında elastik olan malzeme yay gibi eski halini alır. Eğer elastik limit aşılırsa, malzemede kırılma veya çatlama

olur. Bu olay, gevrek malzemede hemen, elastik malzemede plastik deformasyon sonrası ortaya çıkar. Malzemenin boşluk vb. kusuru olduğu yerlerde, çatlaklar hızlı bir şekilde enerjisini atarak gevşerler. Bu elastik enerjinin hızla serbest bırakılmasına AE denir. AE sistemleri sensör, ön yükseltici, süzgeç, güç yükseltici, veri toplama ve depolama sistemi ve veri gösterim aygıtlarından oluşur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. AE işlem sırası.

Drouillard 1979 ve 1987'deki makalelerinde AE araştırmalarının ilk olarak 20. yüzyılın ortalarında başladığını söylemektedir. Aslında M.Ö. 6500'lerde seramiklerin soğuması sırasında çömlekçilerin duyduğu sesler, ilerleyen zamanlarda ise maden ocaklarındaki payandalardan gelen gıcırtılar temel seviyede AE örnekleridir. Metalürjide ise ilk AE fenomeninin duyulabilen kalay çıtırtısı olduğu bilinmektedir (Grosse and Ohtsu, 2008). Bu fenomene göre bu konuda yayınlanan ilk çalışma F. Kishinoue'ye aittir (1933). Bu çalışmada Kishinoue eğilme gerilmeleri altındaki ahşap numunesinin çatlama seslerini incelemiştir. Ardından Förster ve Scheil 1936'da, Obert ve Duvall 1945'te ve Obert 1977'de çeşitli çalışmalar yapmışlardır. AE'nin esas başlangıcının ise J. Kaiser'in metalik malzemeleri test ederken AE sinyallerini kaydettiği 1950'deki çalışması olduğu kabul edilmektedir. Kaiser bu çalışmada "Kaiser Etkisi" olarak bilinen ünlü tersinmezlik prensibini keşfetmiştir. Daha sonra B.H. Schofield, Kaiser'in bu makalesini 1961'de yeniden incelemiş ve "Akustik Emisyon" adıyla yayınlamıştır. Bu yayın AE terminolojisinin ilk kullanım yeridir. İlk olarak beton numuneye AE, Ruesch tarafından 1959'da basınç etkisi altında uygulanmıştır.

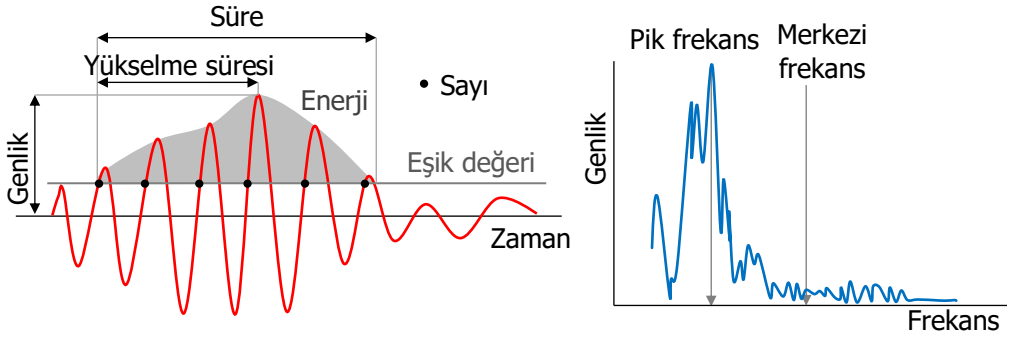
Günümüzde ise AE araştırmaları ultrasonik denilen insan kulağının işitemeyeceği ses dalgalarıyla ilgilidir. AE tekniği özellikle yeraltı ve yerüstü basınçlı kaplar ve küre tankların kalite kontrolünde, laboratuvar çalışmalarında malzeme muayenesi, deformasyon ve kırılma mekanizmalarının incelenmesinde, üretim sürecinde lehim ve kaynak bağlantılarının kontrolünde, uçak ve uzay araçlarında, korozyon belirlenmesinde ve nükleer santral reaktörleri gibi kritik yapıların kontrolünde kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliğinde ise barajlar,

köprüler, yığma yapılar ile çelik ve betonarme yapıların da yükleme altındaki hasar durumları AE ile izlenebilir.

2.1.1 AE parametreleri

AE ile hasar tespitinde sinyal parametreleri kullanılmaktadır. AE parametreleri, dalga formuna ait bazı karakteristiklerdir (Şekil 2.3). AE tekniğinin en önemli özelliklerinden birisi arkadaki gürültüyü elimine etmektedir. Bu amaçla eşik seviyeleri kullanılır ve bu seviyeyi geçen sinyaller anlamlı olarak kaydedilir.

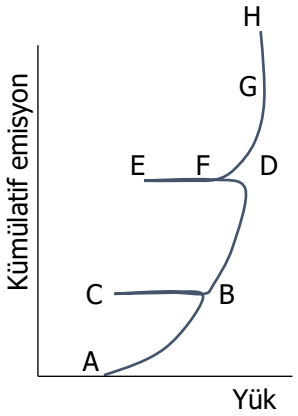
Şekil 2.3.a'da zamana bağlı voltaj değerlerini gösteren bir AE dalga formunda beş temel parametre gözlenir. Genlik (dB), dalga şeklindeki ölçülen en büyük voltajdır ve hasarın büyüklüğüyle ilişkilidir. Yükselme süresi, eşik değerini geçen ilk nokta ile pik arasındaki zaman aralığıdır. Bu parametre hasar türünü belirlemede kullanılır. Süre, ilk ve son eşik değerini geçen sinyaller arasındaki zaman farkıdır. Sayı, 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) emisyonun enerjisidir. Sinyalin genliğine ve devam süresine duyarlıdır ve hasar enerjisini belirtmektedir. Bu parametreleri kullanarak ortalama frekans (sayı/süre) ve RA değeri (yükselme süresi/genlik) gibi hasar türü belirlemeye yarayan parametreler de hesaplanabilir. Diğer taraftan, sinyale Fast Fourier Transformation (Hızlı Fourier Dönüşümü, FFT) uygulayarak elde edilen frekans spektrumundan pik ve merkezi frekans gibi hasar türü belirlemede faydalı frekans karakteristikleri de elde edilebilmektedir (Şekil 2.3.b).



(a) (b)

Şekil 2.3. AE parametreleri: a) zamana bağlı dalga, b)FFT spektrumu.

Emisyonun genliği çatlak ilerleyişinin hızıyla ve meydana gelen yüzey alanının miktarıyla doğru orantılıdır. Tekrarlı yüklemede, malzemede oluşan çatlaklar, bir önceki gerilmeyi aşıncaya kadar hareket edemez ve genleşemez. Bu olaya "Kaiser etkisi" denir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi yük arttırıldığında (AB bölümü) AE olayı açığa çıkar. Yük kaldırılıp, tekrar uygulandığında (BCB bölümü), AE olayı B noktasını aşıncaya 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 olgu 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.



Şekil 2.4. Kaiser ve Felicity etkileri.

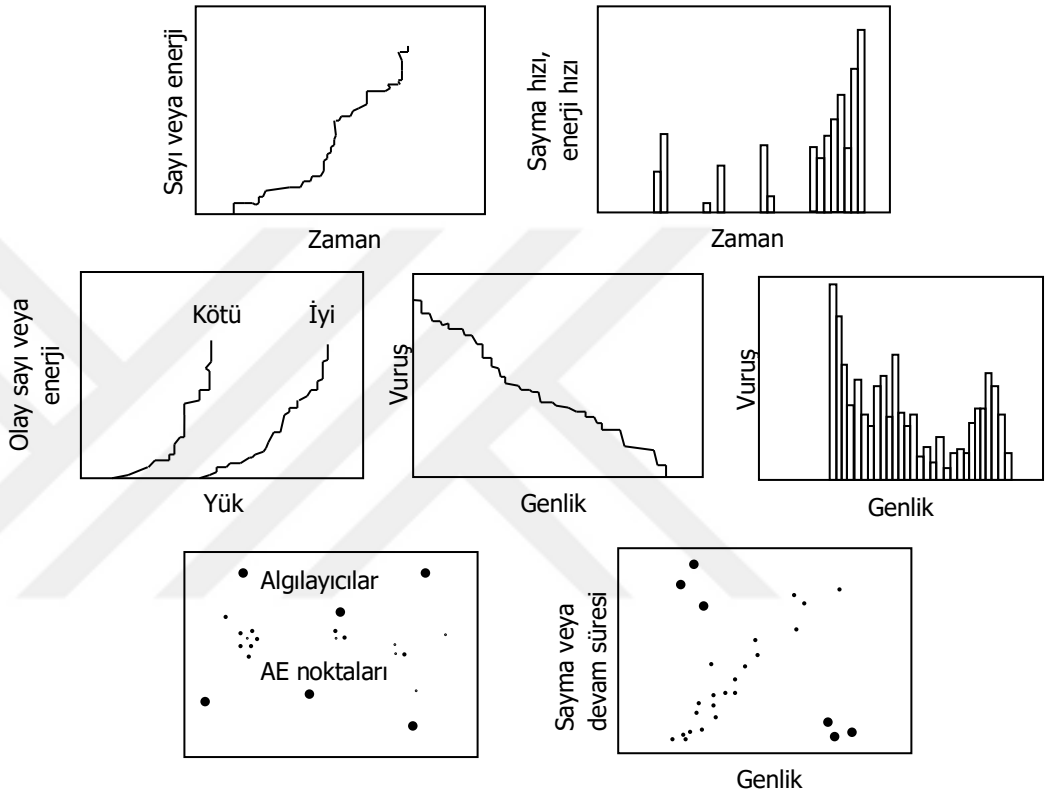
2.1.2. AE analizleri

2.1.2.1. Parametre tabanlı analiz

AE parametrelerinin zamana veya farklı parametrelere bağlı dağılımlarının incelenmesiyle parametre tabanlı analiz yapılabilir. Böylece AE parametrelerindeki yükseliş veya düşüş gibi değişikliklerin gözlendiği bölgelerde kritik mekanizmaların varlığı hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Parametre tabanlı analizlerde sıklıkla kullanılan AE parametreleri vuruş sayısı, enerji ve genliktir. Yüksek enerji ve genlikli AE vuruşları, daha güçlü ve yüksek enerji salınımlı mekanizmaları temsil etmektedir. Birim vuruşa düşen enerji miktarının büyüklüğü ise daha az sayıda ancak daha büyük enerjili kırılmaları ifade etmektedir. Bu değişimler genellikle dağılımın hareketli ortalamasında sıçramalara sebep

olmaktadır. Yüksek enerjili vuruşların tüm davranışa etkisini belirlemek için ise kümülatif AE enerjilerinin incelenmesi gerekmektedir.

Şekil 2.5'te AE parametrelerinin zamana bağlı farklı değerlendirme grafikleri sunulmuştur. Bunlar zamana ve yüke bağlı toplam aktivite miktarı, oluşma hızı, genlik ve vuruş ilişkisi ve enerji miktarlarıdır. Her bir nokta AE'yi, her büyük nokta ise sensörleri temsil etmektedir.

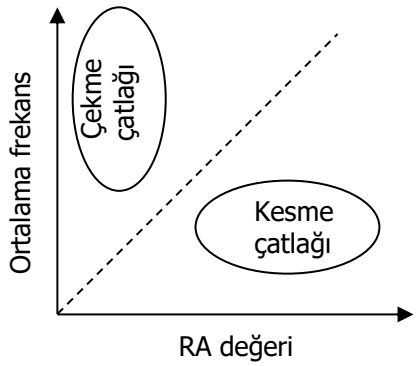


Şekil 2.5: AE tekniğinin veri gösterim tipleri.

Literatürde farklı AE parametre analizleri mevcuttur: JCMS-IIIB5706 (2003), çatlak türünü belirlemede ortalama frekans ve RA değerinin (yükselme zamanı/genlik) Şekil 2.6'daki gibi çekme ve kesme olarak iki sınıfa ayrılabileceğini önermektedir. Ancak bu doğrunun eğimi deneysel parametrelere bağlı değişmektedir.

Rao and Lakshmi (2005) ise AE aktivitelerinin şiddet dağılımını ölçeklendirerek aktivitelerin büyüklüğüne göre çatlak oluşumları veya mevcut çatlakların gelişimini belirlemek için "Ib değeri"ni kullanmışlardır. Tekrarlı yük durumunda ise Kaiser Etkisi'ne dayalı "yük oranı", "rahatlama oranı" ve

"durgunluk oranı" hesaplanarak düşük, orta ve ağır hasar durumları belirlenebilmektedir (Ohtsu, 2018).



Şekil 2.6. JCMS-IIIB5706 2003'e göre çatlak sınıflandırması.

Sismolojide kullanılan ve önemli bir parametre olan *b* değeri, bir kırılmaya ait kümülatif frekans-genlik dağılımının eğimi olarak tanımlanan bir parametre olup kırılmanın büyüklüğü ile ilişkilendirilebilmektedir (Gutenberg and Richter, 1954). *b* değerinin hesaplanmasında (2.1) eşitliğinde verilen "Gutenberg-Richter Formülü" kullanılmaktadır.

$$\log N = a - bM \tag{2.1}$$

Bu eşitlikte *a* amprik bir sabiti, *M* aktivitenin Richter ölçeğindeki şiddetini, *N* ise *M*'den büyük şiddetli aktivite sayısını ifade etmektedir.

İlk olarak sismoloji biliminde tanımlanan bu değerin AE'ye uygulanmasında ise maksimum AE genlik değerlerinin kullanımı için Gutenberg-Richter Formülü düzenlenerek (2.2) eşitliği elde edilmiştir.

$$\log N = a - b(A_{dB}/20) \tag{2.2}$$

Burada ise A_{dB}, AE vuruşunun dB cinsinden maksimum genliğini, *N* ise $A_{dB}/20$'den büyük genlikli AE vuruş sayısını belirtmektedir. Sonuçta hesaplanan b değeri düşük genlikli aktivitelerin büyük genlikli aktivitelere göre kısmi miktarını ifade eden bir yüzde olarak ifade edilmektedir (Zhang and Zhang, 2017). Diğer bir deyişle, büyük b değeri küçük genlikli çok sayıda AE aktivitesinin, küçük b değeri ise büyük genlikli az sayıda AE aktivitesinin varlığına işaret etmektedir (Proverbio et al., 2009).

Ancak deprem ve AE aktivitelerinin yükleme boyunca genlik dağılımlarının çok çeşitlilik göstermesi sebebiyle b değerinin uygulanmasında çeşitli eksikler göze çarpmıştır. Bu sebeple AE genlik dağılımına ait ortalama (μ) ve standart sapma (σ) gibi istatistiki değerlerin göz önüne alınmasıyla hesaplanan *I*b (Improved b-value) değeri geliştirilmiştir (Shiotani et al., 1994; 2001). *I*b değeri analizi, gerilme altındaki malzemede meydana gelen AE aktivitelerinin şiddet dağılımının ölçeklendirilmesi olarak tanımlanmaktadır (Rao and Lakshmi, 2005). Bu sayede çok sayıda küçük AE aktivitelerini yeni veya yavaş çatlak oluşumu, az sayıda büyük AE aktivitelerini ise hızlı çatlak oluşumu olarak nitelendirmeye olanak sağlanmaktadır. Yöntemde 1.-100., 21.-120. şeklinde ilerleyen genlik değerlerini içeren gruplar için *I*b değerleri hesaplanmaktadır. Zamana bağlı elde edilen *I*b değerlerinde gözlenen değişimler hasar ile ilişkilendirilebilmektedir: Büyük *I*b değeri küçük genlikli çok sayıda AE aktivitesinin, küçük *I*b değeri ise büyük genlikli az sayıda AE aktivitesinin varlığına işaret etmektedir (Tayfur vd., 2019). Bir genlik dağılımında *I*b değeri (2.3) eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

$$Ib=20(\log_{10}N_1-\log_{10}N_2)/(a_2-a_1) \tag{2.3}$$

Burada a_1, (μ-σ)'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.

2.1.2.2. Sinyal tabanlı analiz

AE sinyal şeklini analiz ederek kaynak lokasyonu ve oluşum zamanı elde edilebilmektedir. Hasar konumlandırma için her bir sensör ile AE kaynağının oluştuğu nokta arasındaki varış zamanı farkı ve dalga hızı bilgisine ihtiyaç vardır. Homojen ve izotropik olduğu kabul edilen bir malzemede lokalizasyon işlemi elbette daha kolay olacaktır ve Lamé sabitleri λ ve μ, yoğunluğu ρ olan bir malzeme içerisinde yayılan P ve S dalgalarının hızları (2.4) numaralı eşitlik ile hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada ise betonun heterojenliği gözönüne alınarak farklı dalga hızları kullanılmıştır.

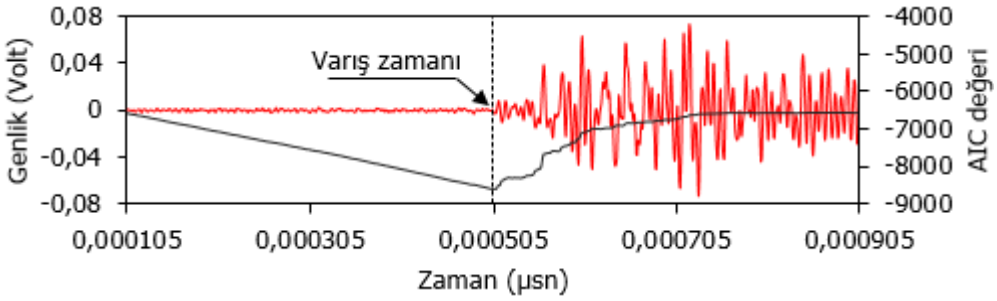
$$V_P=\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}},\ V_S=\sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{2.4}$$

AE sistemi belirli zaman aralığında veri kaydettiğinden, sinyalin sensöre varış anında sistem kayıtta olmayabilmektedir. Bu durumda da kaydedilen zaman varış

zamanı olmadığından sinyalin sensöre ilk varış zamanının ayrıca hesaplanması gerekmektedir. Elastik dalga çok yüksek bir hızla yayıldığından, zaman değerleri arasındaki mikro saniyeler mertebesindeki çok küçük farklar bile lokasyon tayinlerinde büyük hatalara yol açmaktadır. Bu sebeple sinyallerin varış zamanları Akaike Information Criterion (AIC) Seçici yöntemi ile yakalanacaktır. Akaike (1974) tarafından geliştirilen bu istatistiksel yöntem, gürültü ve asıl sinyal verileri arasındaki varış anını zaman tanım alanında belirlemeye yaramaktadır. AIC'nin varış zamanının içerildiği tahmin edilen sinyal penceresine uygulanması yeterlidir. Bunun için ardışık on genlik değerinin ortalamasının, sinyalin başlangıcından bu genliklerin ilkine kadarki genlik değerlerinin ortalamasının en az dört katı büyüklüğünde olması şartı, gürültü ile asıl sinyali ayırt etmekte yeterli olmaktadır (Carpinteri vd., 2012). Her zaman değeri için hesaplanan AIC değerlerinden minimum AIC değerinin hesaplandığı zaman, sinyalin sensöre varış zamanını vermektedir. Burada iki aşamalı bir uygulama kullanılmıştır: Öncelikle sinyalin voltajlarının onarlı gruplarındaki değerlerinin ortalmasının önceki grubun dört katından daha fazla olduğu bölgede AIC hesabı yapılır. Daha sonra bu pencerede minimum AIC değerine ulaşılan zamanın belirlenen bir aralık kadar gerisinde ve ilerisinde de yeni bir pencere açılarak ikinci minimum AIC değeri bulunur. Bu değerin hesaplandığı zaman, sinyalin sensöre varış zamandır. AIC fonksiyonu (2.5) eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

$$AIC\{k\} = k.\log\{var\{G,[1,k]\}\} + (N-k).log\{var\{G,[k+1,N]\}\} \quad (2.5)$$

Burada k, AIC değeri hesaplanan zaman değerinin incelenen sinyal penceresinin kaçıncı verisi olduğunu, G, ilgili zamandaki genlik değeri, N ise sinyal penceresindeki toplam genlik sayısını belirtmektedir. Şekil 2.7'de AIC fonksiyonu ile varış zamanı yakalanan örnek bir AE sinyali verilmiştir.

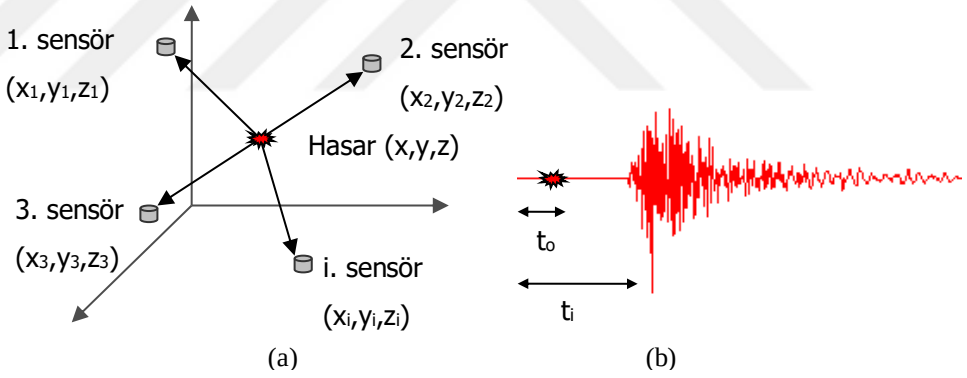


Şekil 2.7. AIC fonksiyonu ile varış zamanı yakalanan bir AE sinyali.

Üç boyutlu bir AE analizinde Kartezyen koordinat takımında AE oluşumuna sebep olan kaynak koordinatları (x, y, z), i. sensör koordinatları (x_i,y_i,z_i), kaynağın oluşması yani kırılmanın başlangıç süresi "t_o", sinyalin i. sensöre ulaşana kadar geçen süre ise "t_i" ile tanımlansın (Şekil 2.8). Kaynak oluşmadan kayıt başladığından t_i, t_o'ı içermektedir. Kaynak sinyali oluştuktan sonra sensöre ulaşana kadar aldığı yol, geçen süre ile dalga hızının çarpımına eşittir (2.6). Bu eşitlik her sensör için yazılarak i adet hiperbol denklemine sahip bir takım elde edilir. Bu takımda sensör koordinatları, dalga hızı ve sinyalin sensöre varış zamanı bilinen değerler olup, hiperbollerin kesişim noktası (x, y, z) kaynak koordinatlarını vermektedir.

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} = V_p.(t_i - t_o) \qquad (2.6)$$

Dörtten fazla sayıda sensör kullanılması durumunda (2.6) numaralı eşitlik takımının çözümü için nümerik çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma da bu tür üst belirlenimli problemlerin de çözümünde kullanılabilen iteratif Geiger Yöntemi ile kaynak konumlandırması yapılmıştır.



Şekil 2.8. a) AE kaynağı ve sensörlerinin konumları, b) Sinyal formunda kaynak oluşumu ve *i.* sensöre varış süresi.

Ge (2003)'te verilen prosedüre göre sinyalin i. sensöre varış zamanı fonksiyonu $f_i(\boldsymbol{x})$ ile tanımlansın. Burada $\boldsymbol{x}$ kaynağın koordinatları x, y, z (hiperbollerin kesişim noktası) ve oluşma zamanı t'yi içeren bir vektördür.

$$\boldsymbol{x} = (x, y, z, t)^T \qquad (2.7)$$

$f_i(\boldsymbol{x})$ fonksiyonu sonsuz yakın bir $\boldsymbol{x_o}$ tahmini lokasyonu için birinci mertbeden Taylor polinomu ile genişletilirse (2.8) numaralı eşitlik elde edilir:

$$f_i(\boldsymbol{x}) = f_i(\boldsymbol{x_o} + \boldsymbol{\delta x}) = f_i(\boldsymbol{x_o}) + \frac{\partial f_i}{\partial x}\delta x + \frac{\partial f_i}{\partial y}\delta y + \frac{\partial f_i}{\partial z}\delta z + \frac{\partial f_i}{\partial t}\delta t \qquad (2.8)$$

burada

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x_o} + \boldsymbol{\delta x} \tag{2.9}$$

$$\boldsymbol{x_o} = (x_0, y_0, z_0, t_0)^T \tag{2.10}$$

ve $\boldsymbol{\delta x} = (\delta x, \delta y, \delta z, \delta t)^T$. (2.11)

(2.8) numaralı eşitlik gradyan vektörünü tanımlayan g_i ile şu şekilde tanımlanırsa;

$$f_i(\boldsymbol{x}) = f_i(\boldsymbol{x_o} + \boldsymbol{\delta x}) = f_i(\boldsymbol{x_o}) + g_i^T \boldsymbol{\delta x} \tag{2.12}$$

burada g_i^T, g_i vektörünün transpozesini ifade eder ve (2.13) numaralı eşitlikle tanımlanabilir:

$$g_i^T = \nabla f_i(\boldsymbol{x}) = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x}, \frac{\partial f_i}{\partial y}, \frac{\partial f_i}{\partial z}, \frac{\partial f_i}{\partial t}\right) \tag{2.13}$$

Tahmini kaynak lokasyonu x_o için hesaplanan varış zamanı lokasyon hesabının doğruluğu hakkında bilgi verecek bir değer olup, gerçek varış zamanı ile tahmini lokasyondan hesaplanan varış zamanı arasındaki ilişki kaynak konum ve oluşma zamanının kısmi türevlerini ve γ_i artığını içeren düzeltme faktörü ile tanımlanır:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x}\delta x + \frac{\partial f_i}{\partial y}\delta y + \frac{\partial f_i}{\partial z}\delta z + \frac{\partial f_i}{\partial t}\delta t = \gamma_i \tag{2.14}$$

burada

$$\gamma_i = t_{oi} - t_{ci}, \tag{2.15}$$

$$t_{oi} = f_i(\boldsymbol{x}), \tag{2.16}$$

ve $t_{ci} = f_i(\boldsymbol{x_o})$. (2.17)

Bu eşitlikler m adet denklem için matris notasyonunda (2.18) şeklinde gösterilebilir:

$$\boldsymbol{A\delta x} = \boldsymbol{\gamma} \tag{2.18}$$

burada

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{\partial f_1}{\partial t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x} & \frac{\partial f_m}{\partial y} & \frac{\partial f_m}{\partial z} & \frac{\partial f_m}{\partial t} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta x} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta t \end{bmatrix} \boldsymbol{ve} \quad \boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_m \end{bmatrix}. \tag{2.19}$$

En küçük kareler çözümü ile (2.19) numaralı eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir:

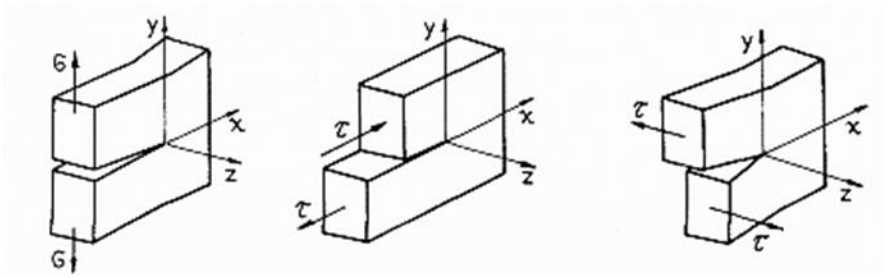
$$\boldsymbol{A^T A \delta x = A^T \gamma} \text{ veya } \boldsymbol{\delta x = (A^T A)^{-1} A^T \gamma} \quad (2.20)$$

Önceki iterasyona ait tahmini çözüme düzeltme vektörü $\boldsymbol{\delta x}$'in eklenmesiyle yeni çözüm elde edilir ve çözüm yakınsatılana kadar iterasyona devam edilir.

Literatürde yer alan bu kaynak konumlandırma algoritmaları görüldüğü gibi dalga hızının sabit olduğu kabulüne dayanmaktadır. Bu çalışmada ise 4. Bölüm'de detayları verilen algoritmaya malzeme heterojenliğinin dalga hızına etkisi de eklenerek kaynak konumlandırma iyileştirilmiştir.

Ayrıca Moment Tansör Analizi'ni temel alan SiGMA (Simplified Green's Functions for Moment Tensor Analysis) yöntemi ile çatlak türleri ve yönelimleri de belirlenebilmektedir (Ohtsu, 1995; Ohtsu vd., 1998; Ohtsu ve Ohtsuka, 1998).

SiGMA analizi üç boyutlu AE kaynak lokasyonu ve AE kaynağının moment tansörü analizinden oluşmaktadır. Yöntem, deprem kaynağının yerini belirlemede de kullanılan Moment Tansörü Analizi'ni temel almaktadır. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği'nde bütün kırılmaların çatlağın uç bölgesinde oluştuğu ve tüm hacmin elastik kalmaya devam ettiği varsayılmaktadır. Bu alanda belirlenebilen üç adet çatlak tipi mevcuttur; mod I (çekme modu), mod II (kesme modu) ve mod III (yırtılma modu) (Şekil 2.9). Mod I ve mod II düzlemsel simetrik ve asimetrik iken, mod III üç boyutludur. Genel kırılma ise bu üç modun lineer kombinasyonudur.



(a) (b) (c)

Şekil 2.9: Temel kırılma modları: a) mod I, b) mod II, c) mod III.

2.2. Üç Boyutlu Parametre Düzeltme Tekniği (3D-PCT)

Parametre Düzeltme Tekniği (Parameter Correction Technique, PCT) Al-Jumaili et al. (2014 ve 2015) tarafından sönümlenme ve dispersiyon dolayısıyla bozulan AE genliklerini iyileştirmek için önerilmiştir. Yöntem yapay kaynaktan elde edilen sinyal parametrelerinin her sensörden elde edilen farklı lokasyonlardaki

AE genlik dağılımları ile kaynak genliği arasında ilişki kurmayı ve AE genliklerini bu ilişkilere göre düzeltmeyi temel almaktadır.

Bu tezde ise yöntem 3 boyutlu olarak geliştirilmiştir ve beş aşamalı bir prosedürden oluşmaktadır:

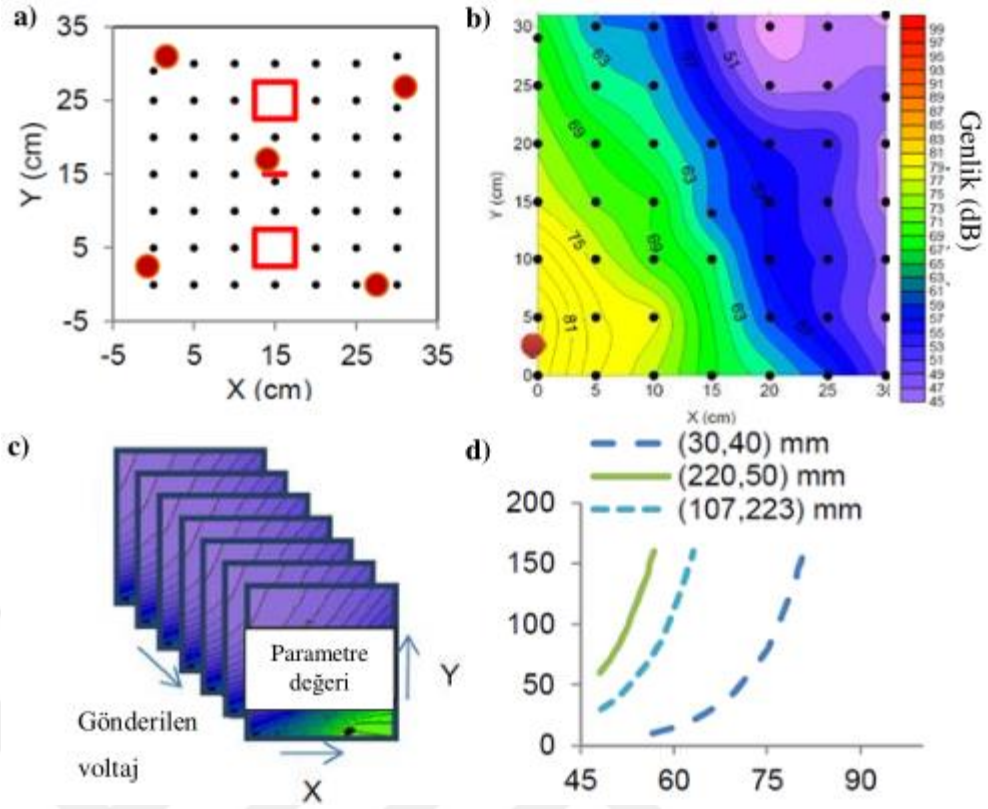
i. İncelenecek hacmin belirlenmesi: Bu aşamada AE sinyallerinin elde edileceği deney sırasında yüksek gerilmelerin oluşacağı öngörülen bölgeler önceden belirlenerek bir PCT hacmi oluşturulur.

ii. 3D-PCT ağının oluşturulması: AE aktivitelerinin oluşacağı belirlenen bu hacme PCT ağı oluşturulur (Şekil 2.10.a). Sensörlerin bu ağ içerisine yerleştirilmesi zorunlu değildir.

iii. 3D-PCT deneyinin yapılması: Oluşturulan 3D-PCT ağı üzerindeki her noktada farklı genliklere sahip yapay kaynaklar oluşturulur ve yerleştirilen her bir sensör tarafından AE parametreleri okunur. 3D-PCT ağı üzerindeki noktalar arasında kalan noktalara ise enterpolasyon yapılarak belli genliğe sahip yapay kaynakların oluşturduğu AE parametrelerinin tüm alan üzerindeki dağılımları (kontür haritaları) elde edilir (Şekil 2.10.b).

iv. 3D-PCT dağılımlarının hesaplanması: Farklı genliğe sahip tüm yapay kaynaklar için oluşturulan parametre dağılımları ile kaynak parametresi arasında PCT hacmi içerisinde kalan tüm noktalar için ilişki kurulur (Şekil 2.10.c ve d).

v. AE parametrelerinin düzeltilmesi: Gerçek deneylerden elde edilen AE parametrelerine düzeltme ilişkileri uygulanır. Bunun için öncelikle kaynakların lokasyonları belirlenir. Ardından bu lokasyonlarda 3D-PCT ile elde edilen o lokasyona özgün ilişki belirlenir. Son olarak her lokasyon için her sensörden elde edilen PCT ilişkisi ile ilgili lokasyondaki AE parametreleri düzeltilir ve her sensör için tek bir değer elde etmek amacıyla bu parametrelerin ortalamaları alınır.



Şekil 2.10. Al-Jumaili et. al. (2014)'da kullanılan iki boyutlu PCT metodolojisi: a) PCT ağı, b) PCT ağında yapay kaynaklardan elde edilen genlik dağılımı, c) her sensöre ait genlik haritaları, d) farklı lokasyonlardaki PCT ilişkileri.

2.3. Örüntü Tanımanın AE ile Hasar Tespitinde Kullanımı

Örüntü tanımanın esas amacı nesneleri (görüntü, sinyal, el yazısı, sayısal ölçüm değerleri vb.) sınıf veya kategorilere ayırmaktır (Duda et. al., 2000 ve Theodoridis and Koutroumbas, 2008). Bu nesnelere ait özelliklerin tanımlanmasıyla elde edilen karakterler, istatistiki karar verme teorileriyle belirlenen sınırlara göre sınıflandırılırlar. Örüntü tanıma iki moddan oluşmaktadır: öğrenme (deneme) ve sınıflandırma (test etme). Öğrenme modunda öncelikle girdi verileri öğretilmektedir. Sınıflandırma modunda ise girdi verilerinin tanımlandığı sınıflara göre yeni verilerin sınıflandırılması yapılmaktadır. Bu bağlamda örüntü tanıma yöntemleri "denetimli (supervised) karakter tanıma" ve "denetimsiz (unsupervised) karakter tanıma" olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Denetimli örüntü tanımada yapay zekayı eğitmek için sınıflara belirli alıştırma verileri tanımlanırken, denetimsiz örüntü tanımada ise herhangi bir ön bilgi tanımlanmamaktadır (Salehi and Burgueno, 2018).

Örüntü tanıma son yıllarda özellikle yapı sağlığı izleme ve hasar tespitinde olmak üzere, deprem mühendisliği, yapı güvenliği ve performans değerlendirme gibi yapı mühendisliği alt dallarında kullanılmaktadır. Sause et. al. (2012) AE sinyallerine ait farklı özelliklerin kombinasyonlarını örüntü tanımada daha doğru sonuçlar elde etmek için değerlendirmişlerdir. Oskouei et. al. (2012) cam/polyester kompozitte oluşturdukları AE sinyallerini kümelendirmek için denetimsiz örüntü tanımayı sinyallerin frekans özelliklerinden faydalanarak kullanmışlardır. 100-250 kHz, 250-350 kHz ve 400-500 kHz frekans aralıklarını sırasıyla matris çatlaması, fiber/matris sıyrılması ve fiber kopması olarak tanımlamışlardır. Farhidzadeh et. al. (2013) betonarme bir perde duvardaki çatlak modlarını sınıflandırmak için Gauss karışım modeline dayalı yeni bir örüntü tanıma yaklaşımı sunmuşlardır. Sause and Horn (2013) bir konsol kirişteki AE sinyallerini örüntü tanıma kullanarak matris çatlaması, arayüz kırılması ve fiber kopması türleri ile ilişkilendirmişlerdir. Farhidzadeh et. al. (2014) betondaki AE aktivitelerinin örüntü tanıma ile sınıflandırılmasında sensör ile kaynak arası mesafenin etkisini de araştırmışlardır. Ortalama frekans ve RA değeri ile yaptıkları çatlak sınıflandırmada, iki kümeyi birbirinden ayıran doğru denkleminin değiştiğini belirlemişlerdir. Ayrıca farklı AE parametrelerini kullanarak yaptıkları örüntü tanımada kaydeden sensöre göre aktiviteleri sınıflandırdıklarında, her sensörde farklı parametre kombinasyonu (genlik-enerji, genlik-merkezi frekans, genlik-süre, pik frekans-ortalama frekans ve RA değeri-ortalama frekans) etkili olmuş ve en yüksek hata tüm sensörlerin yer aldığı karışık veri setinde elde edilmiştir. Suthar et. al. (2017) AE aktivitelerinin RA değeri ve ortalama frekans ile kümelendirilmesinde farklı örüntü tanıma yaklaşımlarının sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Zhou et. al. (2018 ve 2018) karbon fiberli kompozitlerdeki matris çatlaması, delaminasyon, fiber/matris sıyrılması ve fiber kopması olaylarını sinyallerin frekans bilgilerine dayalı örüntü tanıma ile kümelendirmişlerdir. Çalışma sonunda literatürde bulunan bilgilerle de paralel olarak 0-100 kHz, 150-300 kHz ve 350-600 kHz frekans aralıklarını sırasıyla matris çatlaması, fiber/matris sıyrılması ve fiber kopması olarak tanımlamışlardır. Das et. al. (2019) çelik fiberli betonda ve çimento esaslı kompozitte çatlama modlarını kümelendirmek için örüntü tanımayı kullanmışlardır.

AE sinyallerini kümelendirmede hangi parametrelerin kullanılacağına ilişkin de literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin CFRP'de kırılma

mekanizmaları ile AE enerjisi arasında bir ilişki görülmemiştir (Sause and Horn, 2010). Ayrıca literatürde sensör lokasyonuyla ilgili olduğundan (bu çalışmanın da temelini oluşturan sebep budur) sinyalin genliğinin de aktivitenin türünden ziyade kırılma olayının büyüklüğüyle ilişkili olduğundan bahsedilmektedir (Bacaar, 2015). Sinyalin frekans özellikleri ise kırılma türü ile belirgin bir ilişki göstermektedir (Sause, 2013). Matris çatlamasının düşük, fiber aktivitesinin yüksek frekanslarda ayırt edilebildiğini farklı çalışmalar belirtmektedir. Yine bu çalışmalarda sinyalin merkez, ortalama veya pik gibi tek frekans değerine bağlı kalarak kümelendirme yapmanın yerine, merkez ve pik frekansın geometrik ortalaması olarak hesaplanan "ağırlıklı pik frekansı (weighted peak frequency, WPF)" değerlendirmenin daha sağlıklı olduğu ve sinyalin frekans karakteristiklerinin daha iyi ortaya konduğu görülmüştür (2.21). Burada merkez frekans (f_c), frekans spektrumunun kütle merkezi, pik frekans (f_p) ise ulaşılan en yüksek frekans değeridir. WPF'nin kümelendirmede birlikte değerlendirildiği parametre ise "kısmi güç (partial power, PP)"tür. PP, sinyalin belirli frekans aralıklarının frekans spektrumundaki yüzdesel katkıları olarak tanımlanmıştır ve farklı frekans aralıkları için birden çok PP hesaplanabilir (2.22) (PP1, PP2, PP3, …). Örneğin, bir AE dağılımında ulaşılan maksimum frekans değeri 1000 kHz ise, örüntü tanımada PP parametreleri 0-200 kHz (PP1), 200-500 kHz (PP2), 500-750 kHz (PP3) ve 750-1000 kHz (PP4) aralıklarına ayrılabilir. Sause et. al. (2012), Sause (2016), Bohmann et. al. (2018) PP'ye karşılık WPF dağılımlarında kümelendirme için en net ayrımı PP2 için elde etmiştir. Kelkel et. al. (2018), Tabrizi et. al. (2019), Qasim Ali et. al. (2019) ise benzer ayrımı PP1 için belirlemiştir.

$$Ağırlıklı\ pik\ frekans\ (WPF) = \sqrt{f_c \cdot f_p} \tag{2.21}$$

$$Kısmi\ güç\ (PP, \%) = \frac{\int_{f_i}^{f_j} \widetilde{U}^2(f)df}{\int_0^{fmax} \widetilde{U}^2(f)df} \tag{2.22}$$

$\widetilde{U}(f)$, $U(t)$ sinyalinin FFT'sidir.

3. LİTERATÜR TARAMASI

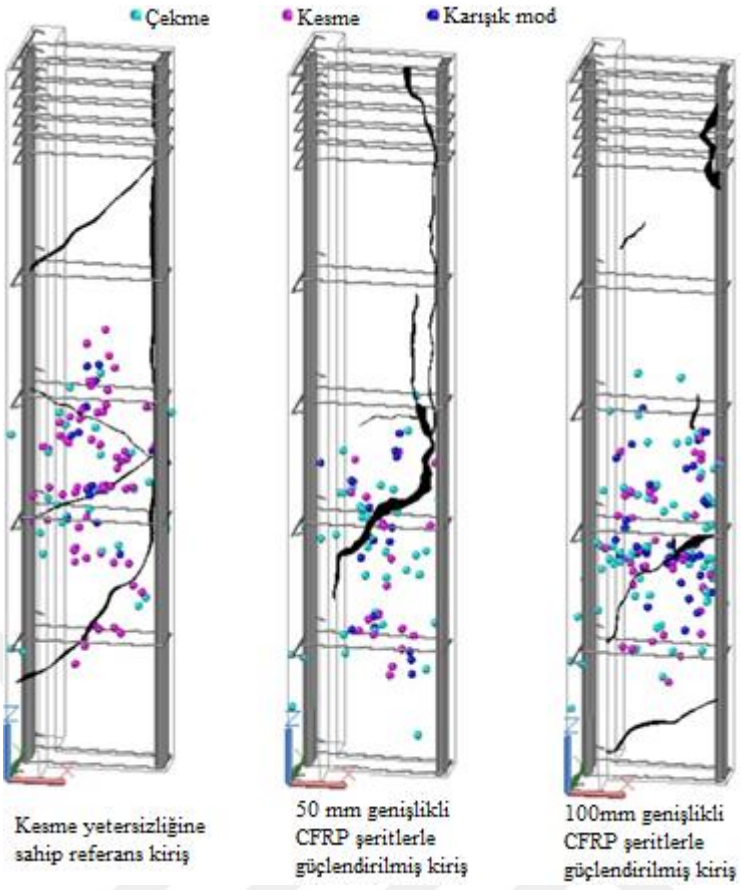
Bu başlıkta literatürdeki AE ile betonda hasar tespiti uygulamaları ve hasar tespiti sırasında karşılaşılan sorunları ortaya koyan güncel çalışmalar iki başlık halinde sunulmuştur:

3.1. AE ile Betonda Hasar Tespitinin Güncel Uygulamaları

Betondaki hasarları incelemede AE tekniğinin kullanımına ilişkin literatürdeki çalışmalar oldukça geniş bir yelpazededir. Bu çalışmalar genel olarak farklı statik ve dinamik yüklemeler etkisindeki beton ve betonarme elemanların çatlak ilerleyişlerinin, güçlendirme malzemesi ile beton ara yüzeyinde meydana gelen hasar mekanizmalarının ve donatı korozyonunun incelenmesi olarak sınıflandırılabilir.

Alver et al. (2017) kesmeye karşı U-şekilli CFRP şeritlerle güçlendirilmiş bir betonarme kirişin tersinir tekrarlı yükleme altındaki davranışı AE ile incelenmiştir. Çalışmanın devamında ise Tayfur et al. (2018) CFRP şerit genişliğinin kırılma mekanizmalarına etkisini belirlemek için AE parametre analizi ve SiGMA analizlerini kullanmışlardır. Deneysel çalışma kapsamında, bir referans kiriş ve iki CFRP ile güçlendirilmiş kiriş tersinir tekrarlı yükleme altında test edilmiş ve AE ile izlenmiştir. Hem mekanik hem de AE sonuçları, davranışın şerit genişliğini artırarak geliştirilmediğini göstermektedir. Şekil 3.1 çalışma sonunda SiGMA analizi ile elde edilen çatlak türlerini ve konumlarını göstermektedir.

Prem and Murthy (2018) çalışmalarında dört-nokta-eğilme etkisindeki farklı boyuna donatı oranlarına sahip betonarme kirişlerin hasar mekanizmalarını AE ile izlemişlerdir. Sonuçları hasar oluşumuyla beraber ortalama frekans hariç tüm AE parametrelerinin yükseldiği, donatı miktarının ise bu durumu değiştirmediği yönündedir.

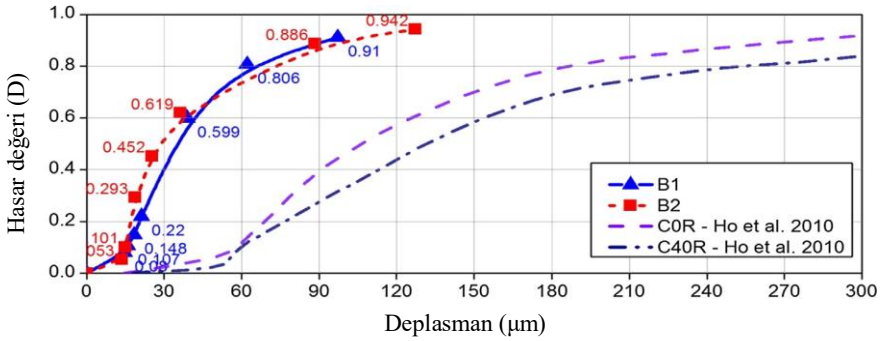


Şekil 3.1. SiGMA analizi ile AE aktivitelerinin konumlandırılması ve türlerinin belirlenmesi (Tayfur et. al., 2018).

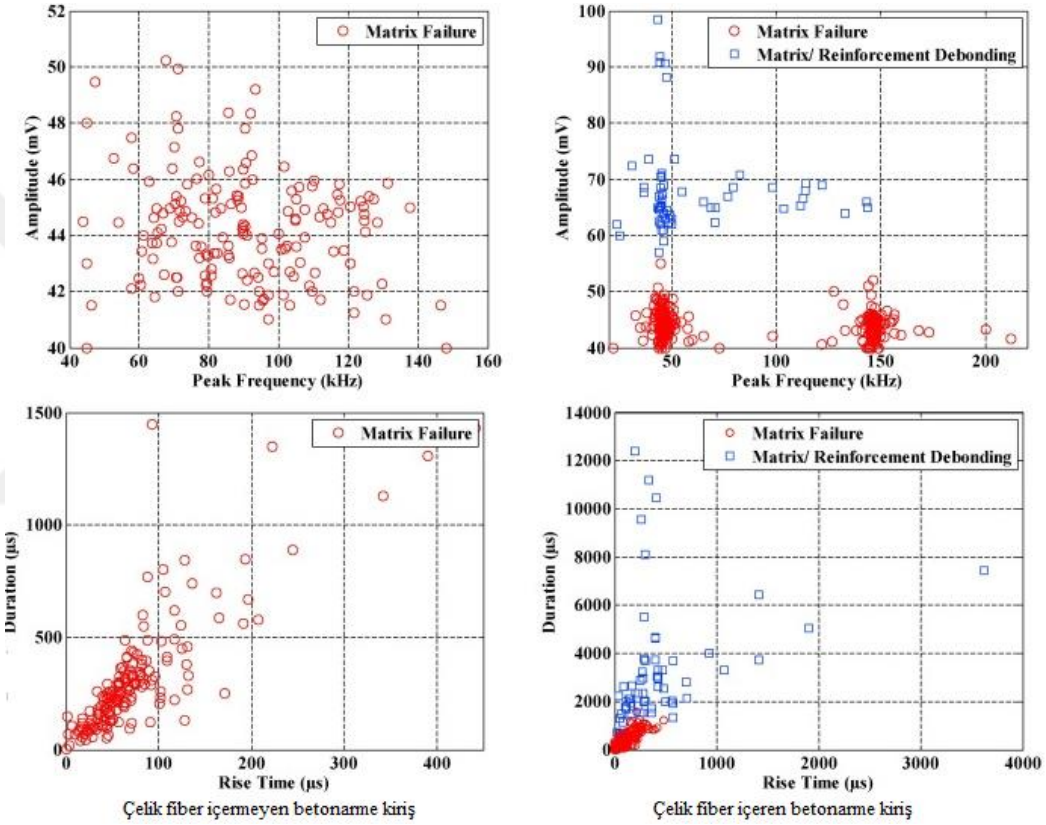
Nguyen-Tat et al. (2018) eğilmeye maruz beton kirişlerdeki hasarları AE ile değerlendirirken Durgunluk (Calm) ve Yük (Load) Oranları (Hasar İndeksleri)'nı kullanmışlardır (Numunelerin bu sayede belirledikleri hasar derecelerinin mekanik olarak gözledikleri hasarlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.2).

Tayfur et al. (2018) çelik fiber içeren betonarme kirişin eğilme altında gelişen AE aktivitelerini Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA) ile kümelendirmişlerdir. Çalışmada elde edilen bulgular beton çatlaması ile fiber aktivitesini kümelendirmede en iyi sonucu "yükselme zamanı - sayı" ve "süre - genlik" dağılım modellerinin verdiğini göstermiştir. "Pik frekans-genlik" ve "yükselme zamanı-süre" dağılım modellerini kullanarak ise ayrım yapmanın mümkün olmadığı görülmüştür (Şekil 3.3).

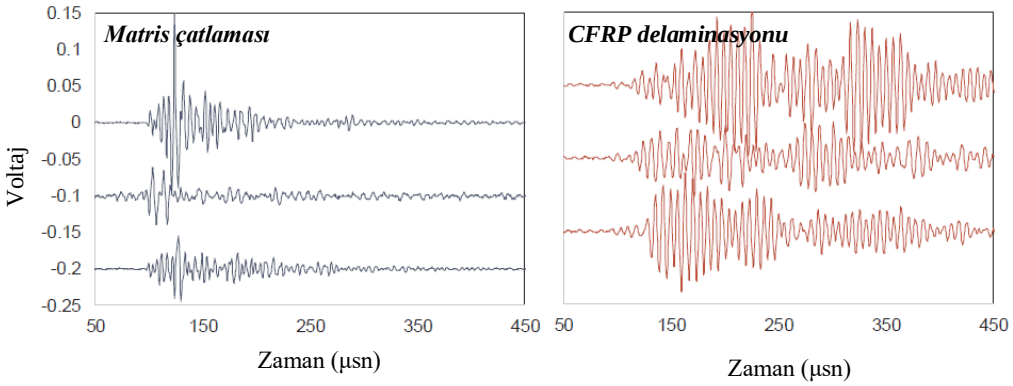
Aggelis et al. (2019) çalışmalarında eğilme davranışını inceledikleri CFRP ile güçlendirilmiş kirişte matris çatlaması ve CFRP delaminasyonuna ait AE sinyallerini Şekil 3.4'teki gibi belirlemişlerdir.



Şekil 3.2. Beton kirişlerde AE ile belirlenen hasar değerinin deplasmanla ilişkisi (Nguyen-Tat et al., 2018).



Şekil 3.3. Tayfur et. al. (2018) tarafından AE aktivitelerinin çelik fiber aktivitesi ile beton matris çatlaması olarak PCA ile kümelendirilmesi.

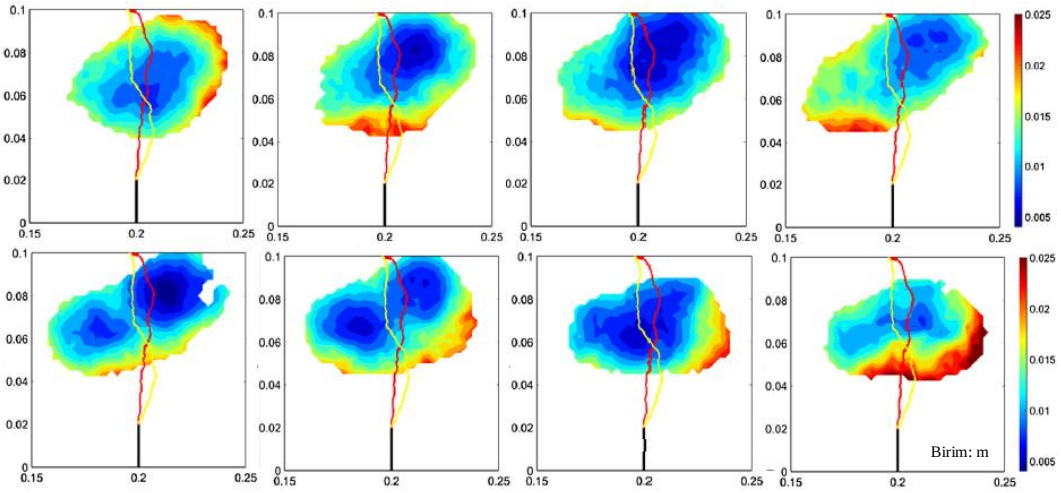


Şekil 3.4. Matris çatlaması ve CFRP delaminasyonu hasarlarından elde edilen farklı frekanslara sahip AE sinyalleri (Aggelis et al., 2019).

Lacidogna et al. (2019) çalışmalarında üç-nokta-eğilme altındaki çentikli beton kiriş numunelerde çatlak ilerleyişlerini AE ve rezonans frekanslarıyla değerlendirmişlerdir. Çatlak modu belirlemede ortalama frekans ve RA değeri ilişkisini, çatlak gelişimi değerlendirmesinde ise kümülatif AE enerjisi ve rezonans frekans parametrelerini kullanmışlardır. Sonuçlar bahsedilen yöntemlerin hasar düzeyinin gerçekçi bir şekilde tahmin edilmesine yönelik faydalı olduğunu göstermiştir.

Ma and Du (2020) öngermeli betonarme elemanlarda AE ile kaydedilen hasar verilerinin derin sinir ağları modelleriyle geliştirilerek değerlendirilmesine ilişkin bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Farklı AE parametrelerinin kombinasyonlarını incelerken, değerlerinin sadece yüke değil malzemeye de bağlı olduğunu görmüşlerdir.

Ren et al. (2020) çimento ve beton kirişlerin eğilme etkisindeki davranışlarını AE ile incelerken *b*-değeri ve AE olayı yoğunluğu parametrelerini birlikte kullanarak "*T* değeri" olarak adlandırdıkları ve malzemenin çatlama durumunu görselleştiren bir parametre geliştirmişlerdir. Bu değerin düşük olmasını çatlak oluşumu ve gelişimiyle ilişkilendirmişlerdir ve sayısal verileri kontur haritalarına dökerek numunelerin hasar durumlarını belirlemişlerdir (Şekil 3.5).



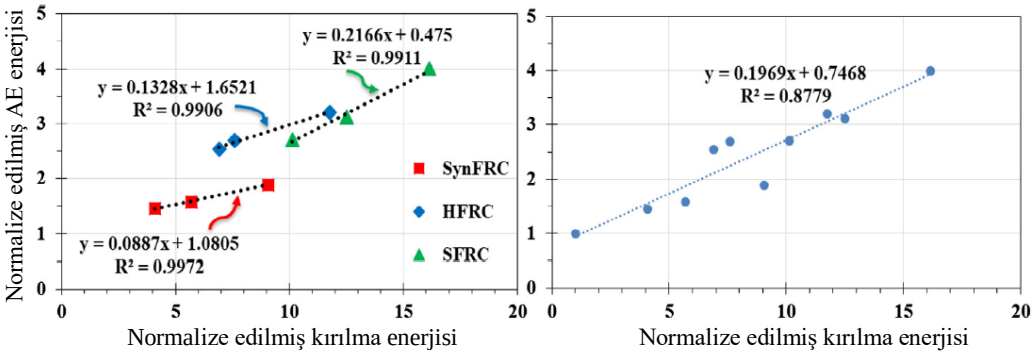
Şekil 3.5. Ren et al. (2020) tarafından *T*-değeri ile oluşturulan betonda çatlak görselleri.

Chen et al. (2020) yükleme hızının betonun eğilme altındaki kırılma davranışına etkilerini AE ile incelemişlerdir. Yükleme hızının *b*-değeri davranışına etkisi de yorumlanmıştır. Böylece yükleme hızıyla gevrekliğin ve ortalama frekans ve RA değeri ilişkilerine göre de kesme göçmesi eğiliminin arttığı belirlenmiştir.

Ma and Li (2017) FRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların tersinir tekrarlı yükleme etkisindeki çatlak oluşumlarının AE vuruşu analizlerine göre dört hasar seviyesine ayrıldığını görmüşlerdir. Çalışmada, genlik dağılımlarının uç deplasman değerleriyle ilişkili olduğu ve b-değeri analizi ile hasar ölçeğinin belirlenebileceği belirtilmiştir. Ek olarak, AE enerjisi ve histeretik enerji birbirleriyle uyumlu olmuştur.

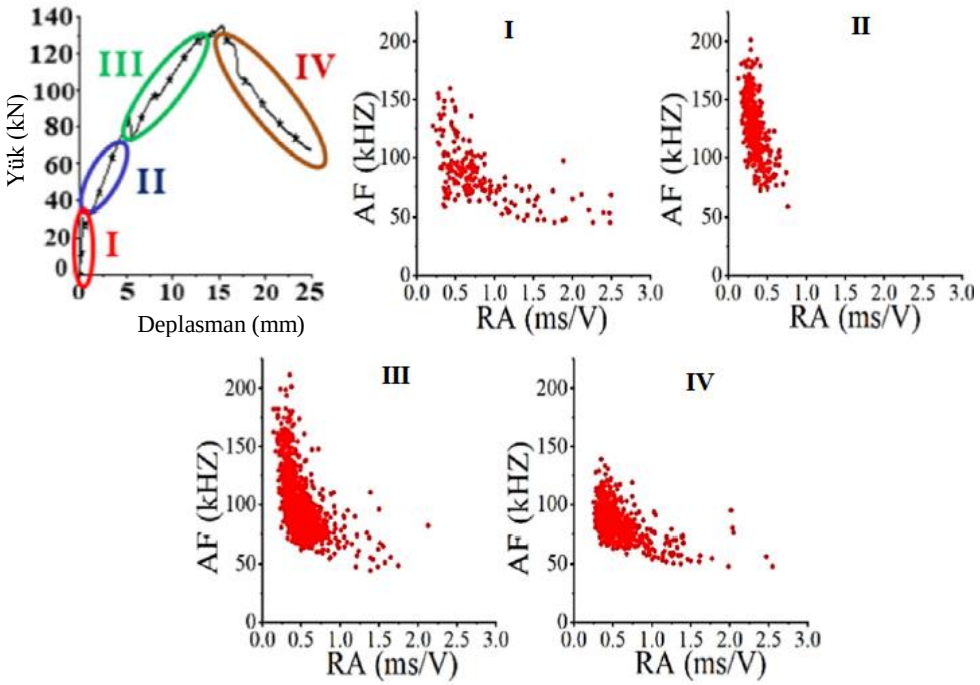
Li et al. (2018)'ın çalışmalarında çelik fiberli betonarme kirişte fiber türünün, miktarının ve geometrisinin kirişin eğilme ve AE davranışlarında etkili olduğu görülmektedir. En iyi eğilme davranışı kancalı fiber kullanımında elde edilirken, aynı zamanda fiber sıyrılması ve kayması aktiviteleri sebebiyle en çok AE olayı da bu elemanda kaydedilmiştir.

Bhosale et al. (2019) çelik, sentetik ve hibrit fiberlerin betonun kırılma davranışına etkisini AE ile araştırmışlardır. En iyi davranış sırayla çelik, hibrit ve sentetik fiberden elde edilmiştir ve tüm fiber türlerinde AE ve kırılma enerjileri fiber miktarıyla artmıştır (Şekil 3.6). AE vuruşu ve üç boyutlu kaynak konumlandırma analizleri ile çatlak konumu ve genişliği belirlenebileceği belirtilmiştir.



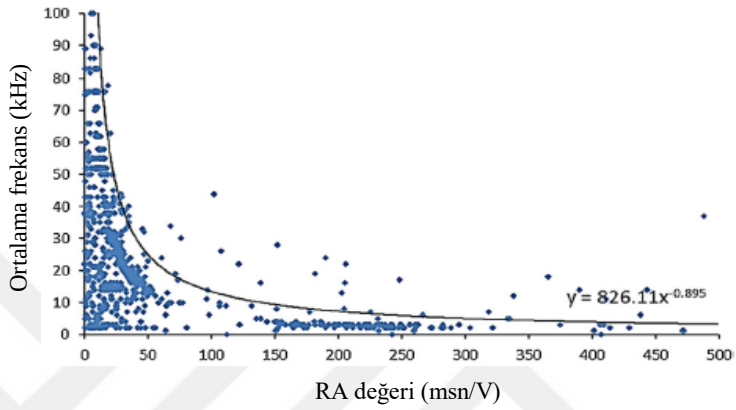
Şekil 3.6. Farklı fiber türleri içeren beton elemanlarda AE enerjisi ve kırılma enerjisi arasındaki korelasyon (Bhosale et al., 2019).

Dev et al. (2020) makro sentetik ve hibrit fiber takviyeli GFRP donatılı betonarme kirişlerde AE ile kesme etkisinde hasar modu analizi gerçekleştirmişlerdir. Mekanik ve AE analizleri fiber miktarının artmasıyla diyagonal kesme çatlağı açısının ve AE miktarının, arttığını göstermiştir. Hibrit fiberli numunede ise yüksek fiber miktarı kırılma türünü kesmeden eğilmeye çevirmiştir. Ayrıca parametre analizi sonuçları ileri yük seviyelerinde fiberlerden kaynaklanan aktivitelerin kesme türündeki AE miktarını arttırdığını göstermektedir (Şekil 3.7).



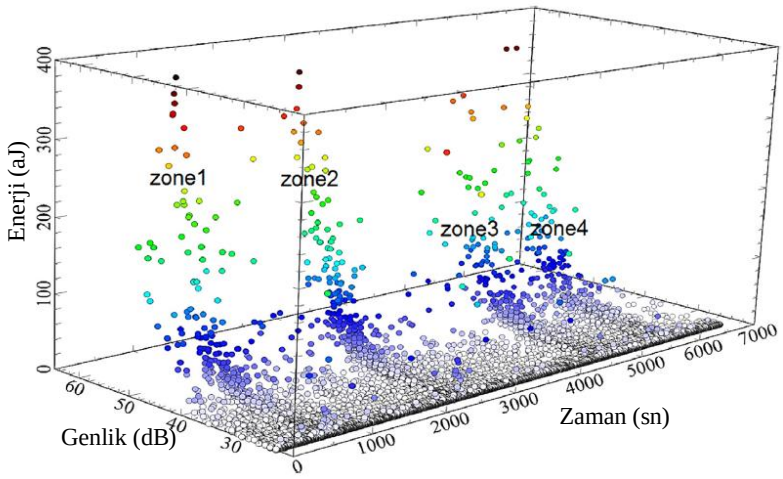
Şekil 3.7. Bir GFRP kirişin farklı yük seviyelerinde kaydedilen AE sinyallerinin ortalama frekans ve RA değeri ilişkileri (Dev et al., 2020).

Goldaran and Turer (2020) öngerilmeli silindir borularda korozyon hasarlarının farklı türlerini AE ile araştırmışlardır. Bunun için ortalama frekans ve RA değeri ilişkilerini değerlendirmişler ve bu parametrelerin betonun su emmesi, hidrojen baloncuklarının patlaması ve beton çatlaması hasarlarına göre farklılık gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca bahsedilen çalışma için ortalama frekans ve RA değeri parametreleri arasındaki ampirik ilişkiyi de Şekil 3.8'deki gibi tanımlamışlardır.



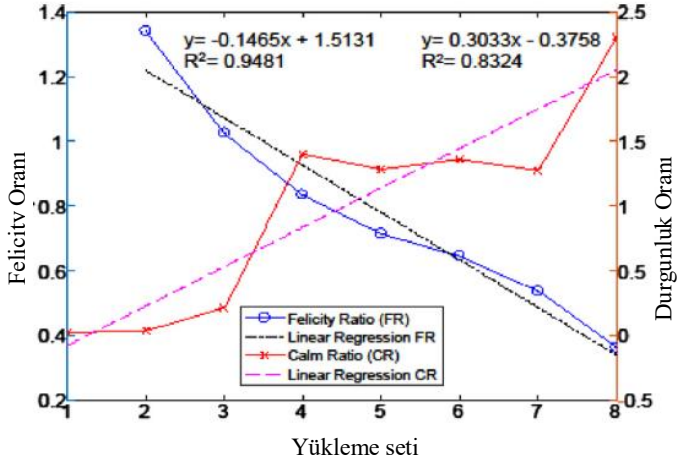
Şekil 3.8. Goldaran and Turer (2020)'nin çalışmalarındaki AE aktivitelerine göre tanımladıkları ortalama frekans ve RA değerleri arasındaki ampirik ilişki.

Goldaran et al. (2020) öngerilmeli beton borudaki korozyon hasarını AE ile incelerken, kuru numunede üretilen AE sinyallerin mukavemeti, genliği ve enerjisi, doygun numunede üretilenlere göre genliği daha fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, borudaki bağlantıda katodik koruma plakası ve spiral çubuk arasındaki süreksizliğe bağlı genlik düşüşünün yaklaşık 10 dB olduğunu göstermiştir. Bu sebeple üretilen sinyallerin ilerledikçe zayıfladığı ve AE dalgalarını yakalamak için çok sayıda sensör gerekli olduğu belirtilmiştir. Deney süresince kaydedilen AE sinyallerinin zamana bağlı enerji ve genlik değişimleri de üç boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Böylece sinyal genliği arttıkça (özellikle belirli seviyelerin üzerine çıktıkça) enerjisinin de büyük miktarda arttığı görülmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Korozyon oluşumu süresince zamana bağlı AE genliği ve enerjisi ilişkisi (Goldaran et al., 2020).

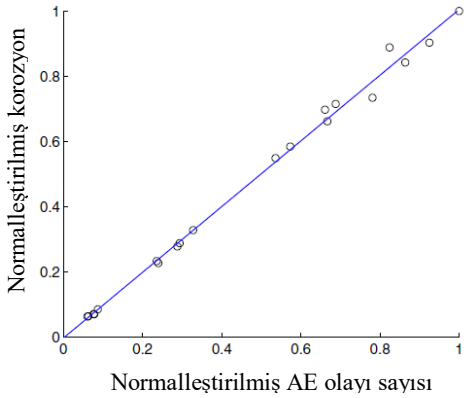
Shadid et al. (2020) çevrimsel yük testi altındaki betonarme kirişlerin farklı korozyonlara uğramış durumlarını izlemek için AE tekniğini kullanmışlardır. Araştırmacılar kümülatif AE sinyal gücü (CSS) oranının küçük hasarları tanımlamak için yararlı olduğunu, Felicity ve Durgunluk Oranları'nın ise orta ve ağır hasarları belirlemede uygun olduğunu ortaya koymuşlardır. Farklı yükleme setlerine göre elde ettikleri Felicity ve Durgunluk Oranları arasındaki ilişki Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Shadid et al. (2020)'ın korozyona maruz betonarme kirişlerin farklı yükleme setlerine göre elde ettikleri Felicity ve Durgunluk Oranları ilişkileri.

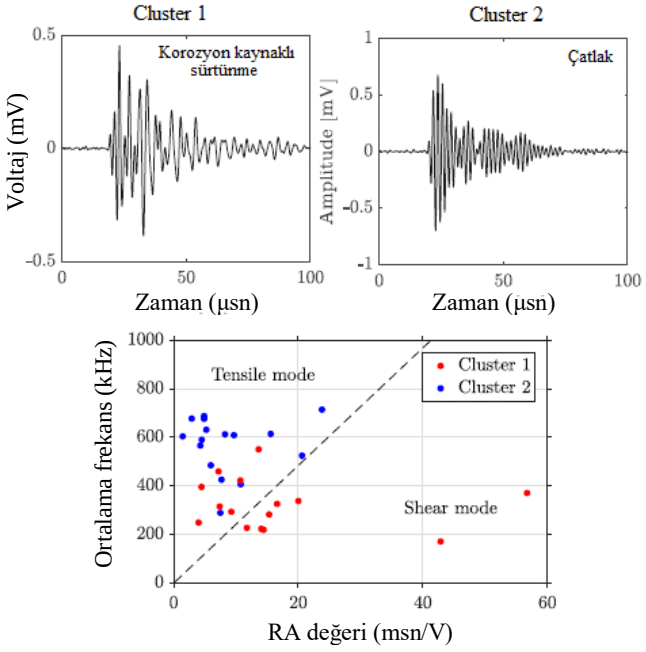
Yu et al. (2020) bir dizi kontrollü ve hızlandırılmış korozyon testinde aşındırıcı hasarın dağılımını AE ile araştırmışlardır. AE özelliklerini aşınmış donatı korozyonu ile ilişkilendirmek için AE enerji dağılımına dayanarak Gauss dağılım

işlevine dayalı bir model oluşturulmuştur. Araştırmacıların korozyon oluşumu ile AE oluşumu arasında elde ettikleri güçlü ilişki Şekil 3.11'de verilmiştir.



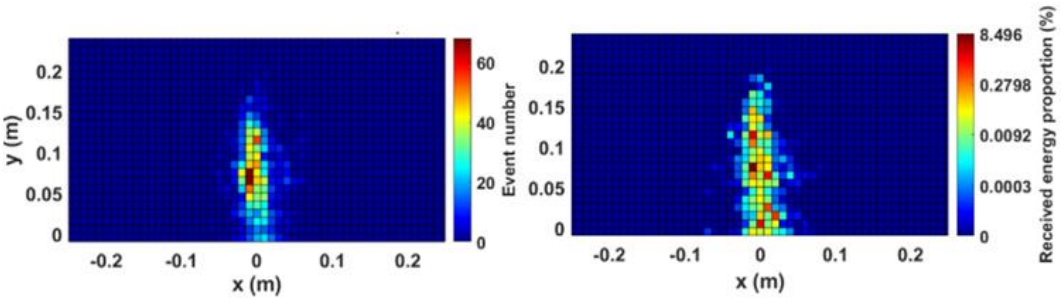
Şekil 3.11. Yu et al. (2020)'ın çalışmalarında elde ettikleri korozyon ve AE olayı sayısı ilişkisi.

Van Steen et al. (2019) harç numunelerdeki klorür kaynaklı hızlandırılmış korozyon hasarının lokalizasyonu ve karakterizasyonu için AE kullanımını doğrulamak için mikrofokus X-ışını bilgisayarlı tomografisi kullanmışlardır. AE lokalizasyonuna ek olarak AE olaylarının korozyon ürünlerinin ortaya çıkmasından kaynaklanan sürtünme ve korozyona bağlı farklı hasar türlerini ayırt etmeyi sağlayan ve sonuçları tomografi görüntüleriyle de örtüşen yeni bir sinyal bazlı kümeleme algoritması önermişlerdir. Şekil 3.12'de çatlak ve korozyon kaynaklı sürtünme hasarlarının AE karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 3.12. Çatlak ve korozyon kaynaklı sürtünmenin AE karakteristikleri (Van Steel et al., 2019).

Boniface et al. (2020) betondaki AE kaynaklarının lokalizasyonunun doğruluğunu AE sinyali varış zamanı seçici ve konumlama yöntemlerini karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, varış zamanı tespitinin AE lokalizasyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışmada AE olayları ve enerjilerinin dağılımına dayanan istatistiksel bir analiz sunulmuştur ve sonuçlar DIC sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.13'te bu istatistiksel analiz sonucu elde edilen çatlak konumlandırma sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 3.13. AE olayı ve enerjilerinin dağılımına dayanan istatistiksel bir yaklaşımla betonda çatlak konumlandırması (Boniface et al., 2020).

Mirgal et al. (2020) çalışmaları betondaki AE kaynaklarını konumlandırmada çevrimiçi bir yapısal sağlık izleme sisteminin geliştirilmesi üzerinedir. Araştırmacılar sistemi öncelikle beton plaklar üzerinde kalem ucu kırığı aktivitelerini İteratif Düzlemsel Kaynak (IPS) algoritması ile konumlandırarak doğrulamışlardır. Daha sonra her bir sensör ağı düzenlemesi için evrimsel bir Parçacık-Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasından elde edilenlerle sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, manuel müdahale olmaksızın beton yapılarda hasar kaynaklı AE kaynaklarının konumlandırılması için çevrimiçi izleme sisteminin kullanılabilirliğini doğrulamıştır.

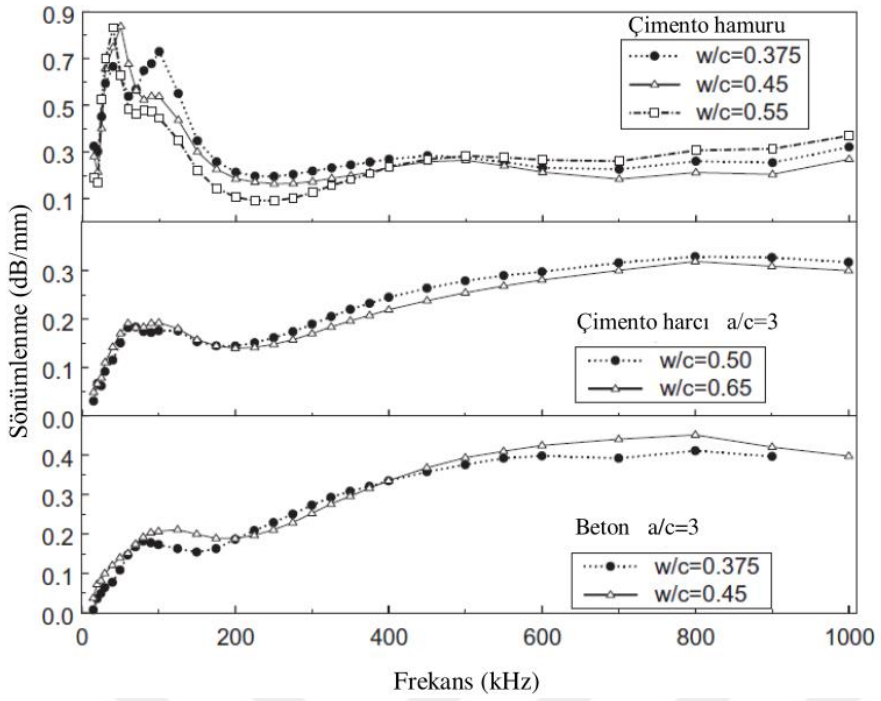
3.2. AE ile Hasar Tespitinde Karşılaşılan Sorunlar

AE ile hasarın büyüklüğü, lokasyonu ve türü gibi özellikleri elde etmek için malzeme yüzeyine yerleştirilen sensörler tarafından kaydedilen dalga sinyallerinin parametreleri kullanılmaktadır. Bu sebeple AE parametrelerinin doğruluğu analiz sonuçlarını, dolayısıyla betonun kırılma mekanizması hakkında elde edilen bilgileri doğrudan etkilemektedir. Betondan elde edilen AE parametrelerinin doğruluğu hakkında şüpheye düşülmesinin en önemli sebebi çimento, su, agrega ve diğer katkı malzemelerinden oluşan hava boşluklu betonun heterojen ve anizotrop yapıda bir

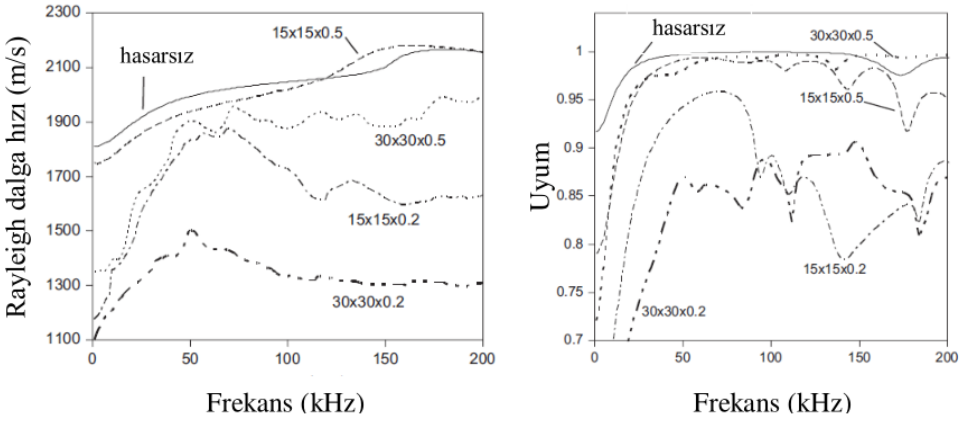
malzeme olmasıdır. Bu durum betonun dispersiv (frekanslarına dağıtıcı) olmasına ve malzeme içerisinde yayılan elastik dalgaların dispersiyonuna ve sönümlenmesine (enerji kaybetmesi) neden olmaktadır. Bazı çalışmalar bu problemlerin beton içerisinde bulunan agregaların boyutlarının büyümesiyle arttığını belirtse de, daha sonra yapılan çalışmalar (Kim et al., 1991; Gaydecki et al., 1992; Jacobs et al., 2000) asıl problemin agrega içeriği ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Çünkü beton içerisindeki agrega miktarı arttıkça dalga hızı artmakta ve çimento hamurundan daha yüksek akustik empedansa sahip olan agregalar tarafından alınan yüksek frekanslı sinyallerin miktarı düşmektedir (Otsuki et al., 2000; Philippidis and Aggelis, 2005).

Phillippidis and Aggelis (2005) agrega miktarının dalga yayılımı üzerindeki etkisini belirlemek için çimento hamuru, çimento harcı ve beton numuneler üzerinde çalışmışlardır. Çimento hamurunda farklı su/çimento (S/Ç) oranları, çimento harcı ve betonda ise farklı S/Ç ve agrega/çimento (A/Ç) oranlarını değişken olarak belirlemişlerdir. Araştırmacıların elde ettikleri bulgular çimento hamuru ve harcında S/Ç oranının (Şekil 3.14), çimento harcı ve betonda A/Ç oranının dalga yayılımı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca çimento harcı ve beton numunelerdeki dalga yayılımlarını karşılaştırarak agrega büyüklüğünün sönümlenme üzerinde büyük etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Aggelis and Shiotani (2008) farklı şekil ve boyutlarda vinil yapay hasarlar içeren harç numunelerde kalem ucu kırma kaynağı ile malzeme içerisinde yayılan Rayleigh dalgalarının hız ve frekans dağılımlarını incelemişlerdir. Çalışmada elde edilen bulgular yapay hasarlı numunelerdeki dağılımların homojen malzeme davranışından farklı olduğunu göstermiştir. İçerik şekillerine bağlı olarak dalga hızında %20'ye varan değişiklikler elde edilmiştir. Farklı frekans aralıklarındaki dalga formlarının uyum fonksiyonları, eşit hacimde yapay hasar içeren numuneler arasında hasar içermeyen numuneye göre en yakın sonuçların en büyük ve en kalın hasarlara sahip numunede elde edildiğini göstermiştir (Şekil 3.15). Bu durum dağıtıcılık özelliğinin artmasıyla dalga hızının sadece hasar miktarından değil, aynı zamanda büyüklüğünden de etkilendiğini ortaya koymuştur.

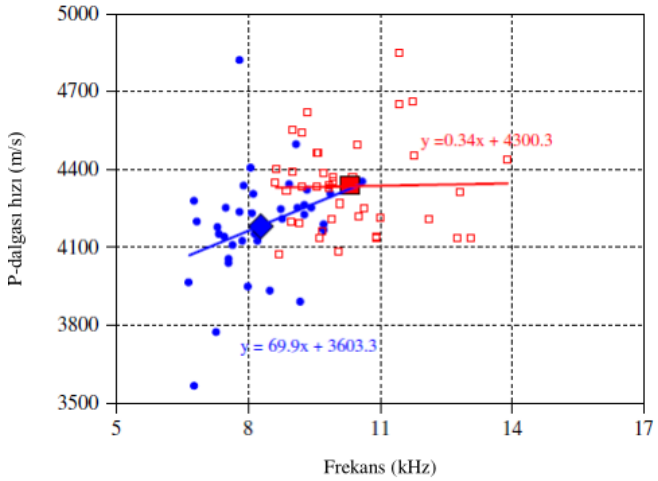


Şekil 3.14. Sönümlenme değişimine S/Ç oranının etkisi: (Phillippidis and Aggelis, 2005).



Şekil 3.15. Yapay hasar boyutunun Rayleigh dalga hızı ve uyum fonksiyonuna etkisi (Aggelis and Shiotani, 2008).

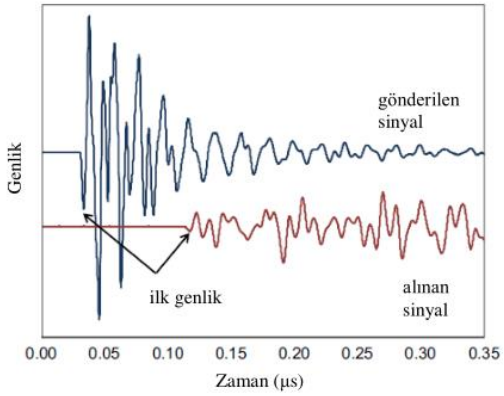
Aggelis et. al. (2009) geniş beton yüzeylerde çimento enjeksiyonu ile onarımın dalga yayılımına etkisini incelemişlerdir. Bunun için dalga yayılma hızı ve mesafesi, frekans ve sinyal genliklerinin birbirleriyle göre değişimlerini oluşturarak ayırt edici sonuçlara ulaşmışlardır. Bulgular çimento enjeksiyonu ile onarım sonrası dağıtıcılığın azalmasıyla boyuna ve Rayleigh dalga hızlarında sırasıyla %5 ve %6 artışlar olduğunu göstermiştir (Şekil 3.16).



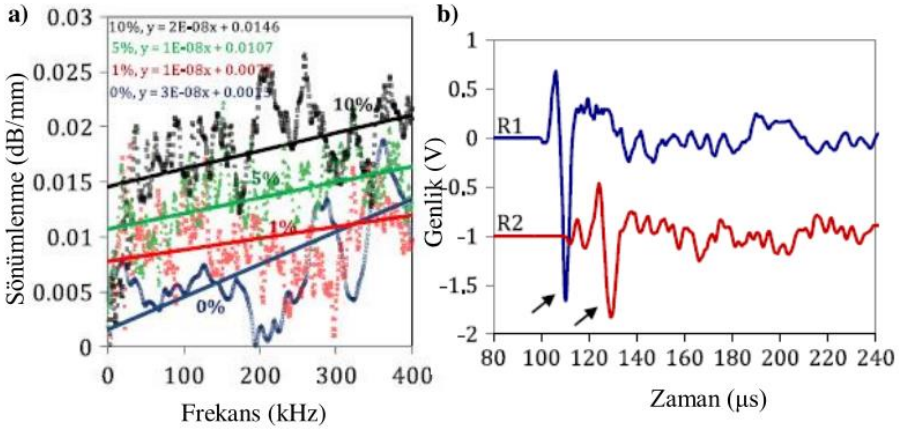
Şekil 3.16. Betonun çimento enjeksiyonu ile onarılmasının frekansa bağlı P-dalgası hızı değişimine etkisi: onarım öncesi (mavi), onarım sonrası (kırmızı) (Aggelis et al., 2009).

Chai et al. (2011) ultrasonik dalganın sönümlenmesinden faydalanarak tomografik görüntü oluşturmuşlardır. Araştırmacılar yüzey çatlağını temsil eden bir yapay boşluk içeren beton küp numunede farklı lokasyonlardan gönderilen dalgaların yayılımlarını incelemişlerdir. Sönümlenmenin etkisiyle alıcıdan elde edilen sinyal formu, gönderilen sinyal formundan farklılık göstermiştir ve sinyalin genliği azalmıştır (Şekil 3.17). Ayrıca kaynak ile sensör arası mesafe artmasıyla sönümlenme sebebiyle dalganın sensöre ulaşamadığı dahi görülmüştür.

Aggelis and Shiotani (2012) heterojenlik miktarının harç numunelerdeki elastik dalgalara etkilerini inceledikleri çalışmalarında, farklı hacimlerde vinil yapay hasarlar içeren numuneler üzerinde kalem ucu kırma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Her numunede yayılan dalgaların sensörlere varış sürelerinin ve hızlarının yanı sıra, sönümlenme eğrilerini de belirleyerek, vinil ilavelerin hacimleriyle değişen heterojenlik miktarının dalga parametreleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır. Bulgular Rayleigh dalgasının boyuna dalgalara göre heterojenliğe karşı daha hassas ve yaklaşık altı kat daha sönümlenebilir olduğunu göstermiştir. Her iki dalga türünde de vinil ilaveler sönümlenmeyi artırmış, çok sayıda küçük ilaveler içeren numunelerde ise sönümlenme neredeyse iki katına çıkmıştır (Şekil 3.18).

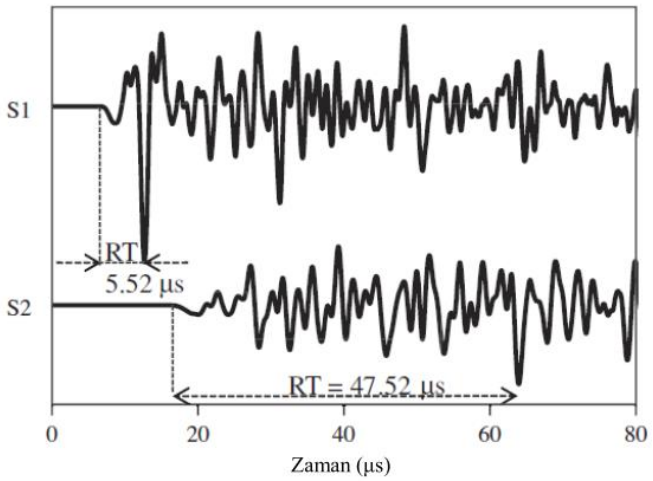


Şekil 3.17. Betonda gönderilen ve alınan sinyal (Chai et al., 2011).



Şekil 3.18. a) Yapay hasar oranının betonda sönümlenmeye etkisi, b) Sensör uzaklığının sinyal varış zamanı ve genliğe etkisi: R1 (yakın), R2 (uzak) (Aggelis and Shiotani, 2012).

Aggelis et al. (2012) çimento esaslı malzemelerde AE kaynağı ve sensörü arasındaki mesafenin AE parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla düz ve çelik fiberli çimento harcı numunelerini üç-nokta-eğilme altında test etmişler ve farklı lokasyonlarda bulunan sensörler tarafından algılanan AE aktivitelerini değerlendirmişlerdir. Bulgular dalgaların sensörden uzaklaştıkça sürekli olarak bozulduğunu ortaya koymuştur. Kaynaktan uzaklaştıkça yükselme süresinde meydana gelen büyük değişiklik, kaynak türü belirlemede hatalı sonuçlar doğacağını göstermiştir (Şekil 3.19). Ayrıca çelik fiberli elemanda oluşan fazlalık yörüngeler ile RA değerleri yaklaşık üç kat artarken, ortalama frekans değerleri üç kat azalmıştır.

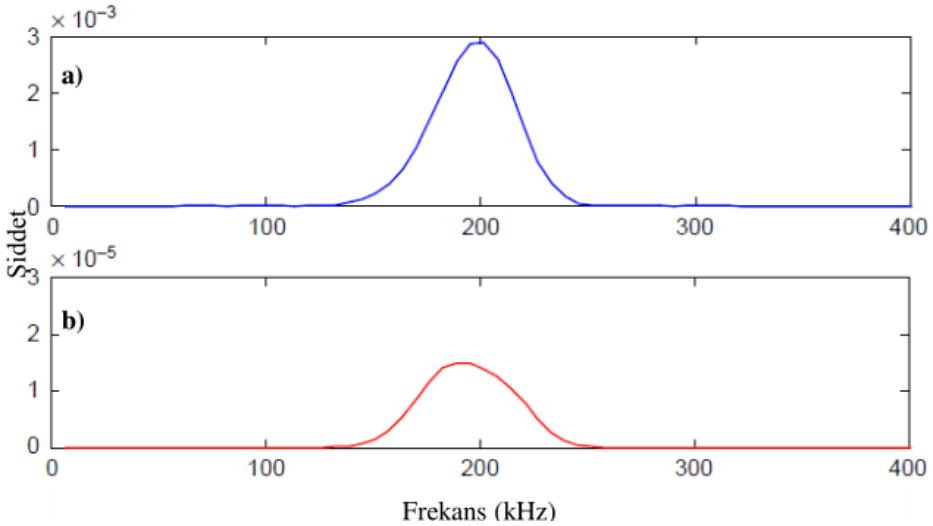


Şekil 3.19. Çimento harcında AE sinyalinin sönümlenmesi: S1 (kaynağa yakın sensör), S2 (kaynaktan uzak sensör) (Aggelis et al., 2012).

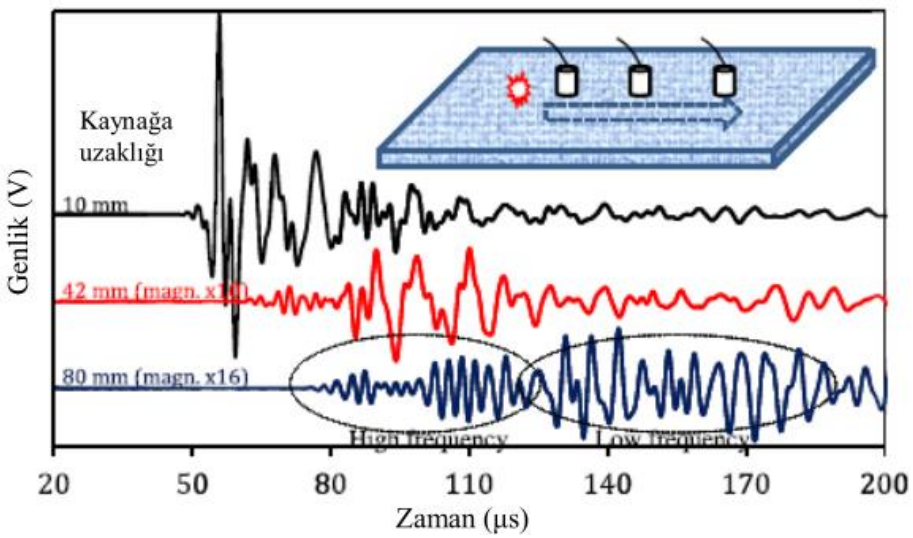
Yim et al. (2012) farklı özelliklere sahip çimento hamuru ve beton numunelere gönderdikleri ultrasonik sinyallerin sönümlenmelerini incelemiş, her iki numune türünde de gönderilen ve alınan sinyallerin genlik değerlerinin düştüğünü belirlemişlerdir. Ayrıca bulgular, sönümlenmenin agrega etrafındaki fazlalık boşluklar sebebiyle betonda daha fazla, yüksek frekanslarda daha hassas olduğunu göstermiştir (Şekil 3.20).

Carpinteri et. al. (2013) çalışmalarında hasarın AE parametrelerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla harç, beton ve taş numunelerin kırılma mekanizmalarını AE ile incelemişlerdir. Bulgular sinyal kaynağının sensörden uzaklaştıkça dalganın bozulmasıyla enerjinin, frekansın ve sürenin azaldığını ortaya koymuştur (Şekil 3.21). Ayrıca numune boyutundaki değişim dalga yayılım yörüngesini de değiştirmiştir.

Fan et al. (2013) çalışmalarında darbe ve tek eksenli basınç etkileri altında betonda gelişen dalga yayılımlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgular gerilme dalgası yayılımı altında betonun viskoelastik davranış sergilediğini ve dalga frekansına bağlı betonun dinamik viskoelastisite modülünün değiştiğini göstermiştir. Ayrıca yine dalga frekansına bağlı olarak sönümlenmenin belli bir noktaya kadar değişmediğini, belli açısal frekansların üzerinde ise arttığını ortaya koymuşlardır.

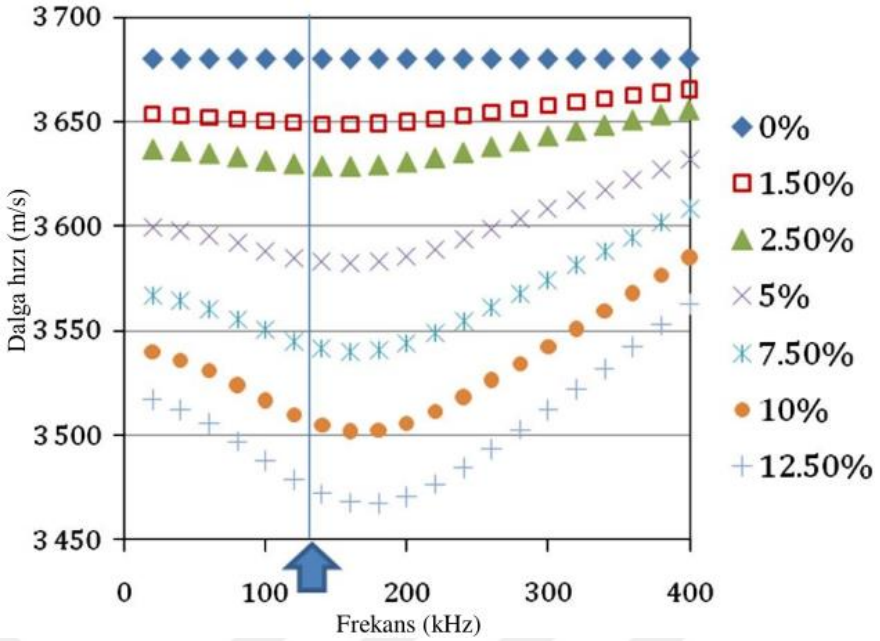


Şekil 3.20. Çimento hamurunda ultrasonik sinyalin sönümlenmesi: a) gönderilen, b) alınan sinyal (Yim et al., 2012).



Şekil 3.21. Fiberli çimento harç levhada farklı uzaklıktaki sensörler tarafından algılananan AE dalgalarının sönümlenmeleri (Carpinteri et al., 2013).

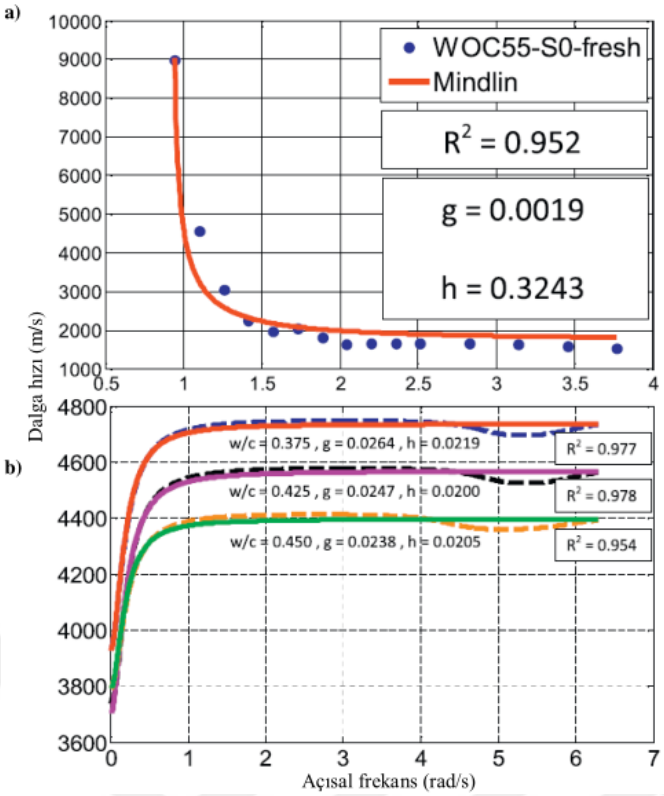
Mpalaskas et al. (2014) yapay hasarlı çimento esaslı malzemelerin mekanik ve kırılma özelliklerini belirlemek için farklı karışımlara sahip çimento harcı numunelerinin kırılma yükleri ve yapay hasar miktarları arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Bunun için yükleme öncesi ultrasonik eko, üç nokta eğilme yüklemesinde ise AE'yi kullanmışlardır. Bulgular ultrasonik hızların yapay hasar içeriğiyle, AE enerji parametrelerinin ise kırılma yükü ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca yapay hasar miktarının artmasıyla P- ve R-dalgası hızlarının azaldığı ve hızların frekansa bağlı değişimlerinin düzensizleştiği görülmüştür (Şekil 3.22).



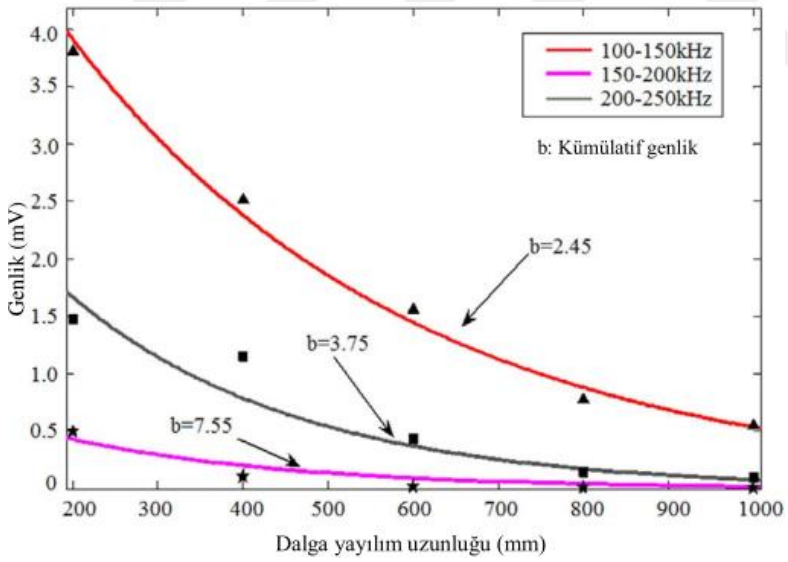
Şekil 3.22. Farklı miktarlarda yapay hasar içeren çimentı harcı numunelerinde dalga hızılarının frekansa bağlı değişimi (Mpalaskas et al., 2014).

Iliopoulos et al. (2016) farklı su ve kum oranlarına sahip taze ve sertleşmiş betonlarda dalga hızı değişimini deneysel ve analitik olarak belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu sebeple analitik kapsamda beton gibi heterojen malzemelerdeki mikroyapısal etkileri de göz önünde bulunduran ve şekil değiştirme gradyanına dayalı bir elastik teoriyi kullanmışlardır. Elastik dalga her betonun her iki durumunda da dispersiyona uğrarken, açısal hıza göre dalga hızının değişimini incelediklerinde taze betonda hızın açısal frekansın artmasıyla azaldığını ortaya koymuşlardır (Şekil 3.23).

Feng and Yi (2017) çalışmalarında betonarme kiriş elemanda kalem ucu kırığı kaynağıyla yayılan AE dalgalarının sönümlenmelerini deneysel ve analitik olarak Hilbert-Huang Dönüşümü ile incelemişlerdir. Sinyallerin farklı frekans aralıklarına da bağlı olarak zamana bağlı genlik değişimlerini belirlemişler ve bu değişimleri kaynağın sensöre olan mesafesi ve dalga yayılım uzunluğu ile ilişkilendirmişlerdir. Bulgular dalga kaynağının sensörden uzaklaşması ve dalga yayılım uzunluğunun artmasıyla sinyal genlik değerlerinin azaldığını göstermiştir (Şekil 3.24).



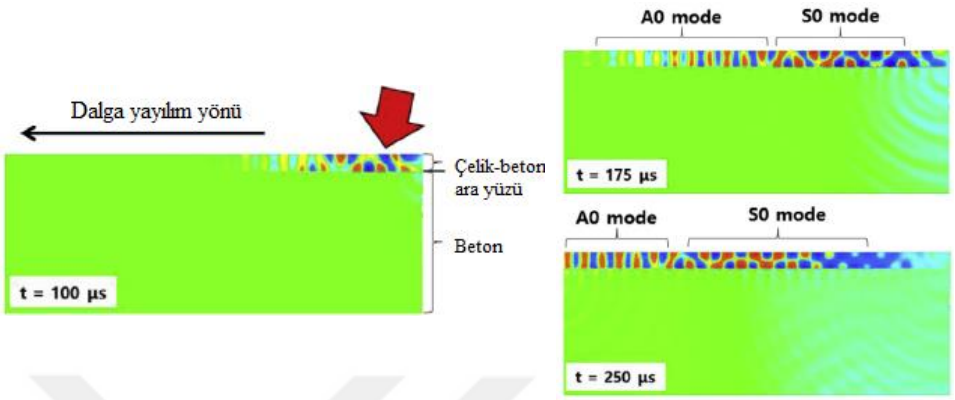
Şekil 3.23. Taze ve sertleşmiş betonun dalga dispersiyonuna etkisi: a) Taze, b) Sertleşmiş beton (w/c: S/Ç oranı) (Iliopoulos et al., 2016).



Şekil 3.24. Betonda yayılan AE dalgasının genliğinin dalga yayılım uzunluğu ve frekansa bağlı olarak değişimi (Feng and Yi, 2017).

Song and Popovics (2017) çelik kaplı beton yapıların ara yüz koşullarını karakterize etmek için dalgaların sönümlenme özelliklerine dayanan yüzeye temassız ultrasonik tahribatsız değerlendirme yaklaşımı sunmuşlardır. Analitik sonuçlar, temel simetrik (S0) dalga modunun sönümlenme davranışının ara yüz durumuna duyarlı olduğunu göstermektedir. Simülasyon ve deney sonuçları, çelik

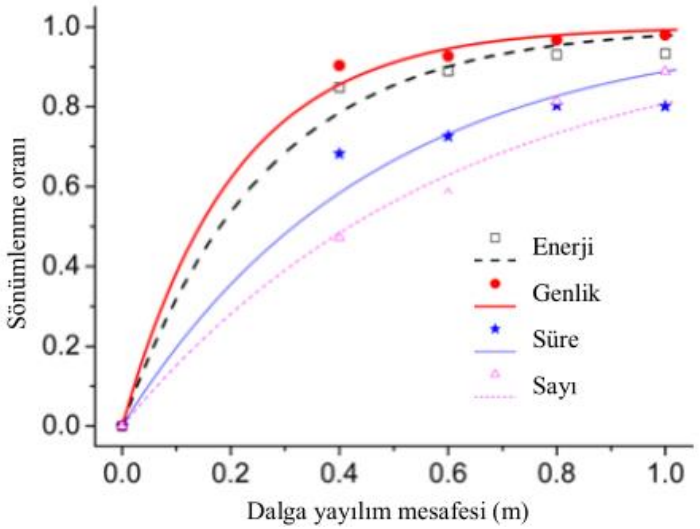
kaplı beton yapıların arayüz bağlanma koşullarının, önerilen yaklaşım kullanılarak nicel olarak değerlendirilebildiğini göstermektedir. Şekil 3.25'te dalganın sonlu elemanlar simülasyonunda görselleştirilen sönümlenme özelliği ile çelik-beton ara yüzü durumunun değerlendirilmesi gösterilmektedir.



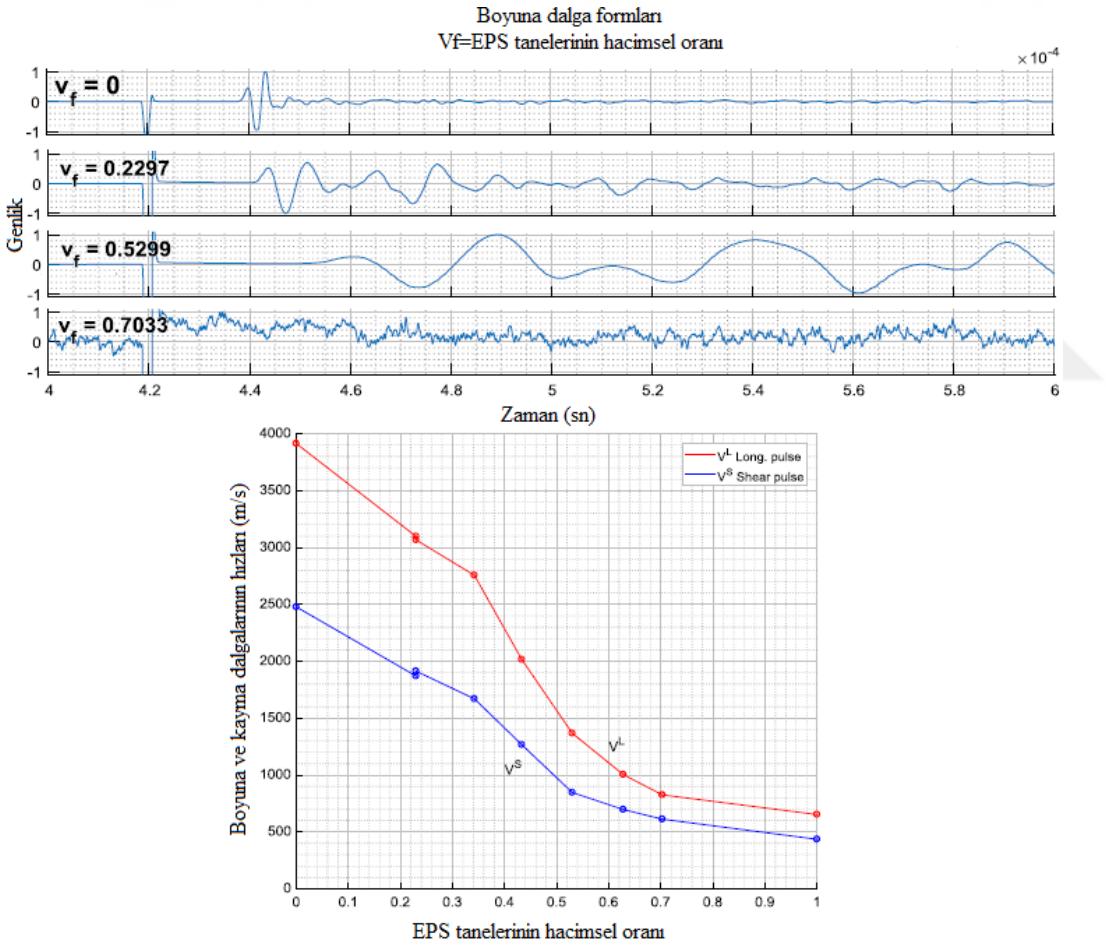
Şekil 3.25. Yönlendirilmiş dalganın sonlu elemanlar simülasyonunda görselleştirilen sönümlenme özelliği ile çelik-beton ara yüzü durumunun değerlendirilmesi (Song and Popovics, 2017).

Li et al. (2018) çalışmalarında beton içerisinde bulunan çelik halattaki dalga sönümlenmesini dalga yayılım mesafesi ve beton özellikleri ile ilişkilendirmişlerdir. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, AE dalgasının (enerji, genlik, süre ve sayı) dalga yayılım mesafesiyle eksponansiyel olarak sönümlendiğini göstermiştir. Ayrıca sönümlenme oranının pas payının artmasıyla eksponansiyel, S/Ç oranının artmasıyla ise doğrusal olarak arttığını göstermiştir (Şekil 3.26).

Nogueria and Rens (2018) hafif EPS betonda tanelerin dalga hızı ve sönümlenmesine etkilerini değerlendirmek için ultrason kullanmışlardır. EPS taneciklerinin dalga formlarını önemli ölçüde etkilediği ve hem boyuna hem de kayma dalgası hızlarında azalmaya yol açtığı, frekans spektrumlarını da daha düşük değerlere kaydırdığı görülmüştür. Şekil 3.27'de çalışmadan elde edilen dalga formu ve hızının tane miktarına bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 3.26. Dalga yayılım mesafesinin betonda sönümlenmeye etkisi (Li et al., 2018).

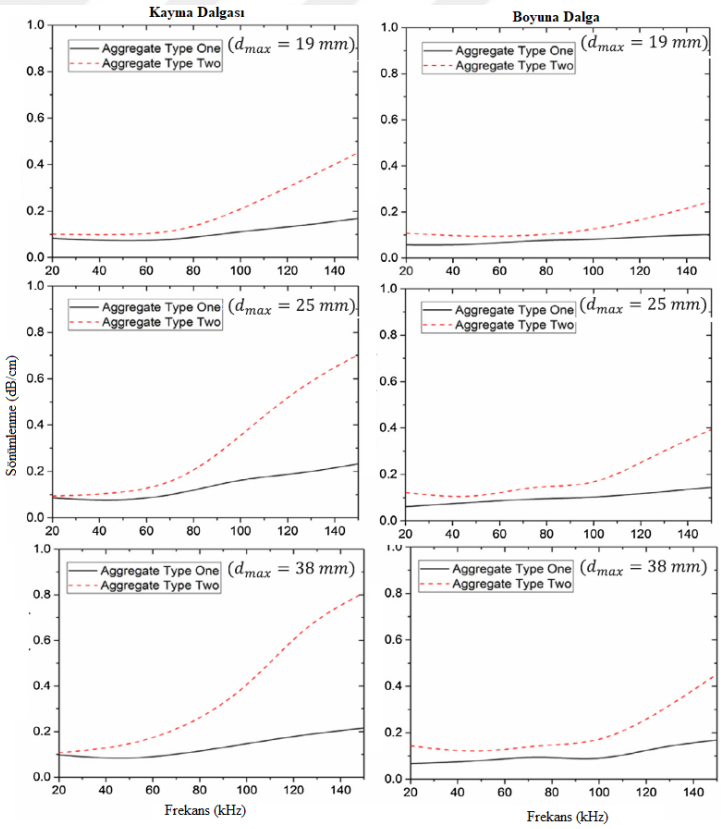


Şekil 3.27. EPS betonda tane miktarının boyuna ve kayma dalgalarının formlarına ve hızlarına etkisi (Nogueria and Rens, 2018).

Shardakov et al. (2018) betonun elastik ve dağıtıcı özelliklerini belirlemek için üç boyutlu deformasyon analizine dayanarak iteratif bir hesaplama algoritması

önermişlerdir. Böylece betonun elastik ve dağıtıcılık özelliklerinden doğal frekanslarının belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

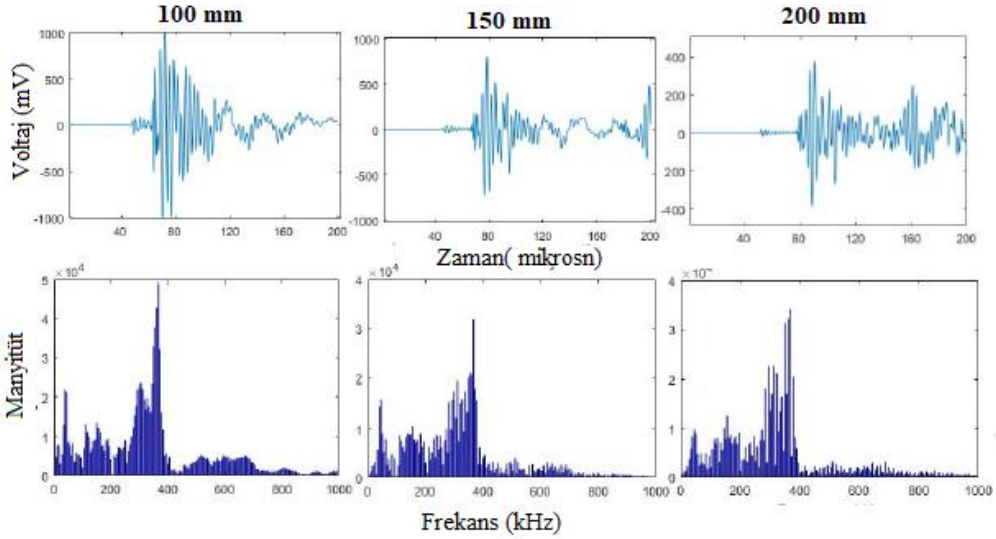
Assadollahi and Khazanovich (2019) betonda 20-150 kHz frekans aralığındaki kayma dalgalarının sönümlenmesini incelemek için 3 boyutlu sayısal bir araç geliştirmişlerdir. Sonuçlar bu frekans aralığındaki sönümlenmenin büyük ölçüde agregaların boyutuna ve malzeme özelliklerine bağlı olduğunu ve agregaların şeklinin ve hava boşluklarının da bu durumu biraz etkilediğini göstermiştir. Kübik agregaların yuvarlak agregalardan daha çok, yüksek akustik empedansa sahip agregaların daha fazla sönümlenmeye sebep olduğu ortaya konmuştur. Genel olarak, merkez frekansı 50 kHz ve daha düşük sinyallerin sönümlenmelerinin daha az, kayma dalgalarının ise boyuna dalgalara göre daha çok olduğu görülmüştür. Şekil 3.28'de yuvarlak şekilli agregalar için agrega boyutunun kayma ve boyuna dalgaların sönümlenmelerine etkileri görülmektedir.



Şekil 3.28. Aynı agrega şekli için (yuvarlak) agrega boyutunun kayma ve boyuna dalgaların sönümlenmelerine etkisi (Assadollahi and Khazanovich, 2019).

Khon et al. (2019) alüminyumda farklı yerlerde ve sertliklerde kalem ucu kırığı ile oluşturulan akustik dalgaların yayılma özelliklerini incelemişlerdir. Dalga hızları için dağılım eğrisini belirlemişler ve frekans spektrumunun ve sertliğin

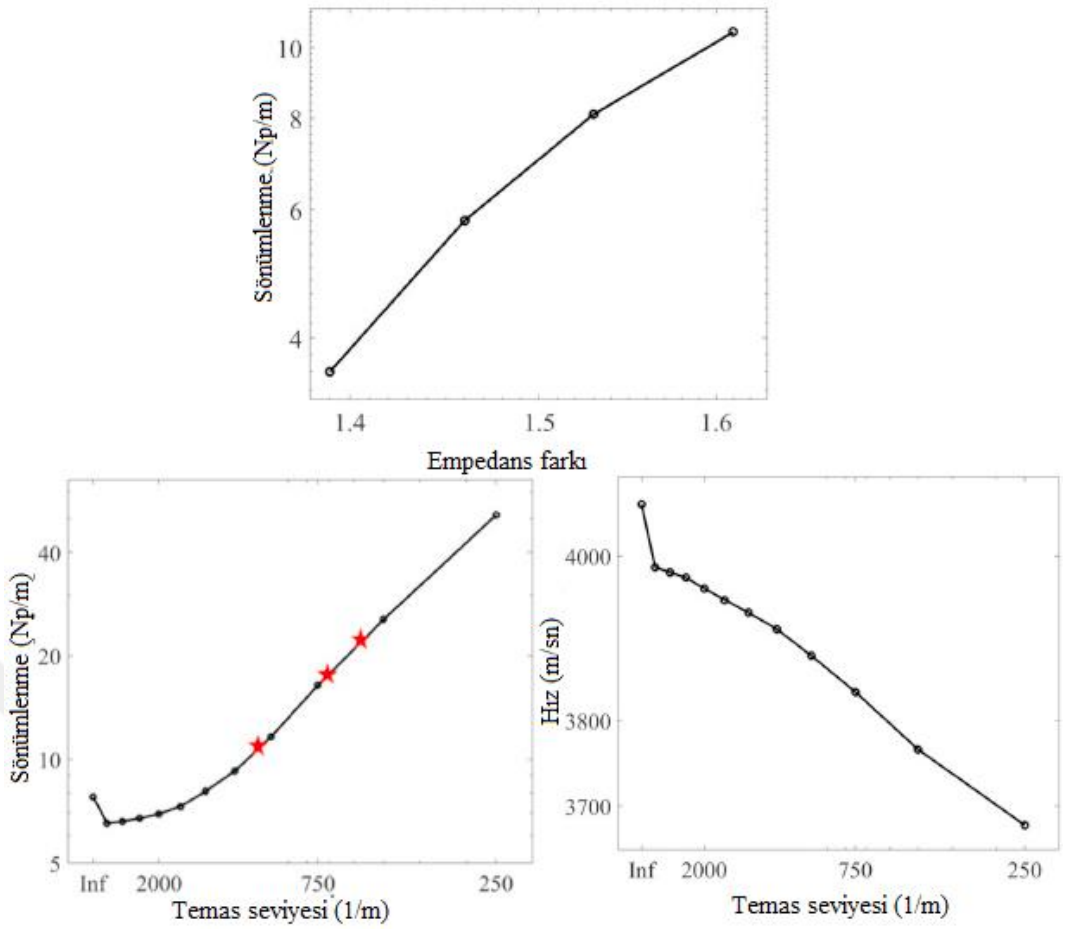
artmasıyla, sinyalin enerjisinin ve genliğinin arttığını görmüşlerdir. Şekil 3.29'da ise sensör-kaynak mesafesinin sinyal formuna ve genliğine etkisi olduğu halde, frekans spektrumunu pek etkilemediği görülmektedir.



Şekil 3.29. Alüminyumda sensör-kaynak mesafesinin sinyal formu ve spektrumlarına etkileri (Khon et al, 2019).

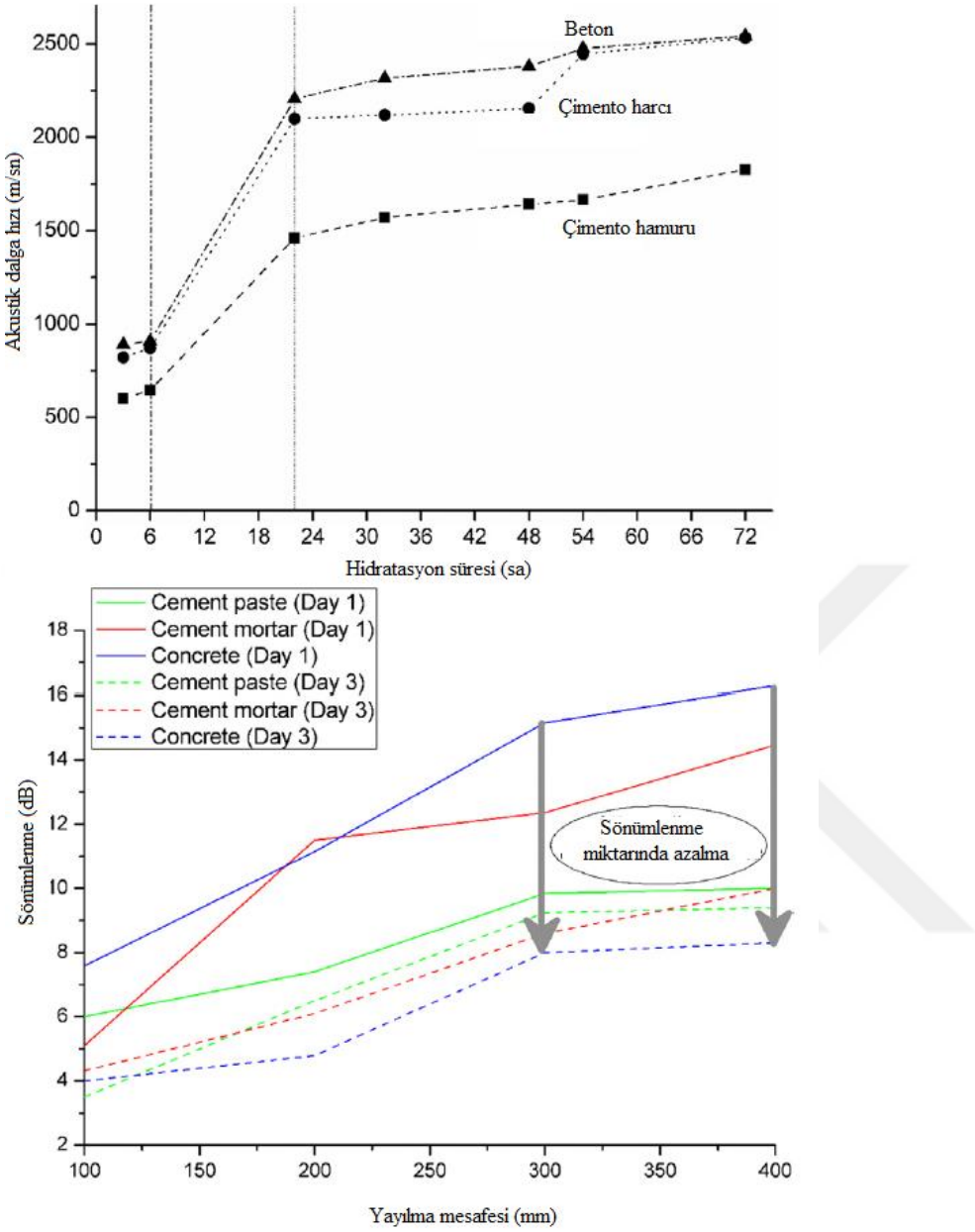
Ramaniraka et al. (2019) empedans farklı bulunan ara yüz geçiş bölgesi betonda yayılan ultrasonik dalganın sönümlenmesi ve hızı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Diğer çalışmalardan farklı olarak çalışmalarında bu yüzeydeki kusurlu teması da göz önünde bulundurmuşlardır. Sayısal simülasyonlar ve deneysel sonuçlar ile dalganın sönümlenme değerleri ve hızları arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Şekil 3.30'da Betonda ara yüz geçiş bölgesindeki empedans farkının sönümlenmeye ve "temas seviyesi" olarak adlandırdıkları parametrenin sönümlenmeye ve hıza bağlı değişimleri verilmiştir. Buna göre empedans farkı ve temas seviyesi arttıkça sönümlenme artmakta, temas seviyesi arttıkça hız azalmaktadır.

Thirumalaiselvi and Sasmal (2019) çimento hamuru, harç ve beton olmak üzere numunelerde hidratasyon aşamalarını AE ile incelerken, zamanla elastik dalganın sönümlenmesi ile ilgili sonuçları da sunmuşlardır. Şekil 3.31'de çimento hamuru, harcı ve beton numuneler için hidratasyon süresi ile dalga hızı ilişkileri ve dalga yayılım mesafesi ile sönümlenme ilişkileri verilmiştir. Görüldüğü gibi sinyalin bozulma miktarı en az çimento hamurunda en fazla ise betondadır.



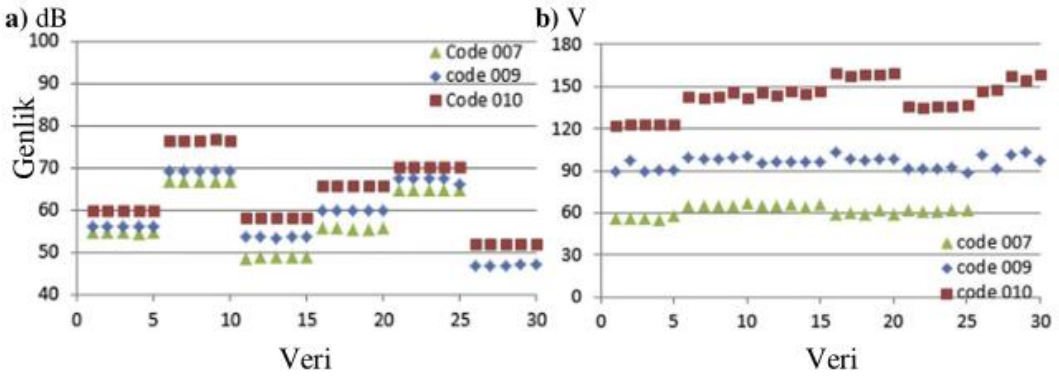
Şekil 3.30. Betonda ara yüz geçiş bölgesindeki empedans farkının sönümlenmeye ve temas seviyesi parametresinin sönümlenmeye ve hıza bağlı değişimleri (Ramaniraka et al., 2019).

Bahsedildiği üzere betonda yayılan elastik dalgaların bozulması, hasar tespiti üzerinde etkileri ve kullanımı üzerine literatürde birçok çalışma olsa da, bu çalışmalar var olan problemli sinyallerin düzeltilmesi için yeterli olamamışlardır. Al-Jumaili et. al. (2014) ise ilk kez bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalarında sönümlenme ve dispersiyon kaynaklı bu problemli sinyallere ait AE parametrelerini iyileştirmek için Parametre Düzeltme Tekniği (Parameter Correction Technique, PCT)'ni önermişlerdir. Araştırmacılar AE uygulanacak deneyden önce numunede yapay AE kaynakları oluşturarak elde edilen sinyal genliklerinin farklı lokasyonlardaki dağılımlarını incelemiş ve kaynak genliği ile yayılan dalgaların genlikleri arasında ilişki elde etmişlerdir. Bunun için farklı lokasyonlardaki her sensör için farklı genlikleri içeren kaynakların yayılım haritalarını çıkarmışlardır. Her lokasyonda yapay olarak oluşturdukları kaynak genliği ile AE genliği arasında kurulan ilişkiyi, asıl AE verilerine de uygulayarak genlik parametrelerini düzeltmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmalarında yalnızca Karbon Fiber Takviyeli



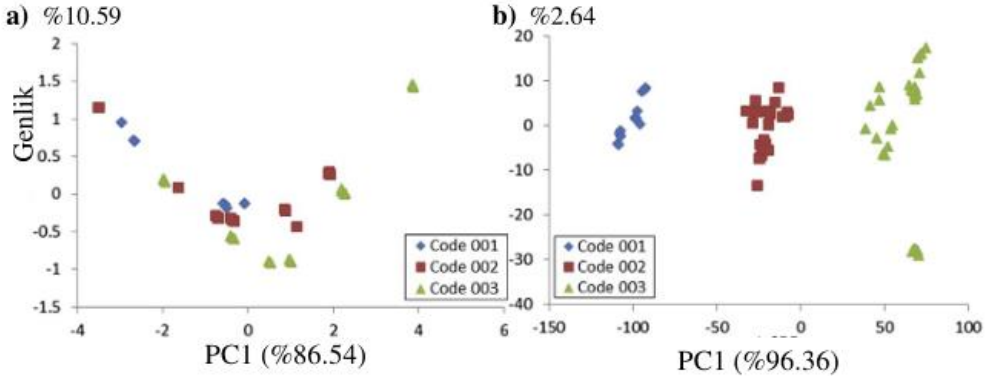
Şekil 3.31. Çimento hamuru, harcı ve beton için hidratasyon süresi ile dalga hızı ilişkileri ve dalga yayılım mesafesi ile sönümlenme ilişkileri (Thirumalaiselvi and Sasmal, 2019).

Polimer(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) levhada yayılan AE dalgalarının genliklerini düzeltmişlerdir. Tekniğin etkinliğini kanıtlamak için literatürde farklı bir yöntem bulunmadığından, ham verilerle elde edilen sonuçlar ile düzeltilmiş sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar PCT'nin ham verilerden elde edilen genlik dağılımını belli sıralara dizdiğini, dolayısıyla aktiviteler arasında keskin ayrımlar yapmanın kolaylaştığını göstermiştir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Al-Jumaili et al. (2014)'te elde edilen AE sinyallerinin genlik değerleri: a) Ham, b) PCT ile düzeltilmiş veriler.

Aynı araştırmacılar 2015'te gerçekleştirdikleri çalışmada (Al-Jumaili et. al., 2015) ise CFRP levhada düzeltilen genlik parametrelerini Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis, PCA) ile kümelendirmişlerdir. Ham verilere uyguladıkları farklı kümelendirme analizlerinde farklı küme sayıları ile karşılaşırken, PCT ile düzeltilmiş parametrelerde aynı küme sayıları elde etmişlerdir. Bu durum ham verilere uygulanan kümelendirme analizlerinde araştırmacının malzeme içerisinde kaç farklı hasar türü olduğunu bilerek küme sayısını ihtiyacına göre azaltmasını gerektirmekte iken, hasar türü sayısının bilinmediği durumlarda PCT'nin bu sorunu ortadan kaldırdığını göstermiştir. Küme sayısının net olarak belirlenmesinin yanı sıra, PCT ile kümeler arasındaki ayrımlar da daha net olarak ortaya konmuştur (Şekil 3.33).

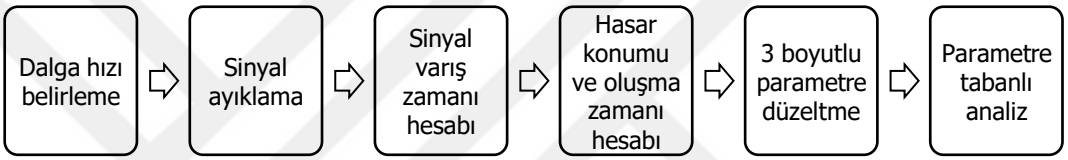


Şekil 3.33. Al-Jumaili et al. (2015)'te elde edilen AE sinyallerinin k-ortalamalarına göre kümelendirilmesi: a) Ham, b) PCT ile düzeltilmiş veriler.

4. AE VERİ ANALİZİ PROGRAMLARININ OLUŞTURULMASI

4.1. AE Veri Analizi Programları

AE veri analizlerinin gerçekleştirilmesi için öncelikle dalga hızı belirleme, sinyal ayıklama ve sinyal varış zamanı hesabı analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sinyal tabanlı analiz ile hasar konumu ve oluşma zamanlarının da belirlenmesinin ardından ise ham ve 3D-PCT ile düzeltilmiş sinyallere zamana bağlı parametrik dağılım ile baskın hasar türünün belirlenmesi (parametre tabanlı analiz) analizleri yapılmıştır. Verilere bu analizleri uygulamak için tekniklerin algoritmaları oluşturulmuş ve MATLAB programında kodları yazılmıştır. Çalışmada AE verilerine uygulanan analizler ve takip edilen işlem prosedürü Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. AE analizinde takip edilen işlem prosedürü.

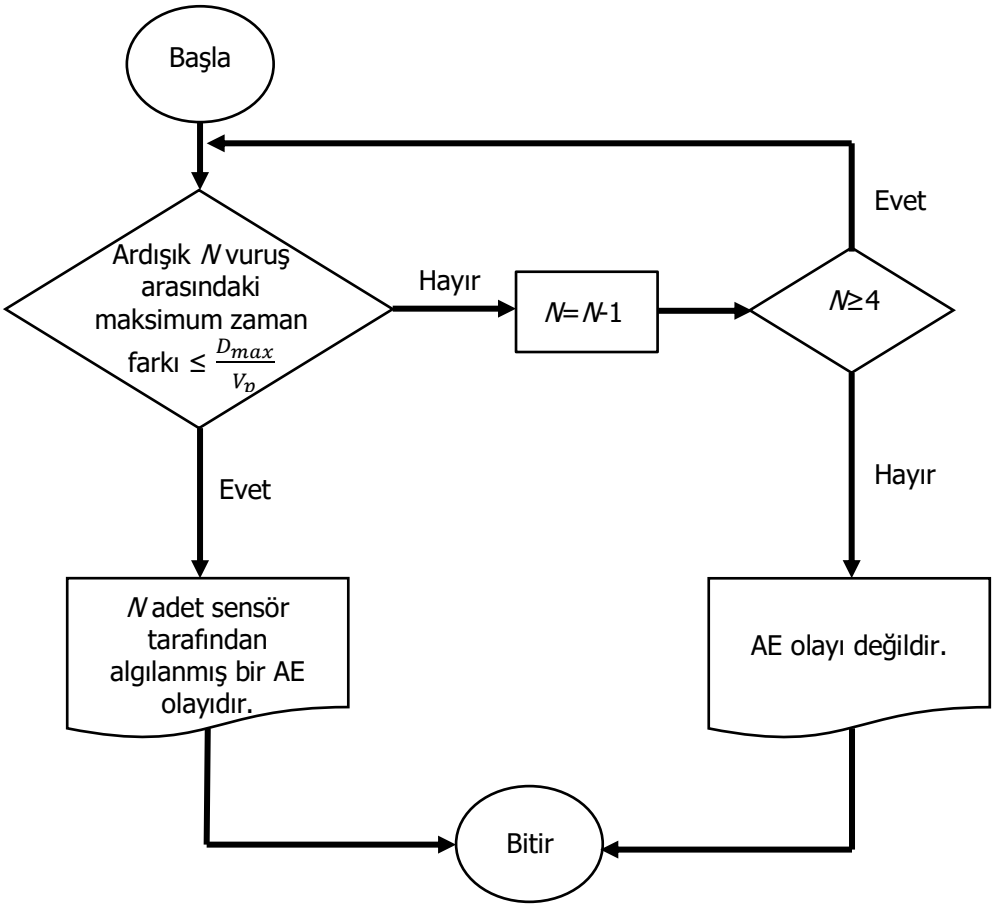
4.1.1. Dalga hızı belirleme

AE verilerine uygulanacak analizlerde kullanılan temel parametre elastik dalganın beton içerisinde yayılma hızıdır. Deneylerden önce numunelere yerleştirilen sensörlerin yakınlarında Hsu-Nielsen Kalibrasyon Metodu ile (Kalem Ucu Kırma Metodu) 0.5 mm kalınlı 2H sertlikli kalem uçları 45^{o} ile kırılmış ve sensörler tarafından kaydedilen AE verilerinin konumları kalem uçlarının kırıldığı koordinatlara yakınsayıncaya kadar hasar konumu analizleri tekrarlanmıştır. Böylece dalga hızı belirlenmiştir. Bu adımda da kullanılan kaynak konumlandırma algoritması 4.1.4 numaralı başlıkta verilmiştir.

4.1.2. Sinyal ayıklama

AE sistemi tarafından kaydedilen sinyallerden anlamlı olanlarının ayıklanması için yeterli sayıda sensör tarafından algılanan sinyallerin seçilmesi gerekmektedir. Üç boyutlu uzayda hasar lokasyonu ve oluşma zamanı analizinin gerçekleştirilebilmesi için en az dört sensör tarafından uygun zaman aralığında algılanan AE olaylarını oluşturan sinyaller Şekil 4.2'de algoritması verilen ve MATLAB programında yazılan kod ile ayıklanmıştır. Bunun için iki sinyal arası

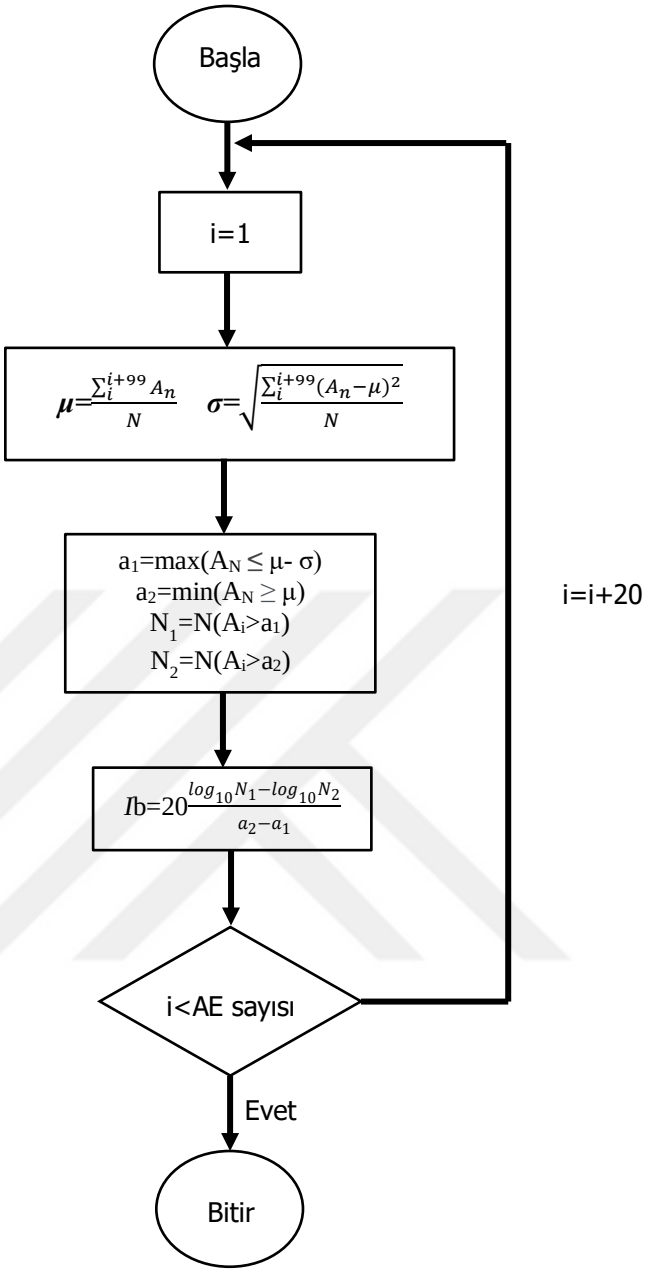
zaman farkının (Δt) yayılan elastik dalganın en uzak iki sensör arası mesafeyi (D_{max}) kat etmesi için gereken süre sınırları içerisinde kalması gerekmektedir. Burada N, AE olayını oluşturan vuruş sayısı, V_p ise P dalgasının bir önceki adımda hesaplanan beton içerisindeki yayılma hızıdır. Bu şartı sağlayan ve en az dört sensör tarafından algılanan sinyaller "AE olayı" olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.2. AE olaylarının ayıklanma algoritması.

4.1.3. *I*b değeri hesabı

Hasar ölçeklendirme için zamana bağlı Ib değeri hesabı için Şekil 4.3'te algoritması verilen bir program kodu yazılmış ve analizlerde kullanılmıştır.



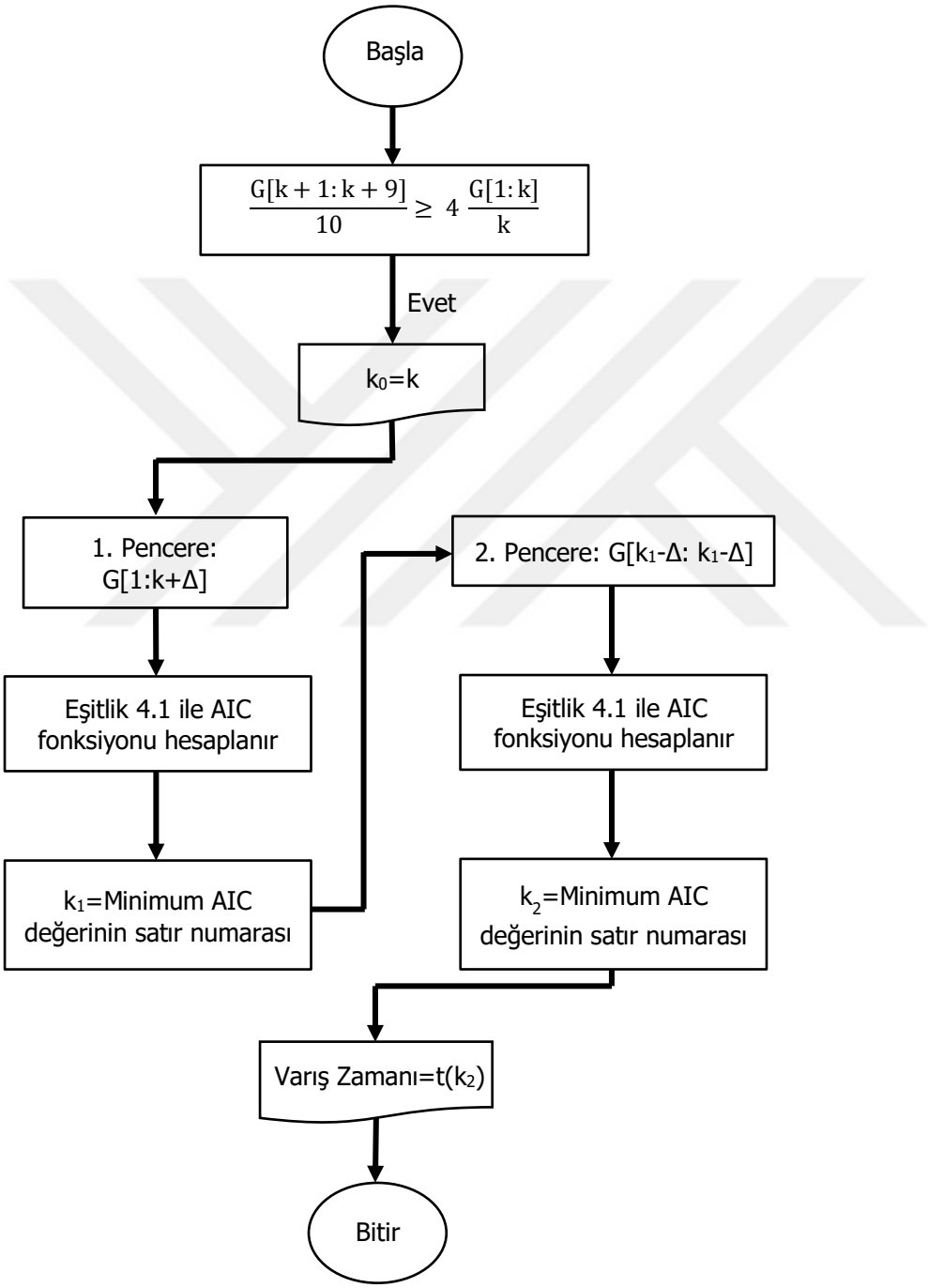
Şekil 4.3. *I*b değeri hesabı algoritması.

4.1.4. Sinyal varış zamanı hesabı

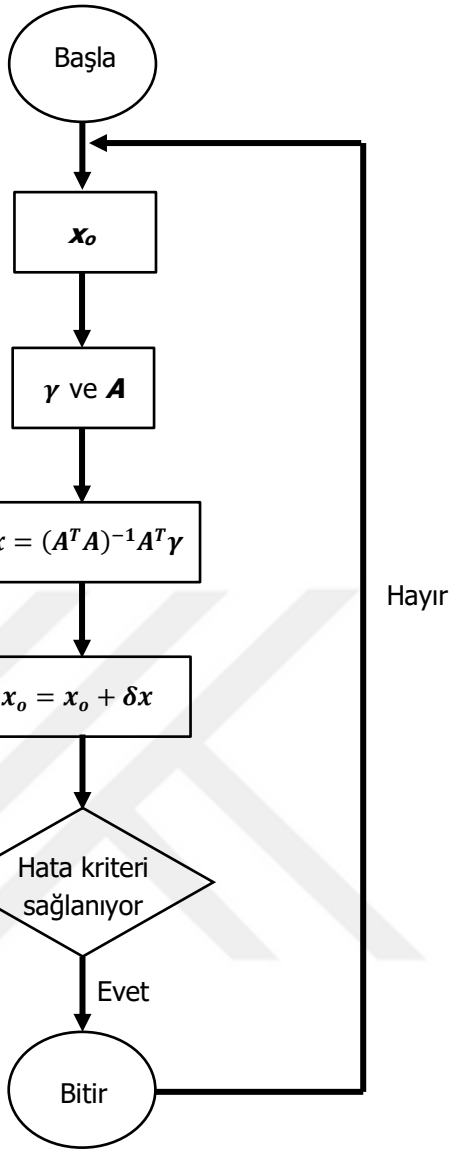
AE sistemi tarafından kaydedilen dalga formlarında ortam gürültüsü de bulunmaktadır. Elastik dalga beton içerisinde çok hızlı yayıldığından, zaman değerleri arasındaki mikro saniyeler mertebesindeki çok küçük farklar bile konum hesaplarında hatalara yol açmaktadır. Bu sebeple sinyallerin sensörlere gerçek varış zamanları AIC Seçici ile Şekil 4.4'te verilen algoritma ile yakalanmıştır.

4.1.5. Hasar konumu ve oluşma zamanı hesabı

En az dört sensörden kaydedilen AE sinyalleri bir AE olayı olarak tanımlandığı için, dört bilinmeyene karşılık daha fazla sayıda denklem oluşturulabileceğinden, bu üst belirlenimli problemin çözümünde iteratif Geiger Yöntemi'ne dayalı Şekil 4.5'teki algoritma kullanılmıştır.



Şekil 4.4. AE sinyallerinin varış zamanlarının AIC fonksiyonu ile yakalanma algoritması.

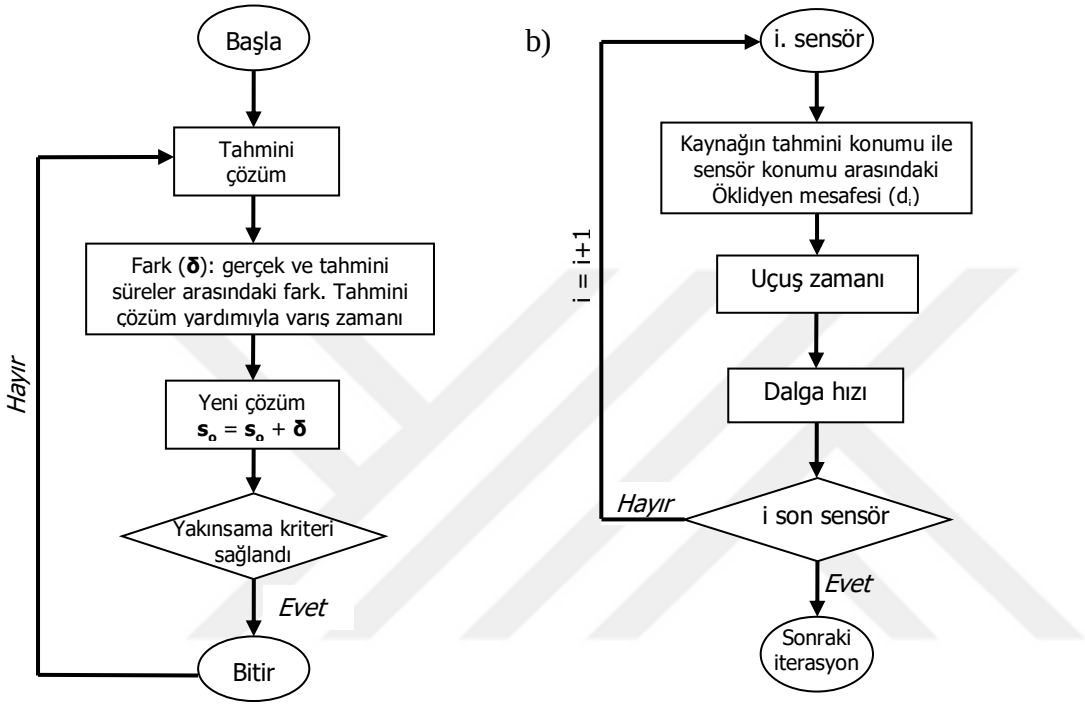


Şekil 4.5. Hasarların Geiger Yöntemi ile konumlandırılma algoritması

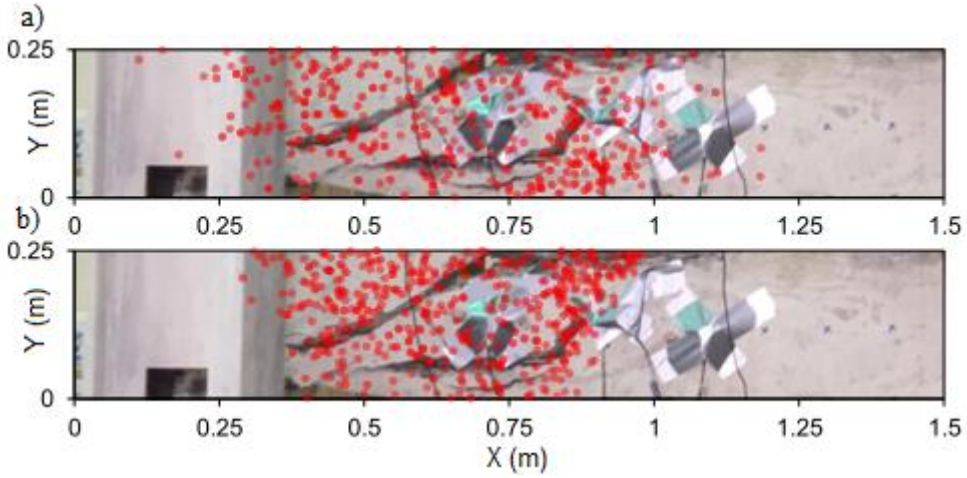
4.2. Hasar konumlandırma algoritmasının iyileştirilmesi

AE olaylarına ait sinyallerin ve parametrelerinin düzeltilmesi işlemini etkileyen en önemli faktör AE kaynağın konumuna bağlı olarak belirlenen düzeltme ilişkisidir. Bu bağlamda kaynağın yerinin doğru belirlenmesi, düzeltmede kullanılacak ilişkiyi de doğrudan etkilemektedir. Literatürde AE kaynaklarının konumlandırılması için önerilen yöntemlerde sabit dalga hızı ile analizler gerçekleştirilmektedir. Ancak bu durum gerçekçi olmamanın yanı sıra, betonun homojen varsayılması anlamına gelmektedir. Sinyal ve parametre düzeltmesine ihtiyaç duyulmasının da sebebi olduğundan kaynak konumlandırma algoritmasına heterojen durumun dalga hızına etkisini eklemek gerekmiştir. Bu noktada, Şekil 4.6'da algoritması verilen teknikle AE olayının vuruşunun algılandığı sensöre olan

mesafesi ile uçuş süresi arasındaki ilişkiden yola çıkarak her kaynak ile sensör arasındaki yörüngede dalga hızları hesaplanmıştır. Bu sayede konumlandırma algoritması tek bir dalga hızı ile değil, ilgili yörüngelerdeki dalga hızlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7'de kaynak konumlandırma algoritmasına yapılan bu değişiklik sonrası elde edilen lokasyon sonucuna bir örnek verilmiştir.



Şekil 4.6. a) Geiger Metodu'nun genel algoritması, b) geliştirilen yöntemle her sensör-hasar arası yörünge için elastik dalga hızı hesabı algoritması.



Şekil 4.7. Kaynak konumlandırma algoritmasının iyileştirilmesi: a) sabit dalga hızının, b) farklı dalga hızlarının kullanılması.

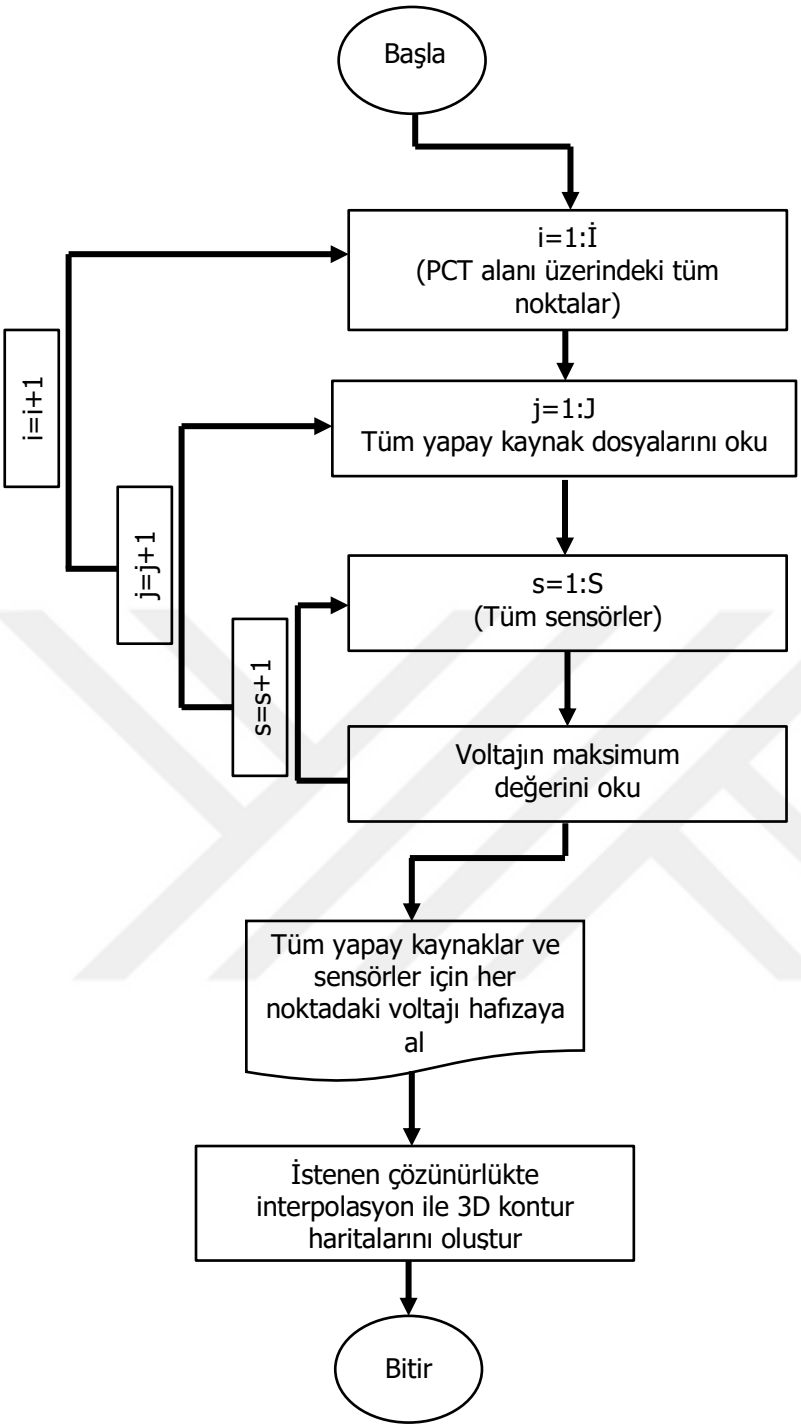
4.3. 3D-PCT Programı

3D-PCT programı üç ana bölümden oluşturulmuştur:

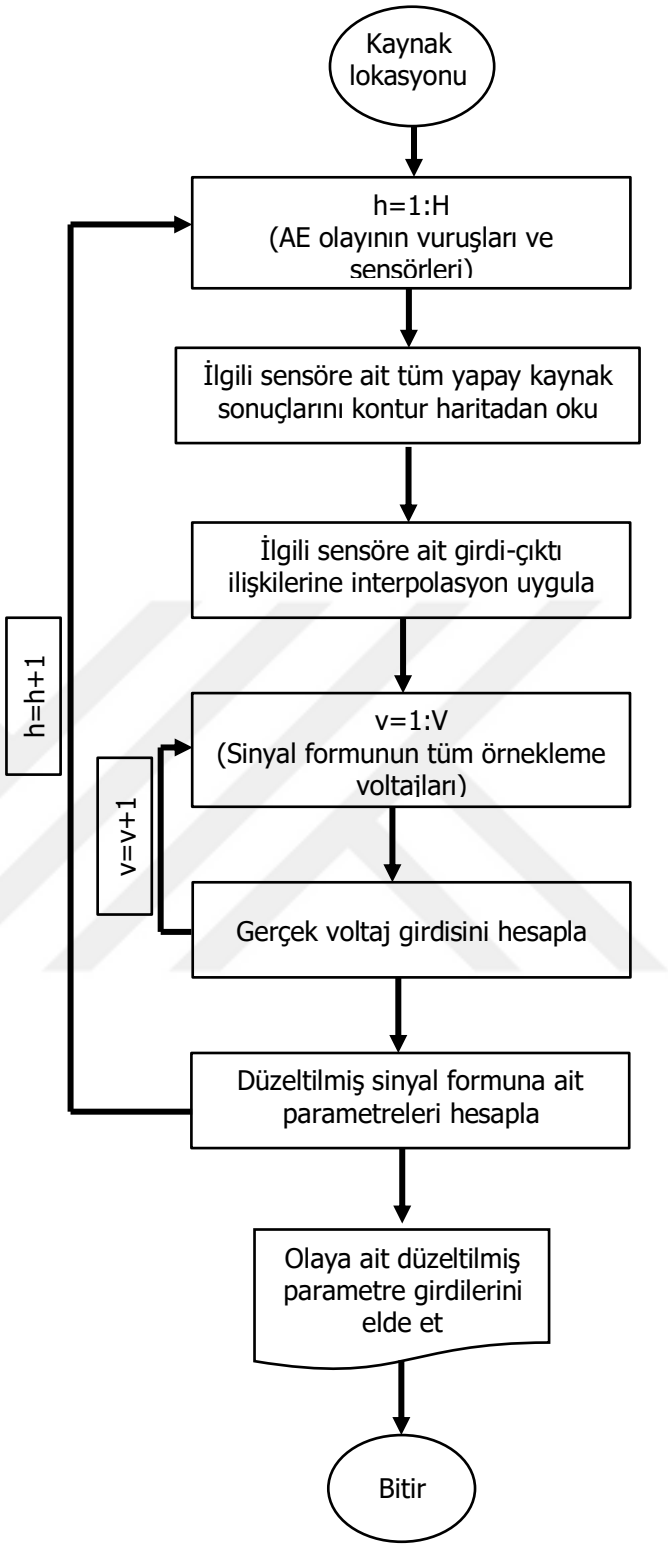
i. Birinci bölümde düzeltmenin yapılacağı hacim üzerindeki her noktaya ait veriler öncelikle Şekil 4.8'de sunulan akış şemasının takibiyle her bir yapay kaynak ve sensör için ayıklanmıştır. Burada öncelikle PCT hacmi üzerindeki tüm noktalar için her bir yapay kaynak değerinin her bir sensöre ne kadar sönümlenmeyle ulaştığı ve sensörün bu girdiyi nasıl kaydettiği belirlenmektedir. Tüm bu bilgilerin hafızaya alınmasının ardından, PCT hacmi istenen çözünürlükte elemanlara bölünerek her bir yapay kaynak ve sensör değeri için 3 boyutlu hacimsel kontur haritaları oluşturulmaktadır.

ii. Kodun ikinci bölümünde ise her bir aktivitenin oluştuğu konuma ve kayıt alan sensöre özgü girdi ve çıktı parametre ilişkileri belirlenmiştir. Parametre düzeltme işlemi sadece düzeltme ilişkilerinin elde edildiği bölgede oluşan AE aktivitelerine uygulanabilmektedir.

iii. Kodun üçüncü bölümünde ise konumu belirlenen AE sinyallerinin ve parametrelerinin düzeltilmesi yapılmaktadır. Kodun ikinci ve üçüncü bölümlerini içeren akış şeması Şekil 4.9'da verilmiştir.

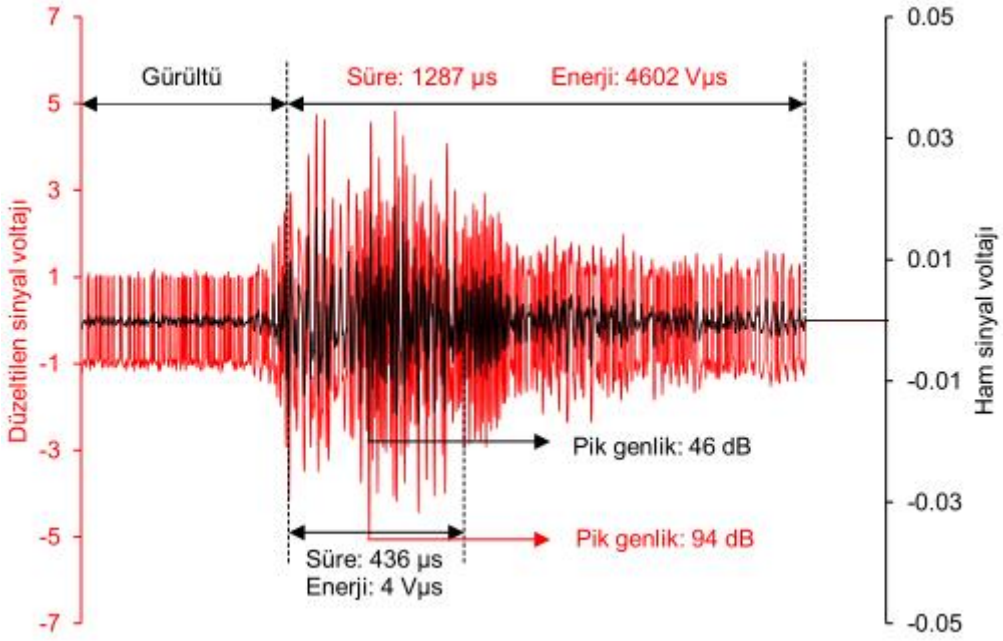


Şekil 4.8. 3D-PCT deneyi verilerinin noktalara ve sensörlere göre ayıklanması.



Şekil 4.9. Gerçek AE aktivitelerine parametre düzeltme ilişkilerinin uygulanması.

Yazılan bu program ile düzeltilen örnek bir sinyal formu ve parametreleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. 3D-PCT ile tez çalışmasında düzeltilen örnek bir AE sinyali.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışma iki ana deneysel aşamadan oluşmaktadır. Her iki deneysel aşamada da üç nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiş, iki deney setinde farklı boyut ve özelliklerde elemanlar kullanılmıştır. Birinci deney setinde standart eğilme dayanımı belirleme deneylerine uyumlu boyutlarda ve farklı tür ve miktarlarda fiber içeren ve farklı heterojenliklere sahip beton kiriş elemanlar, ikinci deney setinde ise büyük ölçekli ve farklı kırılma mekanizmalarına sahip betonarme kiriş elemanlar test edilmiştir. Deney setlerinde deney elemanları üretilmiş, üç boyutlu parametre düzeltme deneyleri gerçekleştirilmiş, elemanlar eğilme testlerine tabii tutulmuş, eş zamanlı olarak AE ile izlenmiş ve parametre düzeltme ilişkileri elde edilerek parametre düzeltmesi yapılmıştır.

5.1. Standart Beton Eğilme Deneyleri

Beton içeriğinin ve farklı AE kaynaklarının elastik dalganın sönümlenmesi ve parametre düzeltmesine etkisinin belirlenmesi için farklı kompozisyonlara sahip 100x100x600 mm boyutlarında kiriş numuneler üretilmiştir. Deney elemanlarına ilişkin değişkenler Çizelge 5.1'de sunulmuştur. İlgili her beton karışımından TS EN 12390-5'e uygun 2'şer adet 100x100x600 mm boyutlarında kiriş, TS EN 12390-3'e uygun 2'şer adet 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler yapılmıştır.

Çizelge 5.1. Standart beton eğilme deneylerinde üretilen deney elemanları.

Deney elemanı	Açıklama
REF	Konvansiyonel beton
ÇF05	Hacimsel %0.5 oranda çelik fiber içeren beton
ÇF10	Hacimsel %1.0 oranda çelik fiber içeren beton
PF05	Hacimsel %0.5 oranda sentetik mikro fiber içeren beton
PF10	Hacimsel %1.0 oranda sentetik mikro fiber içeren beton
PT05	Hacimsel %0.5 oranda sentetik makro fiber içeren beton
PT10	Hacimsel %0.5 oranda sentetik makro fiber içeren beton
ÇH	Çimento harcı

5.1.1. Malzemeler

Standart beton eğilme elemanlarının üretiminde beton ve fiberler kullanılmıştır. Referans alınan konvansiyonel beton karışım tasarımı Çizelge 5.2'de verilmiştir. Çimento olarak Çimentaş CEM I 42.5R kullanılmış olup, karışımın

su/çimento oranı 0.6'dır. Beton karışımında 0-3 mm, 5-15 mm ve 15-25 mm dane çaplarında üç grup kırma kireçtaşı agrega kullanılmıştır.

Çizelge 5.2. Standart beton eğilme deneylerinde kullanılan beton karışım tasarımları (kg/m^3).

Deney Elemanı	Çimento	Fiber	Agrega (mm)			Su	Akışkanlaştırıcı
			0-3	5-15	15-25		
REF	295	-	960	394	591	177	3.00
ÇF05	295	39.0	960	394	591	177	3.00
ÇF10	295	78.0	960	394	591	177	3.00
PF05	295	4.50	960	394	591	177	3.00
PF10	295	9.00	960	394	591	177	3.00
PT05	295	4.50	960	394	591	177	3.00
PT10	295	9.00	960	394	591	177	3.00
ÇH	295	-	1945	-	-	177	1.48

ÇF05 ve ÇF10'un üretiminde kullanılan çelik fiberler ATLAS1 firmasına ait BetonFiber HE 0735 tipi kancalı ve 35 mm uzunluğunda olup, soğuk çekmeli çelik telden ASTM A820 standardına göre üretilmiştir. BetonFiber HE0735 çelik fiberlere ait özellikler Çizelge 5.3'te verilmiştir. PF05 ve PF10'un üretiminde kullanılan sentetik mikro fiberler KORDSA firmasına ait KraTos Mikro Sentetik Fiber Donatıları olup, Poliamid 2.6 ham maddesinden TS EN 14889-2 Sınıf I standardında üretilmiştir. KraTos Mikro poliamid fiberlere ait özellikler Çizelge 5.4'te verilmiştir. PT05 ve PT10'un üretiminde kullanılan sentetik makro fiberler ise KORDSA firmasına ait KraTos Makro Sentetik Fiber Donatıları olup, yüksek performanslı Polipropilen ham maddesinden TS EN 14889-2 Sınıf II ve ASTM C 1116 standartlarına göre üretilmiştir. KraTos Makro polipropilen fiberlere ait özellikler Çizelge 5.5'te verilmiştir. Fiberlerin görünümleri Şekil 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.3. BetonFiber HE 0735 çelik fiberlerin özellikleri.

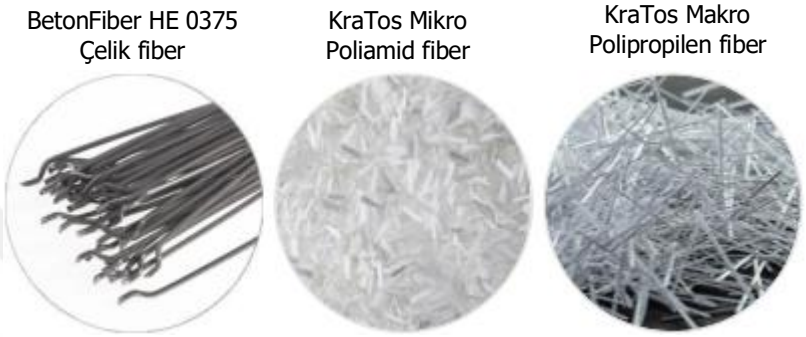
Görünüm	Parlak, çelik tel	**Uzunluk**	35 mm
Tip	Soğuk çekme	**Çap**	0.7 mm
Kenar	Kıvrımlı	**Çekme mukavemeti**	1400 MPa
Açı	45°	**Narinlik oranı**	50

Çizelge 5.4. KraTos Mikro poliamid fiberlerin özellikleri.

Ham madde	Poliamid 2.6	**Çekme mukavemeti**	900 MPa
Özgül ağırlık	1.14 gr/cm^3	**Uzunluk**	12 mm

Çizelge 5.5. KraTos Makro polipropilen fiberlerin özellikleri.

Ham madde	Polipropilen	**Çekme mukavemeti**	550 MPa
Özgül ağırlık	0.91 gr/cm^3	**Uzunluk ve çap**	54 mm ve 0.70 mm



Şekil 5.1. Standart beton eğilme elemanlarının üretiminde kullanılan fiberler.

5.1.2. Deney elemanlarının üretimi

Deney elemanlarının üretimi Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2). Öncelikle agrega, çimento ve fiberlerden oluşan kuru karışım yaklaşık 2 dk boyunca beton mikserinde karıştırılmış, daha sonra su ilave ederek karıştırma işlemine devam edilmiştir Ardından karışıma akışkanlaştırıcı ilave edilmiş ve bir süre daha karıştırılarak beton hazır hale gelmiştir. Önceden yağlanan çelik prizmatik kalıplara dökülen betonlar şişleme tekniği ile sıkıştırılmıştır. Beton döküm yüzeyi perdahlanan deney elemanları 24 sa. süreyle bekletilmiş, ertesi gün kalıptan çıkarılmıştır. Deney elemanlarının beton dökümü sırasında standart küp numuneleri de alınmıştır. Alınan tüm numunelere aynı şartlarda 28 günlük standart kür (20±2°C and %95 bağıl nem) uygulanmıştır.

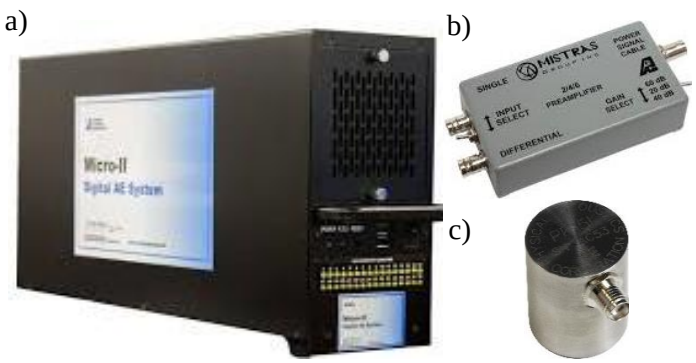
5.1.3. AE düzeneği

Deney kapsamında kullanılan AE sistemi Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Sistemde 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. 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. 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 oluşacağının tahmin edildiği bölgeler seçilmiştir. Ayrıca 150 kHz rezonans frekansa sahip R15α piezoelektrik sensörlerin deney elemanı üzerine yerleştirilmesinde kolaylık sağlaması açısından ve belli bir standardın oluşturulması amacıyla, kirişin sol köşesinde x, y, z koordinat takımı seçilmiş ve her bir sensöre numara verilerek belirlenen koordinatlara yerleştirilmişlerdir. Bu koordinat takımı hasar konumu belirleme analizleri için de kullanılmıştır.

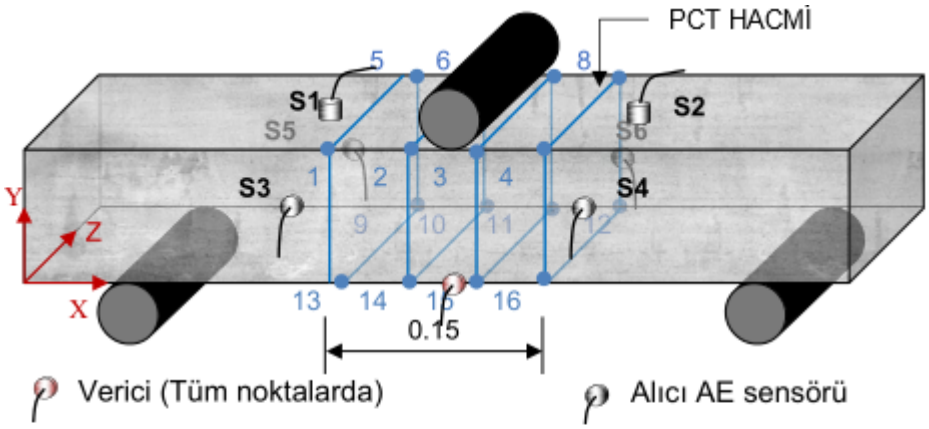


Şekil 5.2. Standart beton eğilme elemanlarının üretimi.



Şekil 5.3. Micro II SAMOS AE sistemi: a) Kayıt kasası, b) ön yükselteç, c) sensör.

Üç-nokta-eğilme deneyleri sırasında kirişlerin yüksek gerilmelere maruz kalacağı eğilme bölgeleri için Şekil 5.4'te gösterilen 150x100x100 mm'lik PCT hacimleri tanımlanmıştır. Bu sayede PCT'nin betonda üç boyutlu ilk uygulaması gerçekleştirilmiştir. AE aktivitelerinin yoğunlaşacağı öngörülen bu bölgeler 50x100x100 mm boyutlarında prizma elemanlara bölünerek PCT ağları oluşturulmuştur. Oluşturulan PCT ağı üzerindeki 16 noktada National Instruments tarafından üretilen PCI 5412 sinyal üreteci (Şekil 5.5) ile 1V, 5V, 10V, 24V genliklere sahip dört farklı yapay sinüs formlu sinyaller oluşturulmuş ve her bir alıcı AE sensörü tarafından okundukları değerler kaydedilmiştir. Üç-nokta-eğilme deneylerinde de AE sensörlerinin koordinatları değiştirilmemiş, yükleme süresince göçme gerçekleşinceye kadar parametre düzeltme deneyleriyle aynı şartlarda AE verileri kaydedilmiştir. PCI 5412 sinyal üreteci, sinüs, üçgen vb. gibi farklı sinyal formlarını -6V ile +6V arasında saniyede 100MS veri ile sinyal üretebilmektedir. Sinyal jeneratörü kartı bir bilgisayar kasasına takılmış, yazılımı ile istenen dalga formu seçilmiş ve her kaynakta genlik değerleri bu yazılım ile yükseltilmiştir. Sinyal üretecine bir kablo ile bağlanan piezoelektrik AE sensörü verici olarak çalışmış ve her noktada bu sensör ilerletilerek yapay kaynakların malzeme içerisinde yayılmaları sağlanmıştır.



	X	Y	Z
S1	0.175	0.10	0.05
S2	0.425	0.10	0.05
S3	0.175	0.05	0.00
S4	0.425	0.05	0.00
S5	0.175	0.05	0.10
S6	0.425	0.05	0.10

	X	Y	Z		X	Y	Z
1	0.225	0.10	0.00	9	0.225	0.00	0.10
2	0.275	0.10	0.00	10	0.275	0.00	0.10
3	0.325	0.10	0.00	11	0.325	0.00	0.10
4	0.375	0.10	0.00	12	0.375	0.00	0.10
5	0.225	0.10	0.10	13	0.225	0.00	0.00
6	0.275	0.10	0.10	14	0.275	0.00	0.00
7	0.325	0.10	0.10	15	0.325	0.00	0.00
8	0.375	0.10	0.10	16	0.375	0.00	0.00

Şekil 5.4. Standart beton eğilme deneylerinde AE sensörlerinin deney elemanları üzerindeki yerleşimi ve 3D-PCT düzeneği (Birim: m).

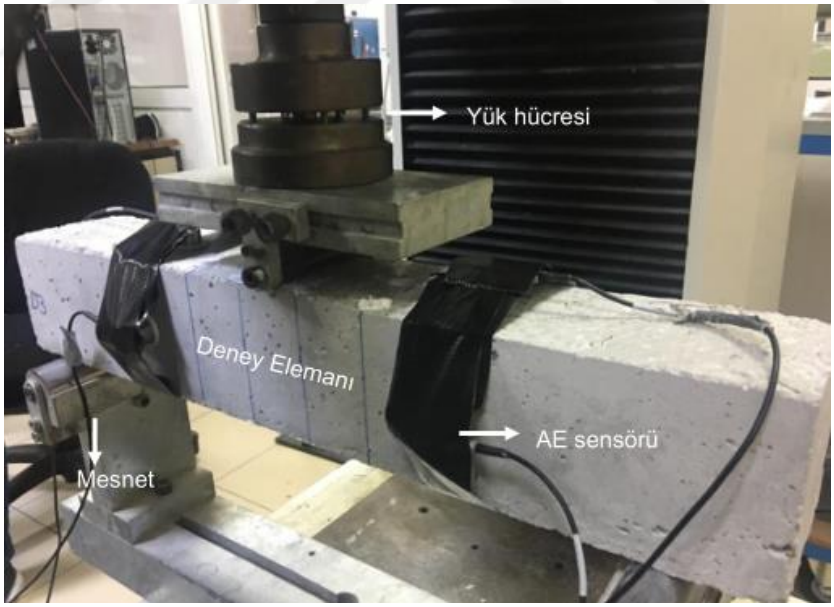
Deney elemanlarının yüzeylerine rezonans frekansı 150 kHz olan 6 adet piezoelektrik AE sensörü yerleştirilmiştir. Sensörler beton yüzeyine yapıştırılmadan önce yüzey zımpara ile düzeltilmiş ve nemli bez ile temizlenmiştir. Daha sonra sensör seramik yüzeyine iletken sıvı malzeme sürülüp beton yüzeyine bantla sabitlenmiştir. Ardından sensörler ön yükselticilere, ön yükselticiler de bağlantı kabloları vasıtasıyla 8 kanallı AE sisteminin entegre şekilde bulunduğu AE kasasına (her sensör kendi kanalına giriş yapacak şekilde), AE kasası da bilgisayara bağlanarak sistem donanımları kurulmuştur. Ön yükselticiler 40 dB ve Single giriş modunda kullanılmıştır. Bağlantıların tamamlanmasının ardından yazılımın bilgisayara kurulumu ve aktivasyonu yapılmıştır. Daha sonra her bir sensörün çalışıp çalışmadığını kontrol etmek, sistemde herhangi bir sorunun olup olmadığını tespit etmek amacıyla, sensörlerin yakın noktalarında Hsu-Nielsen Kalibrasyon Metodu'na uygun şekilde 2H sertlikli 0.5 mm kalınlıklı kurşun kalem uçları kırılmıştır. Bu kırılmalar esnasında sensörlerin algıladığı sinyaller işlenerek bilgisayar ekranına yansımıştır. Gerekli hazırlıklar yapıldıktan sonra AE sistemi hazır hale gelmiştir.



Şekil 5.5. 3D-PCT deneylerinde yapay kaynak üretiminde kullanılan sinyal jeneratörü bağlantısı.

5.1.4. Yükleme düzeneği

Üç-nokta-eğilme deneyleri Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Biyomekanik Laboratuvarı'nda 100 kN yük kapasiteli Shimadzu AG-IS Universal test cihazı ile TS EN 12390-5 standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Cihaza bağlanan bir bilgisayar aracılığıyla Trapezium yazılım desteği ile deney boyunca yük, zaman ve deplasman değerleri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Mesnetlerden bırakılan 50 mm'lik boşluklar ile kirişler açıklığın orta noktasından deplasman kontrollü olarak 0.2 mm/dk hızında monotonik yüklenmiştir.

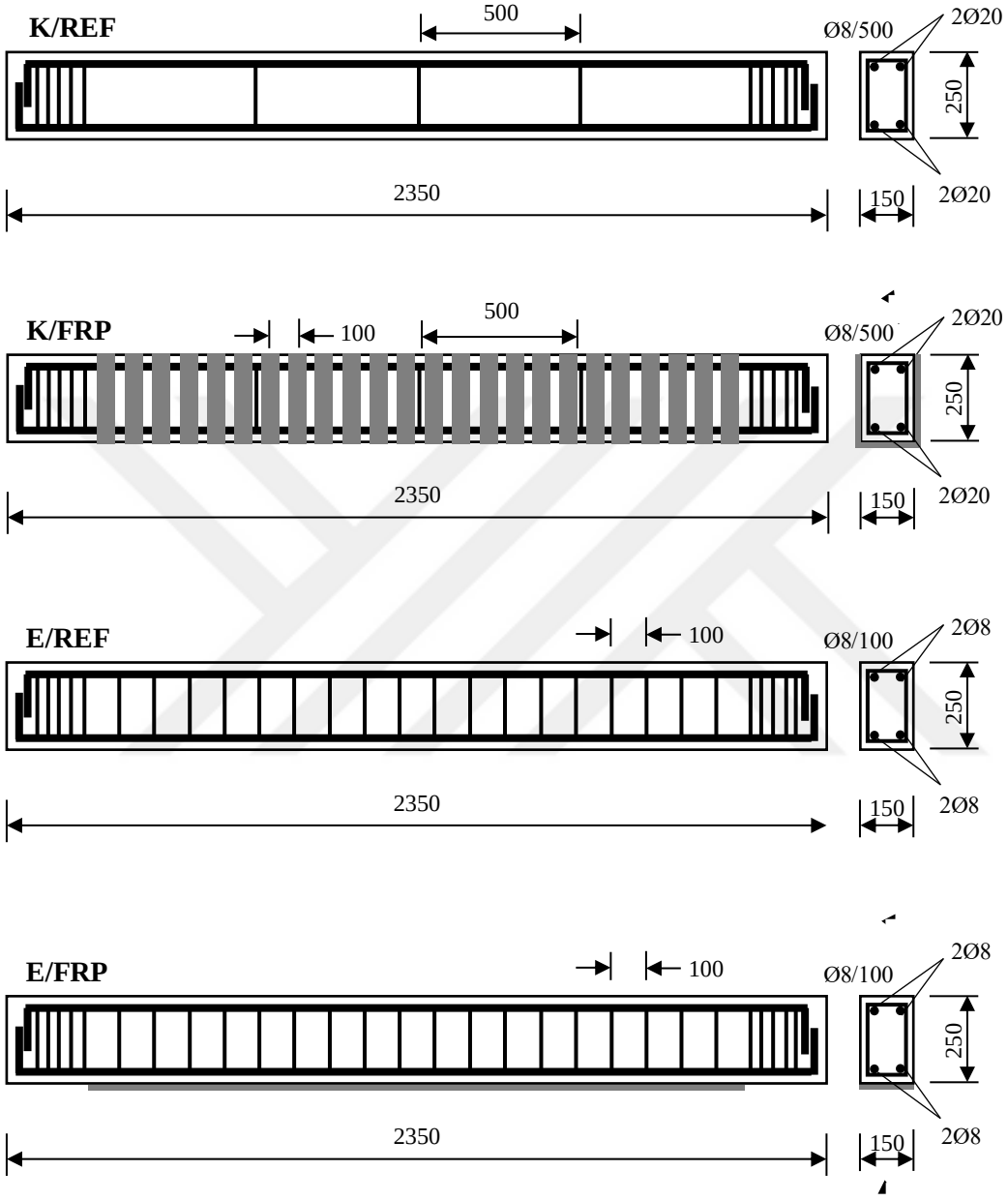


Şekil 5.6. Standart beton eğilme deney düzeneği: üç-nokta-eğilme.

5.2. Betonarme Kiriş Eğilme Deneyleri

Dört adet betonarme kirişten ikisi kesme, ikisi eğilme açısından değerlendirilecek şekilde tasarlanmıştır. Eğilme elemanlarından biri referans olarak kullanılırken, diğeri eğilme bölgesinden CFRP malzemeyle güçlendirilmiştir.

Kesme elemanlarının ise biri referans olarak kullanılırken, diğeri U şekilli CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deney elemanlarına ait geometrik özellikler ve CFRP ile güçlendirilme şemaları Şekil 5.7'de sunulmuştur.



Şekil 5.7. Betonarme kirişlerin donatı detayları ve CFRP ile güçlendirilme şemaları (mm).

5.2.1. Malzemeler

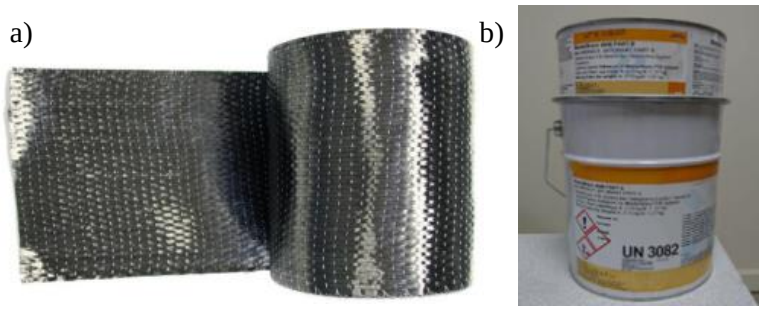
Betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan beton karışım tasarımı (C25) Çizelge 5.6'da verilmiştir. Boyuna donatılar ve etriyeler için kullanılan çelik ise S420 sınıfına aittir. Kirişlerin güçlendirilmesinde karbon lifli polimer (CFRP) malzeme olarak MasterBrace FIB 300/50 CFS kullanılmıştır. MasterBrace FIB 300/50 CFS (Şekil 5.8.a) malzemesinin ve epoksi yapıştırıcının üretici firma

tarafından belirtilen teknik özellikleri Çizelge 5.7'de verilmiştir. CFRP malzemenin deney elemanlarına yapıştırılmasında ise MasterBrace SAT 4500 (Şekil 5.8.b) epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. MasterBrace SAT 4500, iki bileşenli, solventsiz, yüksek dayanımlı, epoksi esaslı özel yapıştırıcıdır.

Çizelge 5.6. Betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan beton karışım tasarımı (kg/m^3).

Çimento	**Su**	**Agrega (mm)**			**Akışkanlaştırıcı**	**Uçucu kül**
		0-3	**5-15**	**15-25**		
255	167	934	429	485	4.24	84

a) b)



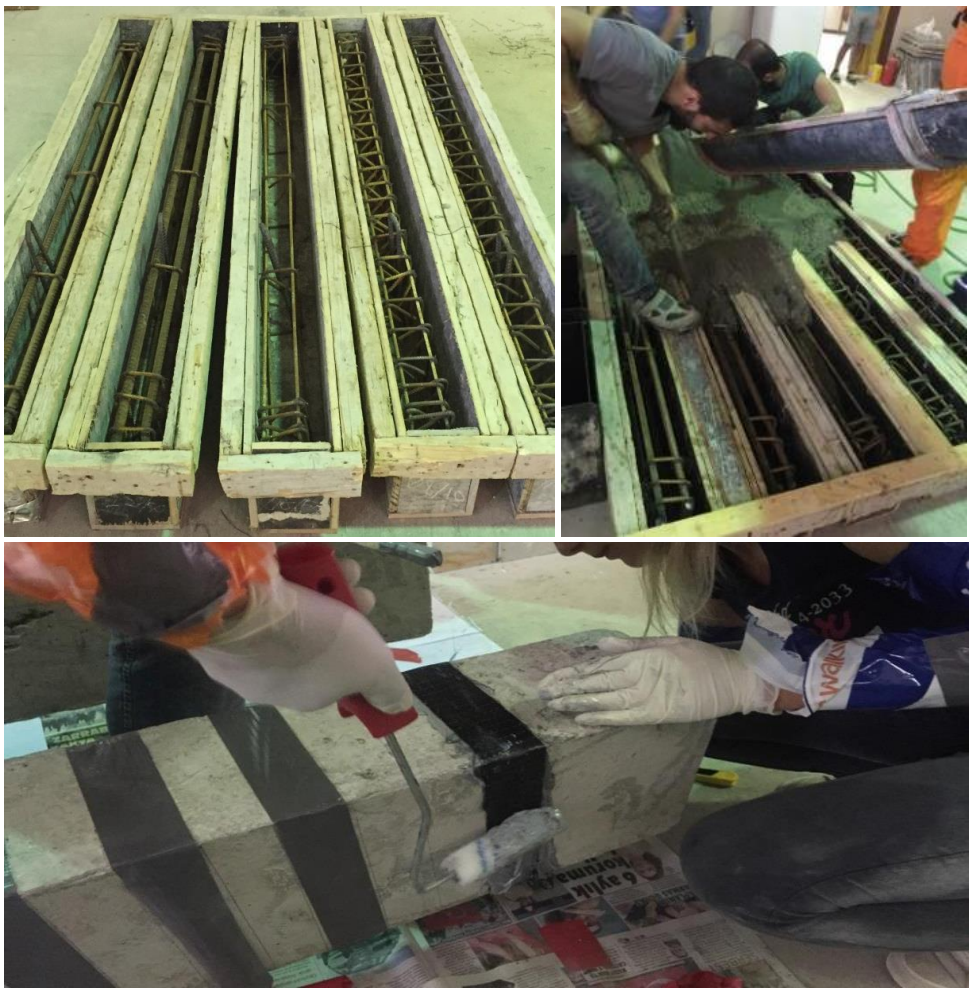
Şekil 5.8. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan a) CFRP, b) epoksi yapıştırıcı.

Çizelge 5.7. BetonFiber HE 0735 çelik fiberlerin özellikleri.

Master Brace FIB 300/50 CFS karbon lifli dokuma malzemesi		**Master Brace SAT 4500 epoksi yapıştırıcı**	
Toplam lif ağırlığı	300 gr/m^2	**Viskozite**	1500-2500 MPa.s
Elastisite modülü	230 000 MPa	**Basınç dayanımı (7 gün)**	>60 MPa
Çekme dayanımı	4900 MPa	**Eğilme dayanımı (t gün)**	>50 MPa
Kopmada uzama	%2.10	**Kullanma süresi**	30 dk
Genişlik	500 mm	**Yeniden kaplanabilme süresi**	48 sa-7 gün

5.2.2. Deney elemanlarının üretimi

Deney elemanlarının üretimi Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı'nda tamamlanmış olup, donatı kafesi ve kalıbın hazırlanması, beton dökümü ve güçlendirme aşamalarından oluşmuştur. Deney elemanlarının üretiminde ahşap kalıplar kullanılmıştır. Ardından donatı kafesleri oluşturularak kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıpların yağlanmasının ardından üretilen beton kalıplara dökülmüş ve vibratör yardımıyla sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Kirişlerin 28 günlük mukavemetlerini kazanmalarının ardından güçlendirilecek yüzeyler zımparalanarak CFRP ile güçlendirilmeye hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.9).



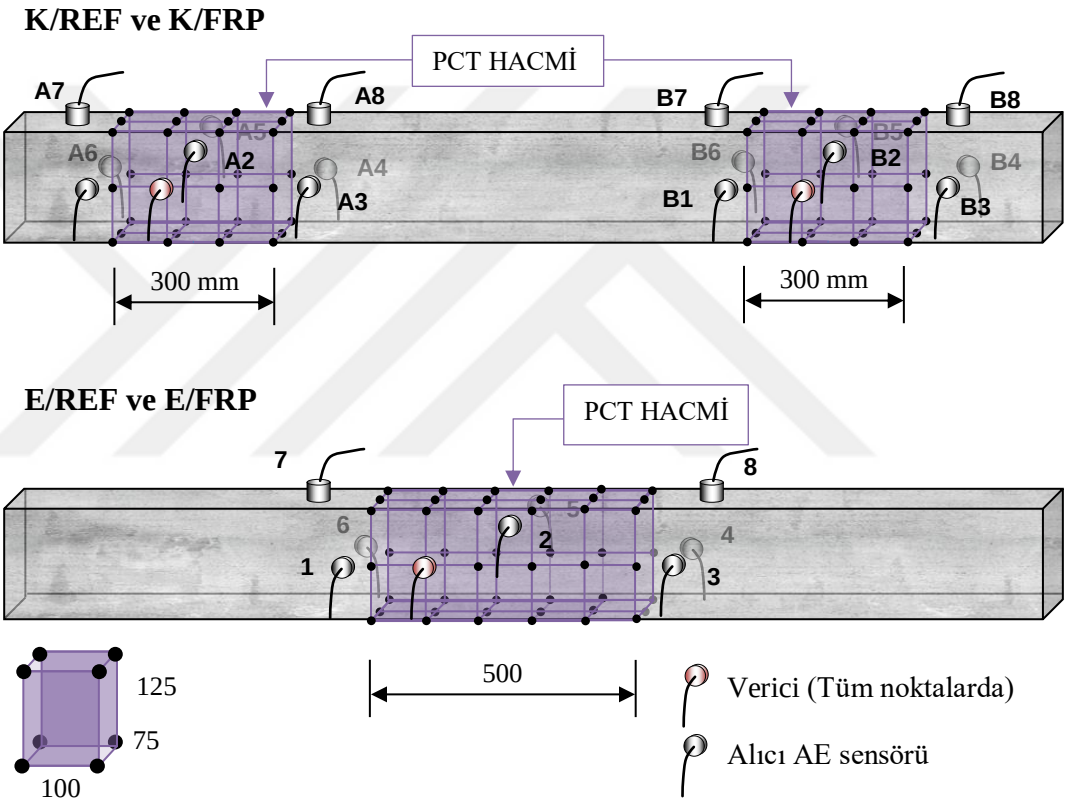
Şekil 5.9. Betonarme kirişlerin üretimi.

5.2.3. AE düzeneği

Deney kapsamında kullanılan AE sistemi ile ilgili detaylı bilgi 5.1.3 numaralı başlıkta verilmişti. Kirişlerin sol köşesinde x, y, z koordinat takımı seçilmiş ve her bir sensöre numara verilerek belirlenen koordinatlara yerleştirilmişlerdir. Sensörlerin yerleşiminde kırılma esnasında kritik önem arz eden çatlakların oluştuğu ve oluşacağının tahmin edildiği bölgeler seçilmiştir. Kesme zayıflığına sahip K/REF ve K/FRP'de sağ ve sol kesme açıklıklarından olmak üzere toplam iki adet AE sistemi (16 adet 150 kHz rezonans freanslı AE sensörü), eğilme zayıflığına sahip E/REF ve E/FRP'de ise eğilme bölgelerinden olmak üzere bir adet AE sistemi (8 adet 150 kHz rezonans frekanslı AE sensörü) kullanılmıştır.

Betonarme kiriş deneyleri sırasında elemanların yüksek gerilmelere maruz kalacağı kesme ve eğilme bölgeleri için Şekil 5.10'daki gibi 300x250x150 ve 500x250x150 mm'lik PCT hacimleri tanımlanmıştır. Bu sayede PCT'nin betonarmede üç boyutlu ilk uygulaması gerçekleştirilmiştir. AE aktivitelerinin

yoğunlaşacağı öngörülen bu bölgeler 100x125x75 mm boyutlarında prizma elemanlara bölünerek PCT ağları oluşturulmuştur. Oluşturulan PCT ağı üzerindeki her noktada (kesme elemanlarında sağda 32 ve solda 32 olmak üzere toplam 64 adet, eğilme elemanlarında ise 48 adet) sinyal üreteci ile 1V, 5V, 10V, 24V genliklere sahip dört farklı yapay sinüs formlu sinyaller oluşturulmuş ve her bir alıcı AE sensörü tarafından okundukları değerler kaydedilmiştir. Üç-nokta-eğilme deneylerinde de AE sensörlerinin koordinatları (Çizelge 5.8) değiştirilmemiş, yükleme süresince göçme gerçekleşinceye kadar parametre düzeltme deneyleriyle aynı şartlarda AE verileri kaydedilmiştir.

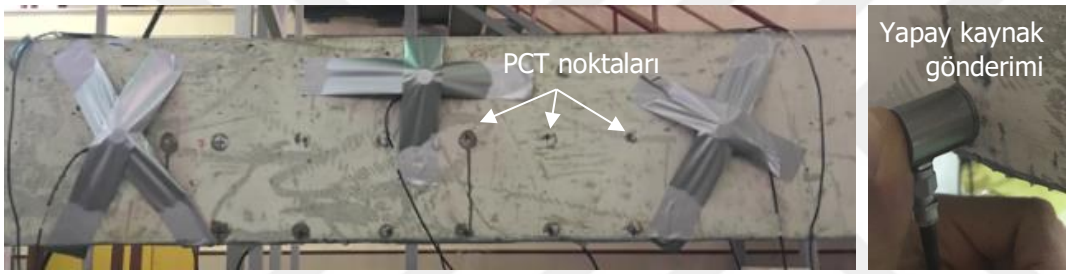


Şekil 5.10. Betonarme kiriş deneylerinde AE sensörlerinin deney elemanları üzerindeki yerleşimi ve 3D-PCT düzeneği (Birim: mm).

Deney elemanları üzerinde işaretlenen PCT noktaları ve örnek bir yapay kaynak gönderme işlemi Şekil 5.11'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.8. Betonarme kiriş deneylerinde AE sensörlerinin koordinatları.

K/REF ve K/FRP								E/REF ve E/FRP			
A Sistemi (Sol)				B Sistemi (Sağ)							
#	X	Y	Z	#	X	Y	Z	#	X	Y	Z
A1	0.500	0.125	0.000	**B1**	1.500	0.125	0.000	**1**	0.800	0.125	0.000
A2	0.650	0.200	0.000	**B2**	1.650	0.200	0.000	**2**	1.150	0.200	0.000
A3	0.800	0.125	0.000	**B3**	1.800	0.125	0.000	**3**	1.500	0.125	0.000
A4	0.800	0.125	0.150	**B4**	1.800	0.125	0.150	**4**	1.500	0.125	0.150
A5	0.650	0.200	0.150	**B5**	1.650	0.200	0.150	**5**	1.160	0.200	0.150
A6	0.500	0.125	0.150	**B6**	1.500	0.125	0.150	**6**	0.800	0.125	0.150
A7	0.450	0.250	0.075	**B7**	1.450	0.250	0.075	**7**	0.750	0.250	0.075
A8	0.850	0.250	0.075	**B8**	1.850	0.250	0.075	**8**	1.550	0.250	0.075

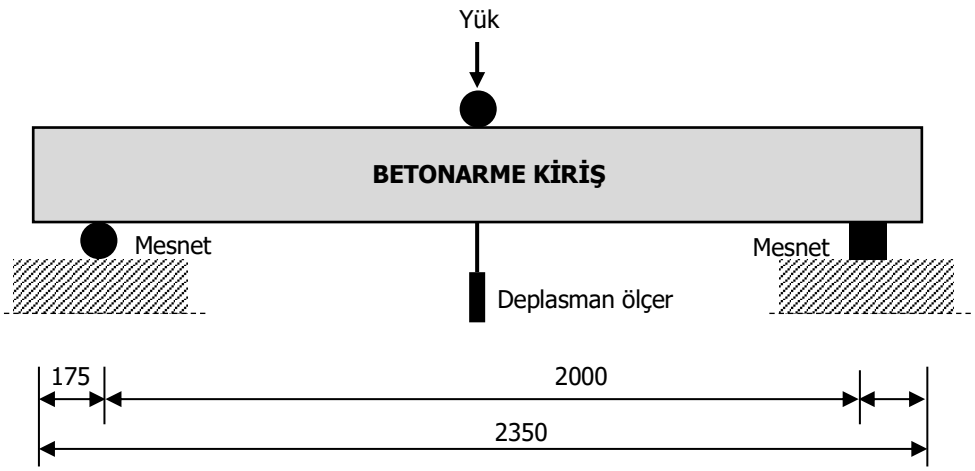


Şekil 5.11. Betonarme kirişler üzerinde 3D-PCT deneyi.

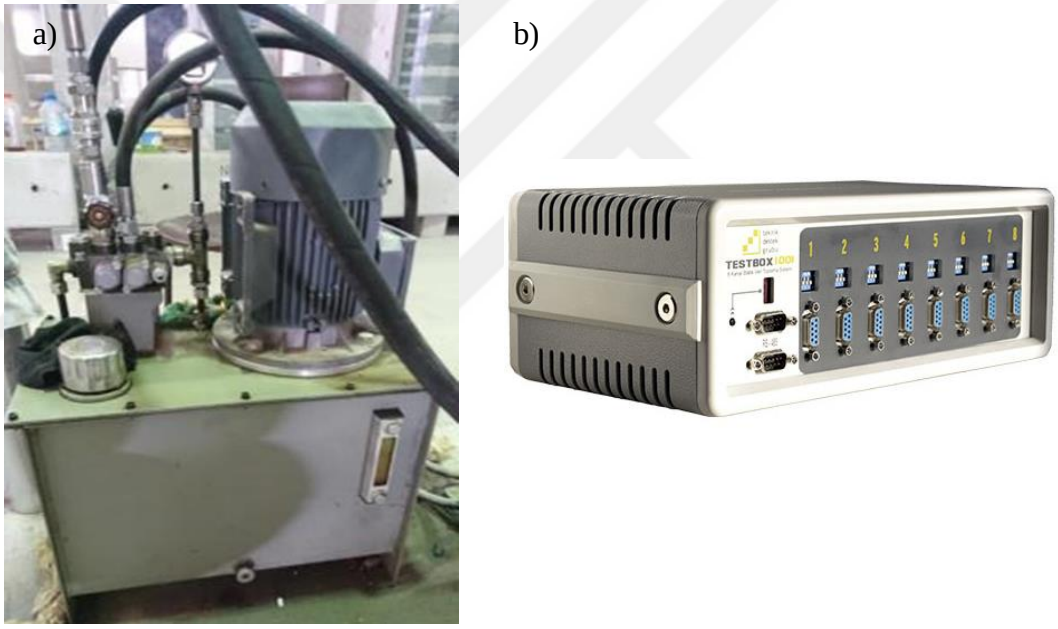
5.2.4. Yükleme düzeneği

Deney elemanlarının eğilme davranışlarını belirlemek için Şekil 5.12'de verilen üç-nokta-eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Yük kirişin orta noktasından hidrolik pompa aracılığıyla monotonik 3 kgf/sn hızda uygulanmıştır. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı'nda bulunan yükleme çerçevesi S420 çeliğinden imal edilen kutu profillerden oluşan ve yapma dolu gövdeli I kesitli diyagonal kirişlerle desteklenmiş rijit bir çerçeve sistemden oluşmaktadır. Deneylere hidrolik güç ünitesi (Şekil 5.13.a) ile yük kontrollü başlanmış, maksimum yükten sonra deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir. Deney elemanlarının orta deplasmanlarının ölçümü için bir adet doğrusal potansiyometrik cetvel kullanılmıştır.

Deneylerde, deplasmanların ölçümü için doğrusal potansiyometrik cetveller (PC) kullanılmıştır. Deplasman ve yük ölçümlerinin toplanmasında TDG firması tarafından üretilen 8 kanallı TestBOX1001 statik veri toplama sistemi ve TestLAB-BASIC veri toplama yazılımı kullanılmıştır (5.13.b).



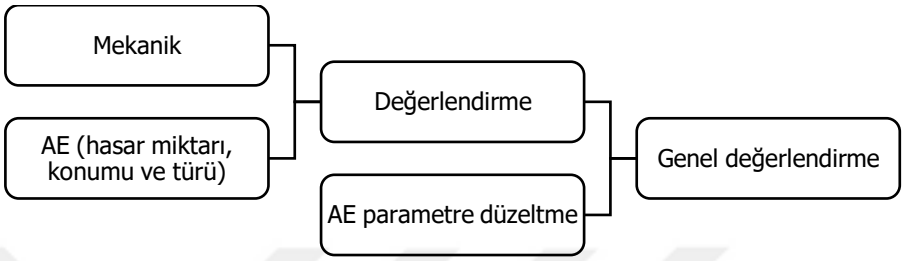
Şekil 5.12. Betonarme kirişlerin test edildiği üç-nokta-eğilme düzeneği (Birim: mm).



Şekil 5.13. Betonarme kiriş deneylerinde kullanılan a) Hidrolik güç ünitesi, b) veri toplama sistemi (TestBOX1001).

6. BULGULAR

Deneysel çalışmadan elde edilen mekanik ve akustik verilere uygulanan analizler sonucu değerlendirilen bulgular bu başlıkta sunulmuştur. Her iki deney seti için de değerlendirmede Şekil 6.1'deki akış şeması takip edilmiştir. Bunun için deney elemanlarının mekanik özellikleri, AE aktivitelerinin özellikleri ve 3 boyutlu parametre düzeltme bulguları kullanılmıştır.



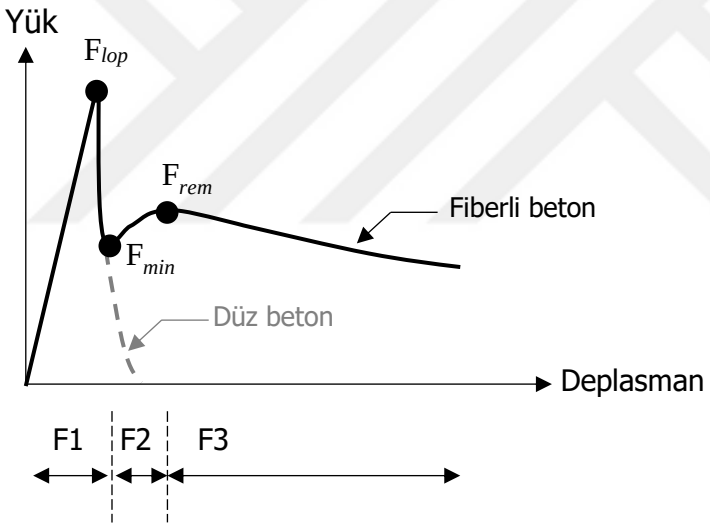
Şekil 6.1. Mekanik ve akustik deney verilerinin değerlendirilmesinde takip edilen akış şeması.

6.1. Standart Eğilme Deneyleri Bulguları

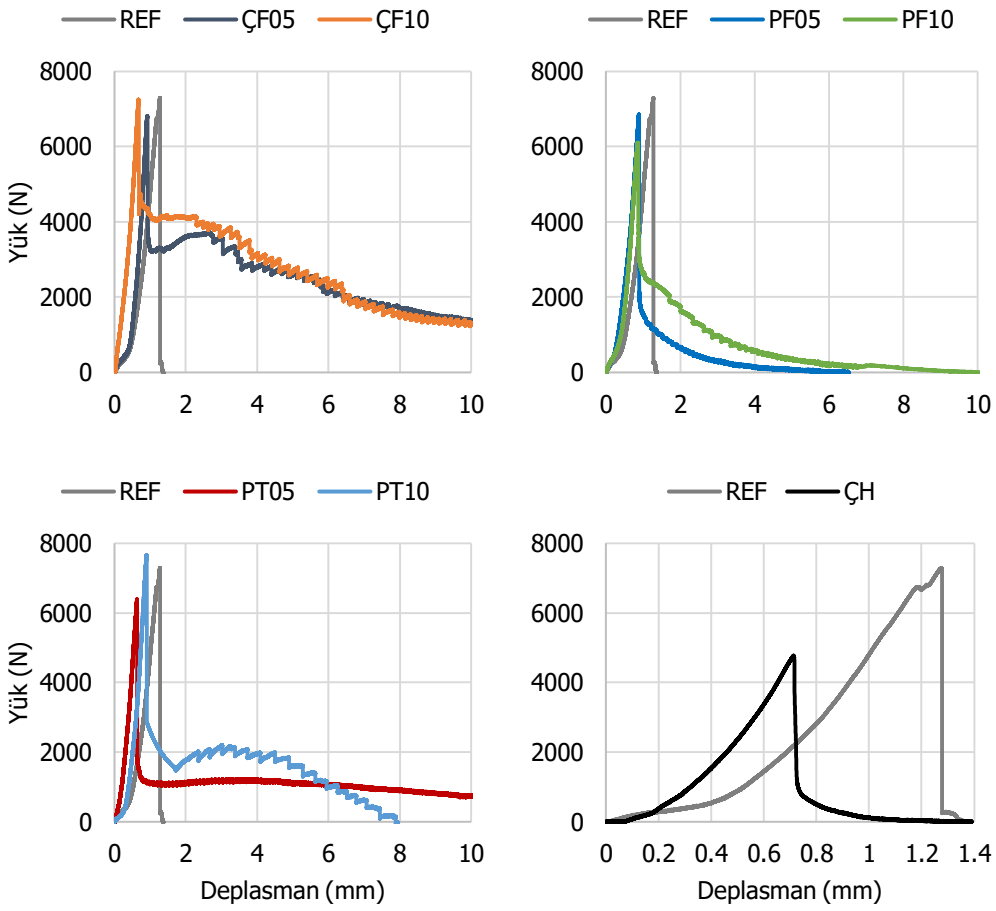
6.1.1. Mekanik bulgular

Tüm numunelerde ilk dönüm noktası yükün maksimum değere ulaştığı ve çok düşük plastik deformasyonun meydana geldiği zamandadır. Bu sırada çatlak gözle görülür derecede değildir. Bu değer düz betondaki maksimum yüktür ve orantılılık limitindeki yük olarak bilinir (F_{lop}) (Alberti et al., 2015). Düz betondan üretilen REF numunesinin yük taşıma kapasitesi F_{lop} 7291 N'a kadar ulaşmışken, %1.0 makro sentetik fiber içeren PT10 hariç tüm fiber katkılı numunelerde bu kapasite düşmüştür. Ancak, bu numuneler F_{lop} kapasitelerinde REF'ten daha düşük deplasman yapmışlar ve fiberlerin katkısı betonun rijitlik ve sünekliğinde etkisini göstermiştir. Ayrıca bu numunelerde düz beton davranışından farklı olarak F_{lop}'tan sonra ulaşılan minimum F_{min} noktasında yeni bir yükleme aşaması oluşmuştur. Fiberler betonun kırılma süreçlerinde açığa çıkardığı enerjiyi köprüleme ile emerek davranışını değiştirmektedir. Yeterli uzunluğa sahip olduklarında deformasyon arttıkça yük değerleri de geri kazanılır. Yükün arttığı rampanın sonunda maksimum çatlama sonrası kalan yük (F_{rem}) üçüncü dönüm noktasıdır (Şekil 6.2). Bu dönüm noktası çelik fiberli ve makro sentetik fiberli numunelerde belirgin olarak gözlenmiştir. Fiber katkılı deney elemanları yükleme düzeneği izin verdiği sürece F_{rem}'den sonra deplasman yapmaya devam etmiştir. Ancak bu numuneler her ne kadar yüksek deplasman değerlerine ulaşabildilerse de bu sırada taşıyabildikleri

yük oldukça düşüktür. Bu sebeple tüm elemanların nihai deplasman limiti 10 mm ile sınırlandırılarak yük-deplasman grafikleri (Şekil 6.3) verilmiş ve tokluk değerleri hesaplanmıştır. Nihai deplasman limitinde F_{lop}'tan en az kayıp veren ÇF05 (1365 N) numunesi olmuştur. Bunu ardından ÇF10 takip etmiştir (1259 N). Mikro sentetik fiberli PF05 nihai deplasman limitine erişemezken, PF10 ise bu seviyede hiç yük taşıyamamıştır. Fiber katkılı numuneler arasında en yüksek sekant rijitliği de çelik ve makro sentetik fiberlerle elde edilmiştir. En yüksek rijitlik ÇF10'da görülmesine rağmen bu numunenin tokluğu da en yüksektir. Yani, düz betona göre yük taşıma kapasitesinden sadece %1 kayıp vererek mekanik anlamda en verimli davranış %1.0 oranında çelik fiber kullanımıyla sağlanmıştır. Bunu takiben yük taşıma kapasitesini %5 artırarak ve rijitlik ve tokluk değerlerini yükselterek %1.0 oranında makro sentetik fiber kullanımıyla önemli bir katkı elde edilmiştir. Çizelge 6.1'de mekanik bulguların özeti verilmiştir.



Şekil 6.2. Fiber katkılı betonun eğilme davranışında hasar fazları.



Şekil 6.3. Standart eğilme elemanlarının yük-deplasman davranışları.

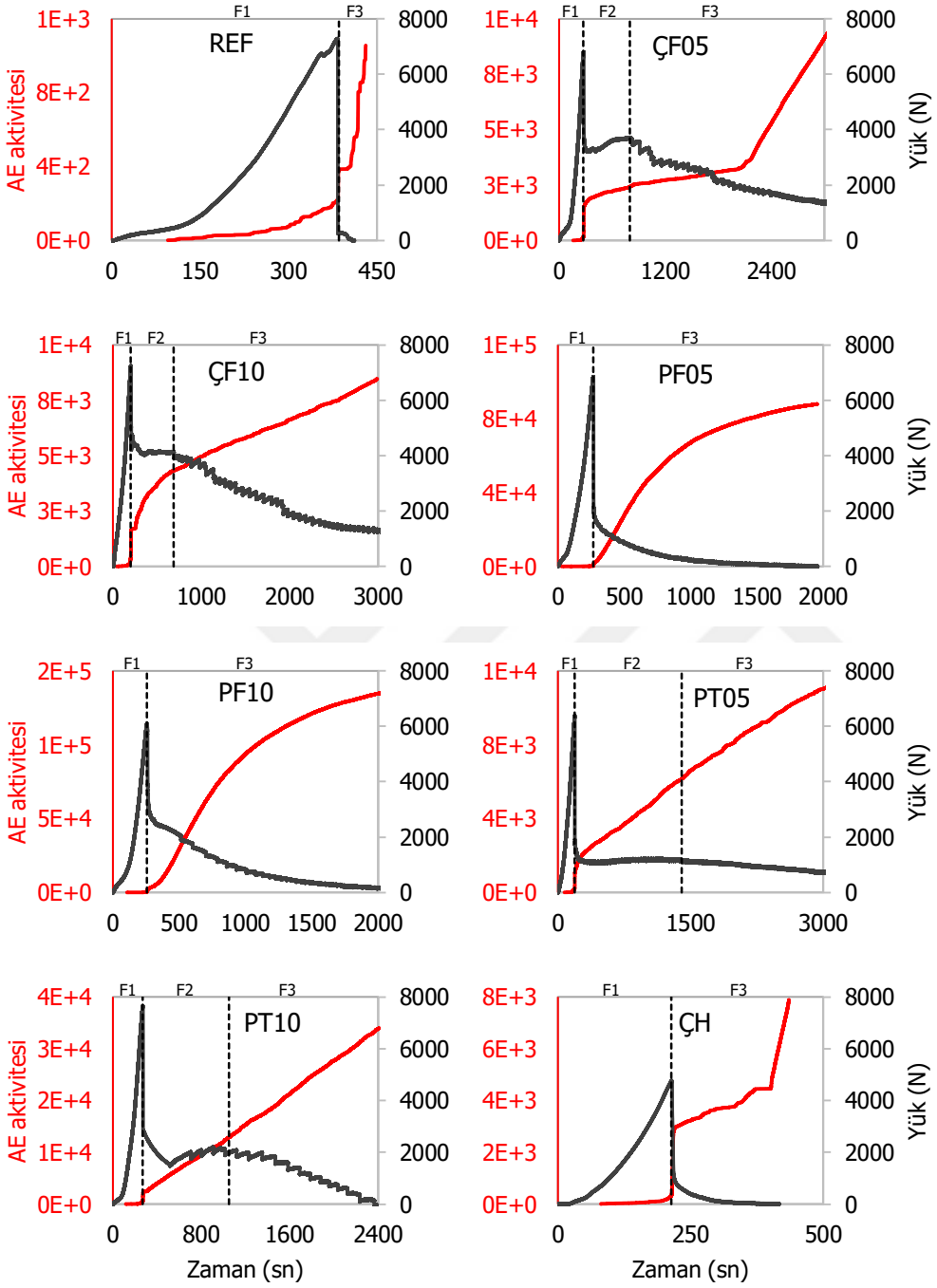
Çizelge 6.1. Standart eğilme elemanlarının mekanik özellikleri.

Deney Elemanı	F_{lop} (N)	Δ_{lop} (mm)	F_{min} (N)	Δ_{min} (mm)	F_{rem} (N)	Δ_{rem} (mm)	F_{10mm}	F_{10mm}/F_{lop}	Sekant rijitliği (N/mm)	Tokluk (mJ)
REF	7291	1.28	-	-	-	-	-	-	5969	3195
ÇF05	6813	0.92	3209	1.05	3784	2.62	1365	%20	7405	19589
ÇF10	7247	0.67	4206	0.69	4750	0.72	1259	%17	10816	35693
PF05	6853	0.89	1703	0.94	-	-	-	-	7700	4115
PF10	6103	0.86	2628	1.01	-	-	6.25	%0.1	7097	7528
PT05	6394	0.63	1044	1.21	1235	3.85	728	%11	10149	11088
PT10	7656	0.9	1503	1.76	2190	3.00	-	-	8507	11675
ÇH	4775	0.71	-	-	-	-	-	-	6725	1298

6.1.2. AE bulguları

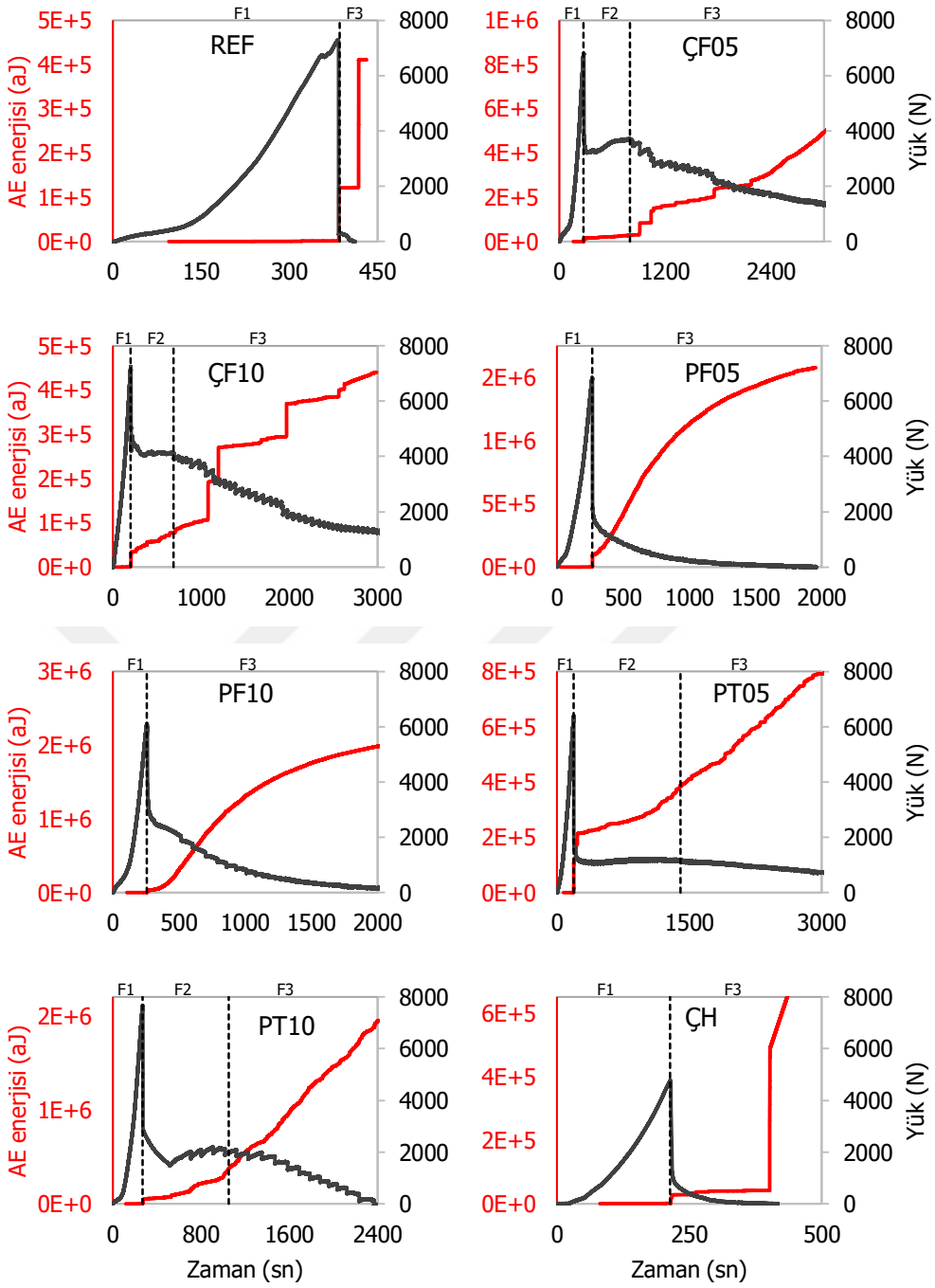
Şekil 6.4 ve 6.5'te deney elemanlarında sırasıyla deney süresince kaydedilen AE aktivitesi ve enerjisi değişimleri fazlara göre gösterilmiştir. Grafiklerde kırmızı

çizgi AE aktivitesi yada enerjisini siyah çizgi ise yükü göstermektedir. Kesikli düşey çizgiler de fazları göstermektedir.



Şekil 6.4. Standart eğilme elemanlarının AE aktiviteleri.

Görüldüğü gibi fiber katkısı ile tüm numunelerde REF'e göre AE miktarı ve AE enerjisi çok yükselmiştir. REF ve ÇH numunelerinde maksimum yük kapasitesine kadar AE miktarı ve enerjisi yok denecek kadar azken, tamamına yakını göçme anında kaydedilmiştir. Fiber katkılı numunelerde ise ani hasar oluşumları engellenmiş ve yük düşüşü anlarında dahi oluşan AE miktarları ve

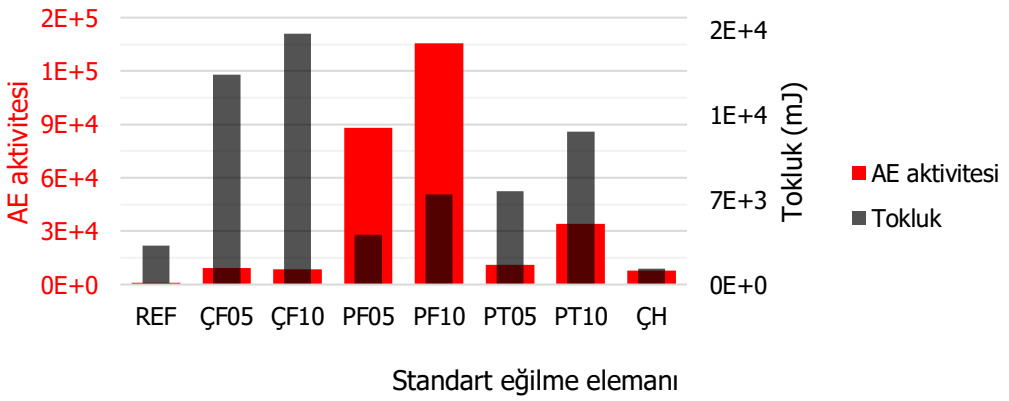


Şekil 6.5. Standart eğilme elemanlarının AE enerjileri.

enerjileri düşmüştür. Zamana bağlı AE aktivitesi ve enerjisi davranışlarında ise en yavaş hasar oluşumu mikro fiberli PF05 ve PF10'da gözlenmektedir. Çelik fiber ve makro sentetik fiberlerin hasar gördükleri sıralarda daha yüksek AE enerjileri salınmış ve bunlar grafiklerde sıçramalara sebep olmuştur.

Şekil 6.6'da AE aktivitesi miktarlarını değerlendirmek için numunelerin tokluk değerleri de birlikte verilmiştir. Tokluk değeri yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanlar kullanılarak ile hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi beton

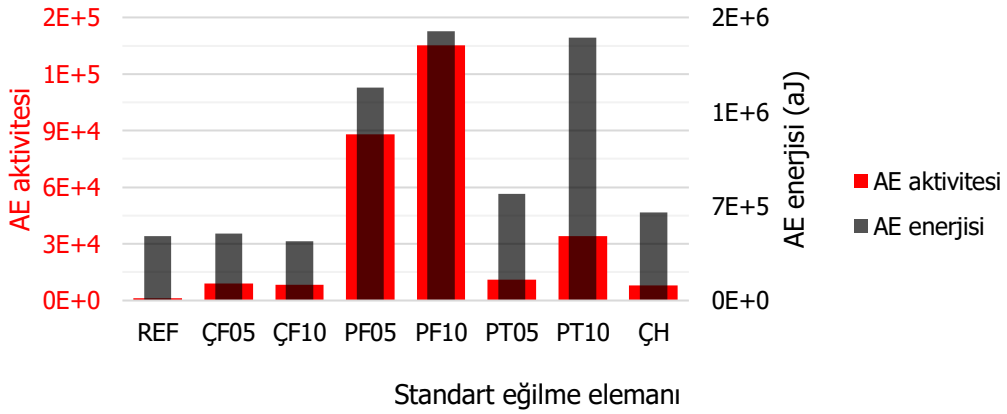
numuneler arasında en düşük tokluk değeri ve en az AE aktivitesi REF'te kaydedilmiştir. Fiber katkılı tüm numunelerde ise hem tokluk hem de AE aktivitesi miktarı artmıştır. Ayrıca her fiber türü için fiber miktarının artırılması ile tokluk da artmıştır. Çelik fiberli numunelerde ise rijit çelik fiberler ile çatlak oluşumları daha fazla engellendiğinden, ÇF10'da ÇF05'e göre bir miktar daha az AE aktivitesi kaydedilmiştir. Diğer yandan, sentetik fiberli beton numunelerin AE aktivitesi miktarlarında ise daha belirgin bir farklılık söz konusudur. Sentetik fiber içeriği PF05 ve PT05'e göre daha fazla olan PF10 ve PT10'da toklukla beraber AE miktarları da artmıştır. Bunun sebebi sentetik fiberlerin çelik fiberlere göre daha düşük rijitliğe sahip olmaları sebebiyle çatlak oluşumlarını engellerken kendilerinin de hasara uğramasıdır. Mikro sentetik fiberlerin de makro sentetik fiberlere göre daha düşük rijitliğe sahip olması sebebiyle en yüksek AE aktiviteleri bu numunelerde görülmüştür. Beklendiği gibi fiberlerin rijitlikleriyle ilişkili olarak betondaki tokluk katkıları en çok çelik fiberden, daha sonra makro sentetik fiberden ve son olarak mikro sentetik fiberden sağlanmıştır. Buna bağlı olarak en fazla AE aktivitesi de mikro sentetik fiberli numunede, daha sonra makro sentetik fiberli numunelerde ve son olarak çelik fiberli numunelerde gözlenmiştir. Çimento harcı ÇH'nin REF'ten daha fazla hasar görmesi sebebiyle de bu numunede daha fazla sayıda AE aktivitesi elde edilmiştir.



Şekil 6.6. Standart eğilme elemanlarının AE aktivitesi ve tokluk miktarlarının karşılaştırılması.

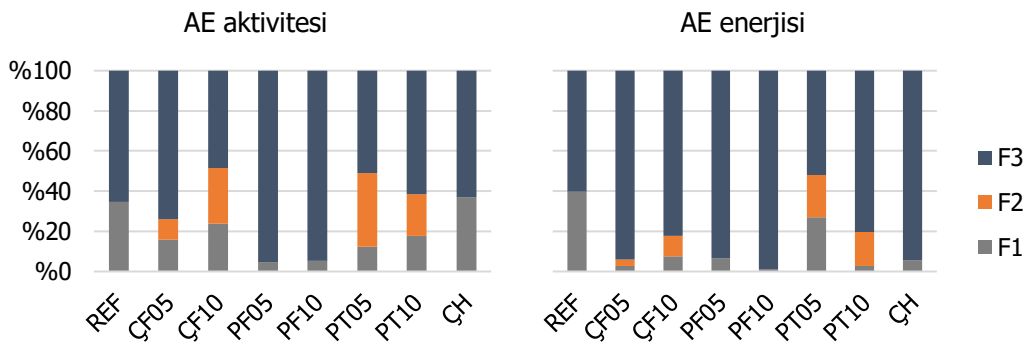
Numunelerin hasar miktarlarını değerlendirmek için Şekil 6.7'de verilen AE aktivitesi ve enerjilerinden faydalanılmıştır. Çelik fiber katkılı numunelerde REF'ten çok daha fazla miktarda AE salınmışken, toplam AE enerjisinde hemen hemen hiç değişiklik görülmemektedir. Bu durum rijit çelik fiberlerin sentetik fiberler kadar hasar görmeyerek daha büyük hasar enerjisi salınımını engellediğini

ve hamurda oluşan çatlakların daha küçük enerjiler açığa çıkararak yavaş yavaş ilerlediğini göstermektedir. Sentetik fiberli numunelerde REF ve çelik fiberli numunelere göre çok daha fazla miktarda AE aktivitesi oluştuğu halde, AE enerjisi çok artmamıştır. Bu durum köprüleme aktiviteleri sırasında mikro sentetik fiberlerin daha küçük ölçekte hasar gördüğünü göstermektedir. Makro sentetik fiberler ise hasar alırken mikro sentetik fiberlere göre daha büyük enerji açığa çıkarmışlardır. Bu sebeple de makro sentetik fiberli numunelerde mikro sentetik fiberli numunelere göre daha az AE aktivitesi oluşmasına rağmen, hemen hemen benzer miktarlarda AE enerjisi salınmıştır.



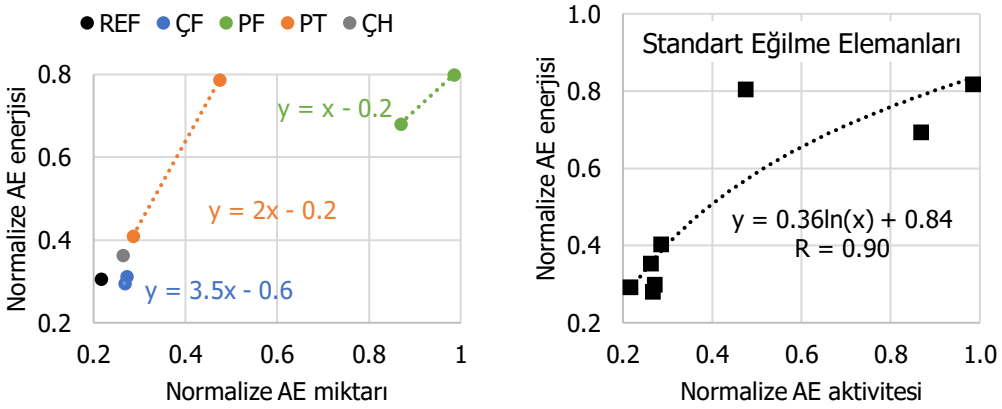
Şekil 6.7. Standart eğilme elemanlarının AE aktivitesi ve enerjilerinin karşılaştırılması.

Şekil 6.8'de deney elemanlarının AE aktivite miktarlarının ve enerjilerinin hasar fazlarına (Şekil 6.2) göre değerlendirilmesi verilmiştir. REF numunesinde deney boyunca oluşan hasarların %35'i, hasar enerjisinin ise %40'ı F1 fazında salınmıştır. Fiber katkılı tüm numunelerde ise bu fazdaki hem AE miktarı hem de AE enerjisi azalmıştır. Özellikle çelik fiber içeren ÇF05 ve ÇF10'un F1 ve F2 fazlarında fiber katkılı numuneler arasında en yüksek AE miktarı kaydedildiyse de, bu aktivitelerin kümülatif enerjileri diğer numunelerden çok düşüktür. Diğer deyişle birinci maksimum yük taşıma kapasitesi ve ikinci maksimum yük noktalarına kadar oluşan hasarların enerjilerini en çok çelik fiber katkısı düşürmüştür. Sentetik fiberli numunelerde ise %1.0 oranında fiber kullanımı (PF10 ve PT10) F1 fazındaki AE enerjisini düşürmüştür. Farklı olarak, mikro sentetik fiber katkılı numunelerde F2 fazı gözlenmemiştir. Makro sentetik fiberli PT05 ve PT10'da ise F2 fazında kayda değer miktarda hasar kaydedilmiştir. ÇH'da ise AE enerjisinin çok büyük miktarı göçme anında salınmıştır.



Şekil 6.8. Standart eğilme elemanlarının hasar fazlarına göre AE aktiviteleri ve enerjileri.

Şekil 6.9'da deney elemanlarının AE aktivitelerinin normalize edilmiş sayıları ve enerjileri arasındaki ilişkiler regresyon doğruları ve denklemleriyle verilmiştir. Soldaki grafikte numuneler türlerine göre, sağdaki grafikte ise bir arada verilmiştir.



Şekil 6.9. Standart eğilme elemanlarının normalize AE aktivitesi miktarı ve enerjisi arasındaki ilişki.

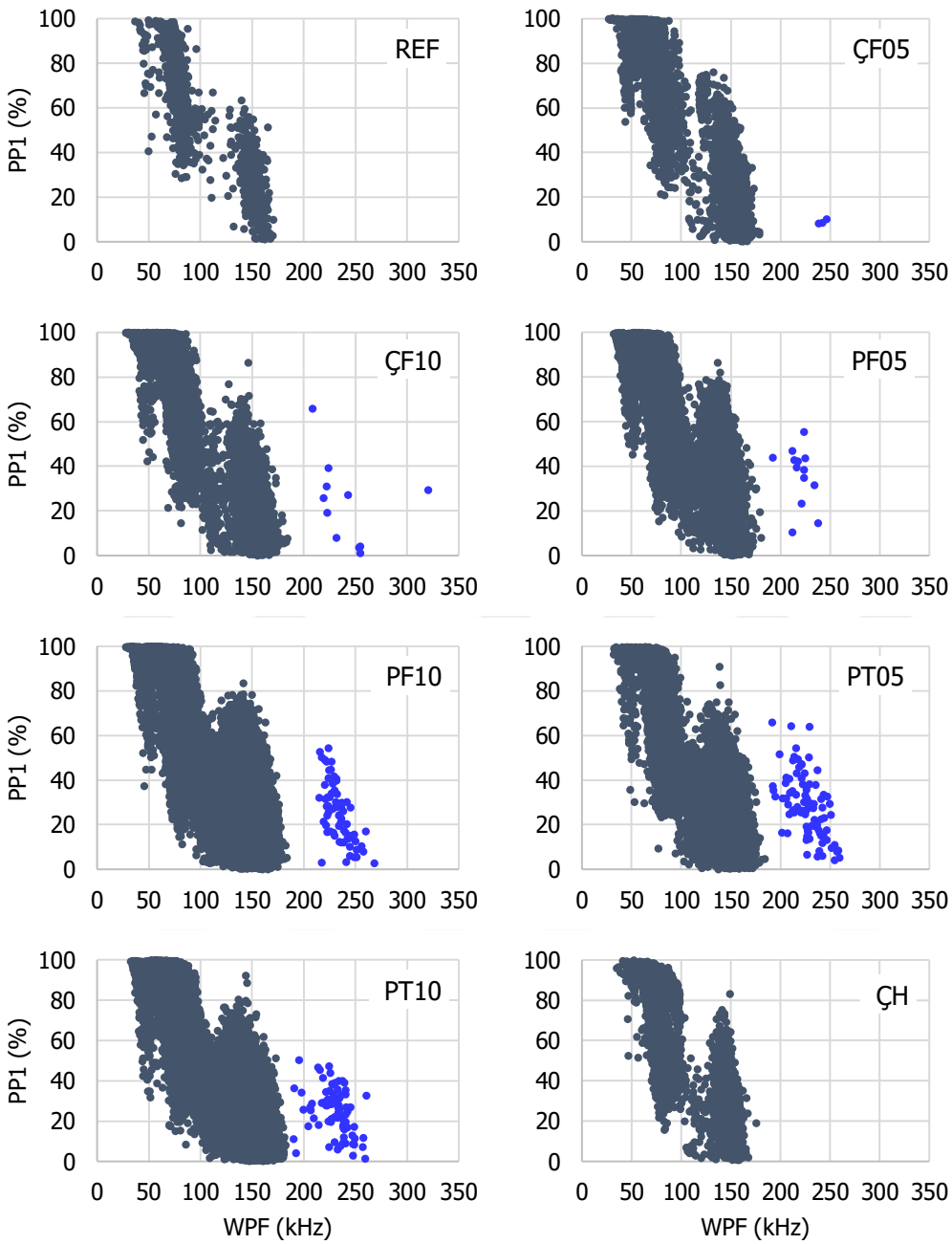
Tüm numuneler birlikte değerlendirildiğinde normalize AE aktivitesi miktarı ve enerjisi arasındaki ilişki R değeri 0.90 olan 6.1 numaralı aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

$$E=0.36*\ln N+0.84 \qquad (6.1)$$

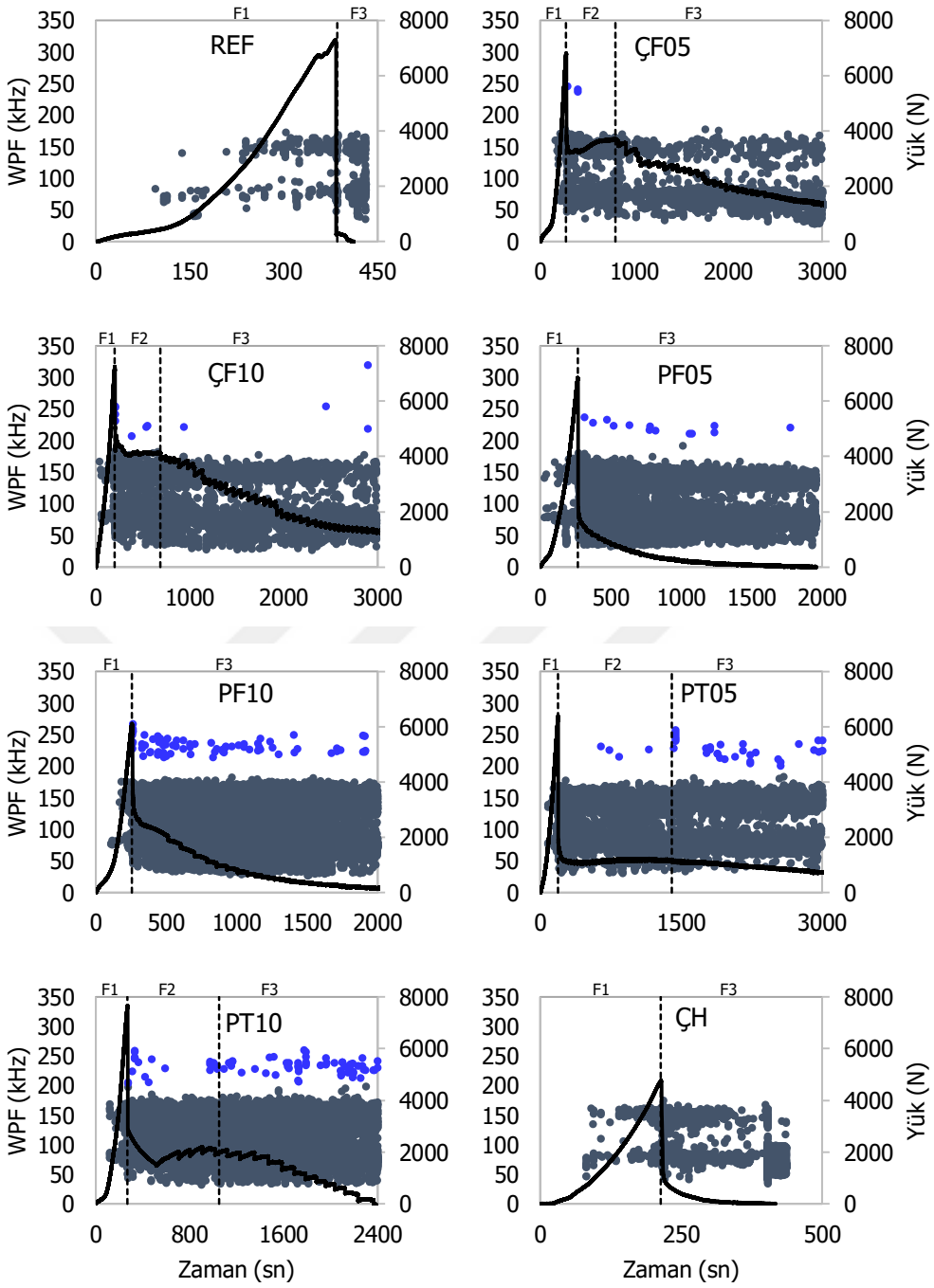
Burada E, AE'nin normalize enerjisini; N ise normalize AE miktarını belirtmektedir.

AE aktivitelerinin örüntü tanıma ile kümelendirilmesi için WPF ve PP parametreleri (bkz. 2.3 numaralı başlık) değerlendirilmiştir. Bu iki değer arasındaki ilişkiler incelendiğinde (Şekil 6.10), deney elemanlarının AE aktivitelerinin farklı frekans değerlerinde yoğunlaştığı, ancak tüm numunelerdeki ortak frekans

aralığının 50-200 kHz olduğu görülmektedir. 150 kHz civarında yoğunlaşan aktiviteler, 150 kHz rezonans frekansına sahip sensörler tarafından daha çok sayıda algılandığından, bu küme haricinde REF ve ÇH'de bir kümenin ortaya çıktığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, beton ve çimento harcı numunelerindeki hasarların frekansları arasında farklılık olmaması, her iki numunede de çimento hamurunda çatlakların meydana geldiğini ve beton numunede agregadan hasar kaydedilmediğini göstermektedir. Fiber katkılı numunelerde ise üçüncü bir frekans kümesi daha gözlenmiştir. Dolayısıyla bu küme fiber aktivitelerinden kaydedilen sinyallerle ilişkilendirilmiştir. Mekanik bulgular ve AE bulguları için yukarıda yapılan değerlendirmeler, frekans dağılımlarıyla hasar türünü ayırarak da doğrulanabilir: Çelik fiber miktarının artmasıyla tokluğu artan ÇF10'da çatlak oluşumlarını engellemek üzere çalışan fiberlerin aktiviteleri yüksek frekans değerli aktivitelerin (ikinci küme) miktarının artmasına sebep olmuştur. Sentetik mikro fiberli numunelerde de fiber miktarının artmasıyla (PF10) tokluk artmış ve bu fiberler çelik fiberlere göre daha az rijit olmaları sonucu daha fazla hasara uğramış ve yine yüksek frekanslı aktivitelerin tanımlandığı ikinci kümede kaydedilen aktivite sayısı artmıştır. Sentetik makro fiberli numunelerdeki fiberler mikro fiberlere kıyasla daha rijit olduklarından, fiber miktarının artması (PT10) fiber hasarlarını tanımlayan ikinci küme aktivite miktarını değiştirmemiştir. Genel olarak, hacim olarak %1.0 fiber içeren numunelerde, daha yüksek fiber miktarı nedeniyle fiber aktivitelerini tanımlayan ve 250 kHz civarında yoğunlaşan çok daha fazla AE aktivitesi gözlenmiştir. Şekil 6.11'de ise kümelendirilen bu aktivitelerinin yüke bağlı oluşum zamanları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi fiber aktivitesi olarak tanımlanan yüksek frekanslı aktivitelerin hepsi (ikinci küme) F2 ve F3 fazlarında oluşmuş, F_{lop} kapasitesine kadar düz beton davranışıyla benzer şekilde sadece matris çatlamalarıyla karşılaşılmıştır. Bu durum da AE aktivitelerinin fiberli betonun mekanik davranışına uygun olarak kümelendirildiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 6.10. WPF ve PP1'e göre standart eğilme elemanlarında kaydedilen AE aktivitelerinin kümelendirilmesi (●Matris çatlaması, ●Fiber aktivitesi).



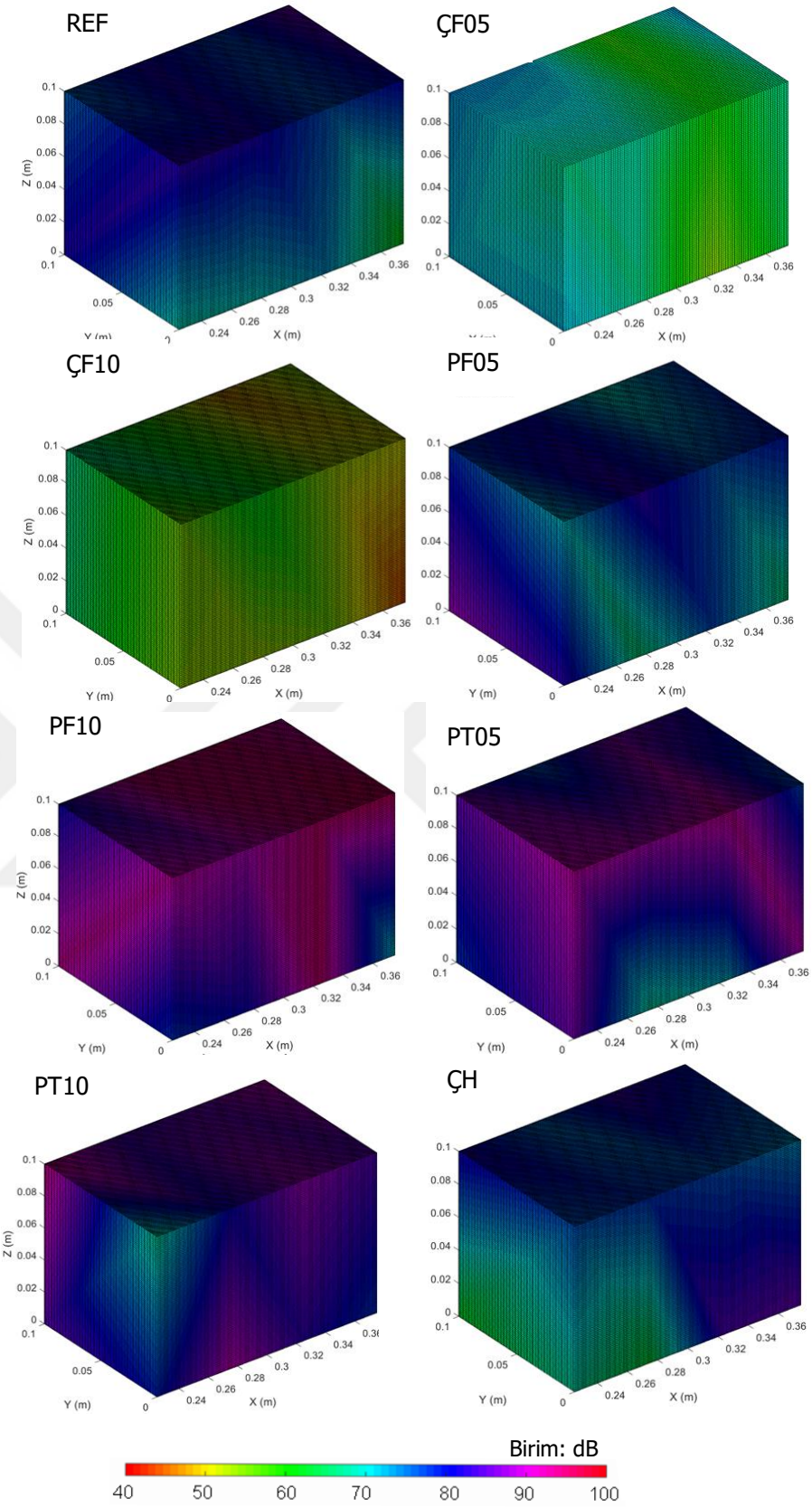
Şekil 6.11. Standart eğilme elemanlarının kümelendirilen AE aktivitelerinin zamana bağlı oluşumları.

6.1.3. 3D-PCT bulguları

Standart eğilme deneylerinde beton heterojenliği deneysel değişken olarak seçilmiş ve fiberlerin varlığı ile beton heterojenliği artmıştır. Bu durumun akustik dalganın sönümlenmesine etkisini incelemek için her deney elemanının üç boyutlu kontur haritaları elde edilmiştir. Bunun için deney elemanlarının PCT hacimlerindeki 16 noktadan gönderilen dört yapay kaynağın AE aktiviteleri altı

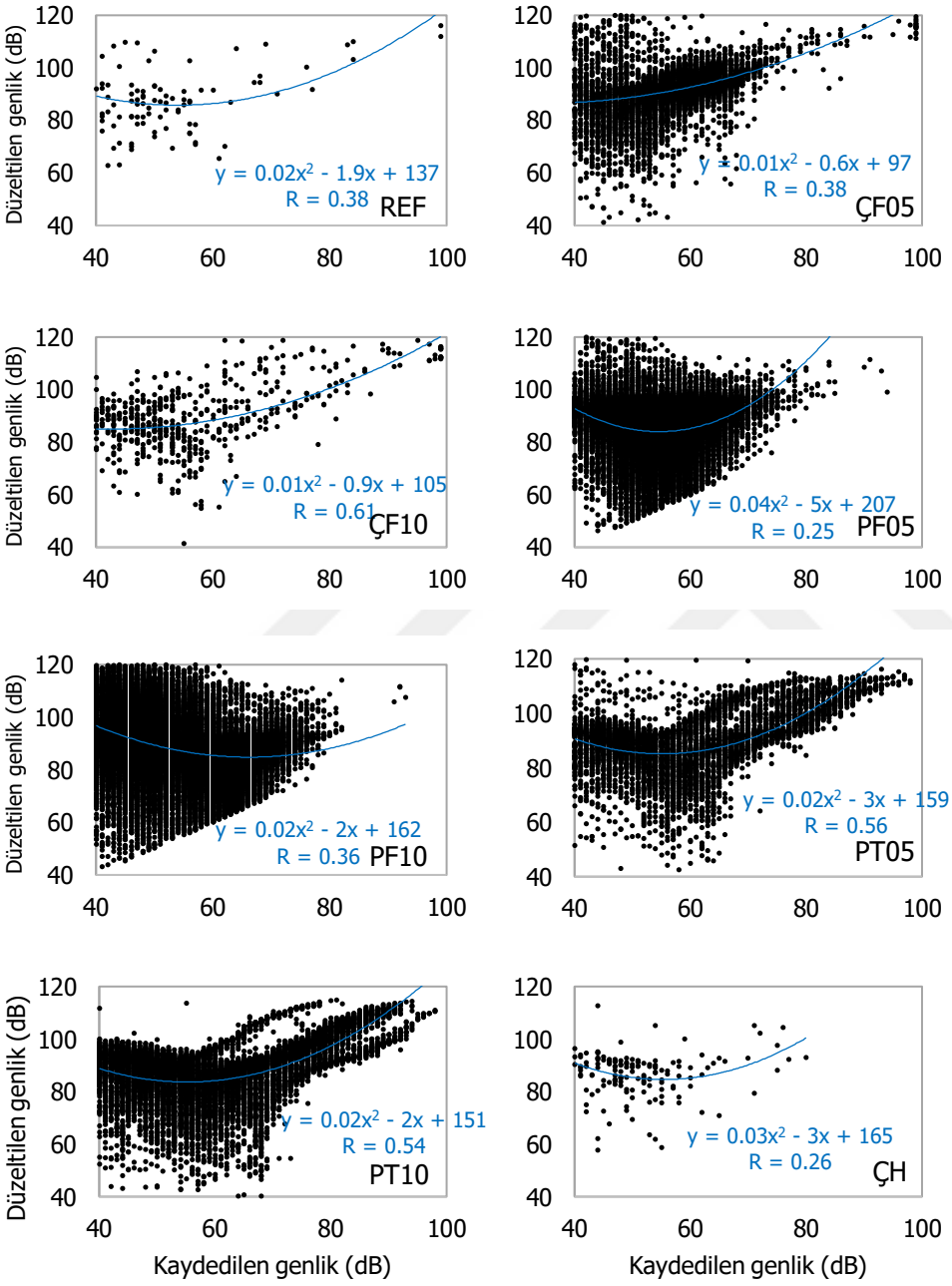
sensör tarafından okunmuştur. Bu sayede her deney elemanında 384 adet genlik değeri kaydedilmiştir. Bu değerler her bir nokta için kaynak ve sensörlere göre ayrılmıştır. PCT hacimleri X ekseni doğrultusunda 1.5 mm'lik, Y ekseni doğrultusunda 1 mm'lik, Z ekseni doğrultusunda 1 mm'lik hücrelere bölünmüş ve PCT noktaları üzerinde elde edilen değerler arasında interpolasyon yapılmıştır. Böylelikle 4 adet noktadan veri alınan X doğrultusunda 101 adet, 2 adet noktadan veri alınan Y doğrultusunda 101 adet, 2 adet noktadan veri alınan Z doğrultusunda da 101 adet nokta üzerinde PCT ilişkileri oluşturulmuştur. Sonuç olarak her bir deney elemanı için altı adet sensörün dört adet yapay kaynağı okumasıyla toplam 24 adet 3 boyutlu hacimsel kontur haritası elde edilmiştir. Şekil 6.12'de deney elemanlarının 24V (108 dB) genlik değerine sahip yapay kaynağın S6 sensörleri tarafından kaydedilen değerlerini gösteren üç boyutlu kontur haritaları sunulmuştur. Her kontur haritası 40 dB ile 80 dB aralığındaki renk skalasına sahiptir. Görüldüğü üzere, 108 dB'e tekabül eden bu yapay kaynak çelik fiber içermeyen REF'te maksimum 80 dB civarında kaydedilmişken, ÇF05'te 60 dB'e, ÇF10'da 40 dB değerlerine kadar düşmüştür. Sentetik fiberli PF ve PT numunelerinde ise yer yer 90 dB değerlerine kadar yükselmiştir. Çelik fiber sinyalde sentetik fibere göre daha çok sönümlenme meydana getirmiş, fiberin artmasıyla da sönümlenme miktarları artmıştır. Bu durum karışıma katılan fiberin betonun heterojenliğini artırarak, sinyallerin daha çok sönümlenmesine sebep olmasının yanı sıra fiber türünün ve miktarının da sönümlenmede etkili olduğunu göstermektedir.

AE aktiviteleri bu tez çalışmasında geliştirilen ve ortamın heterojenliğini dikkate alan yeni bir yaklaşıma dayalı kaynak lokalizasyon algoritması kullanılarak (bkz. 4.2 numaralı başlık) konumlandırılmıştır. Daha sonra bu aktiviteler, konumları için ilgili girdi ve çıktı genlik ilişkileri kullanılarak düzeltilmiştir.



Şekil 6.12. Standart eğilme elemanlarının 24V (108 dB) genlikli yapay kaynağı S6 sensörü tarafından algılama düzeylerini gösteren üç boyutlu kontur haritaları.

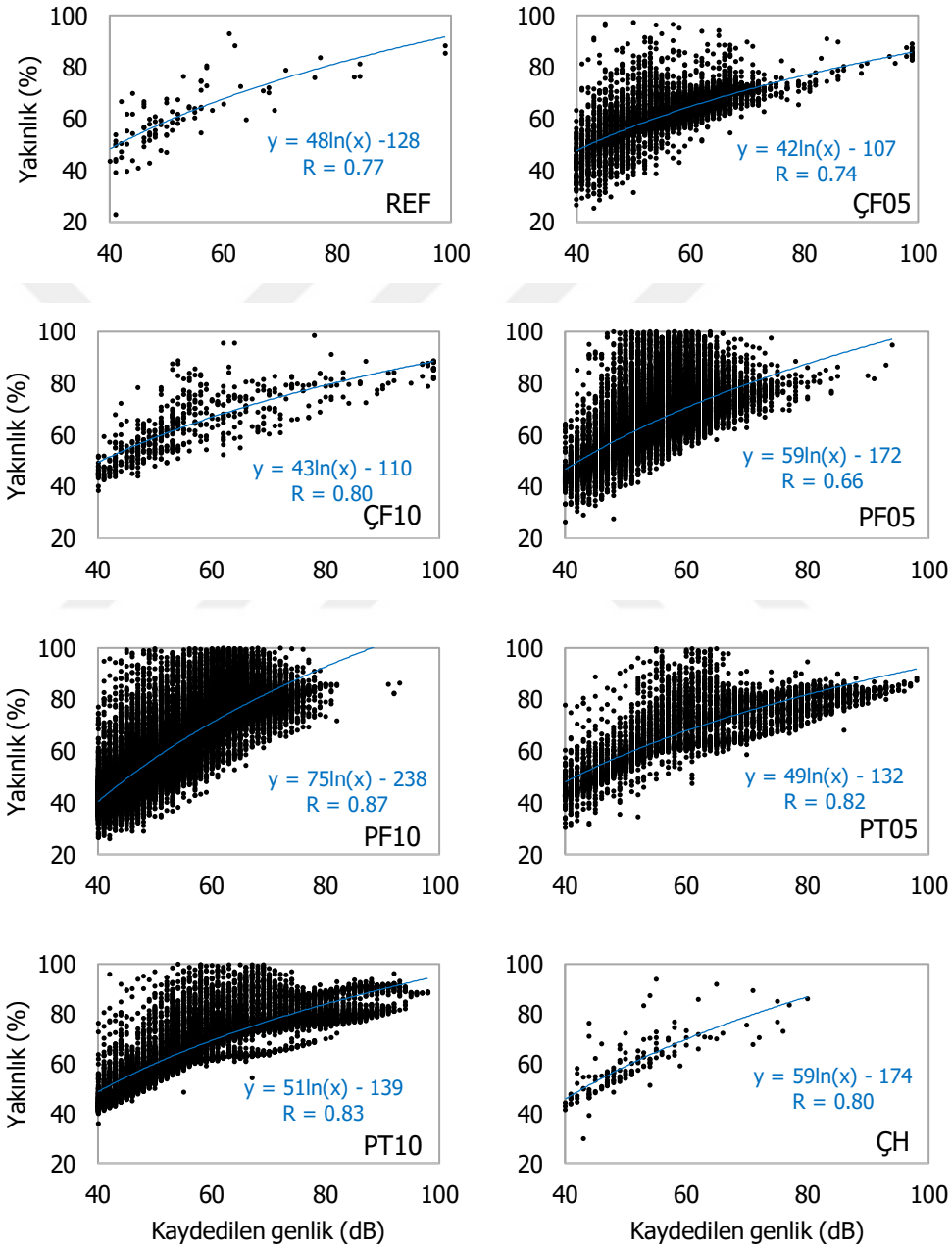
Şekil 6.13'te standart eğilme elemanlarında kaydedilen genlik değerlerine karşılık düzeltilen genlik değerleri verilmiştir. Regresyon analizi ile hesaplanan ve bu dağılımlara en uygun davranışı belirten ikinci derece polinom eğrileri ve denklemleri de grafikler üzerinde verilmiştir.



Şekil 6.13. Standart eğilme elemanlarında kaydedilen ve düzeltilen AE genlikleri.

Dağılımlardan görüldüğü üzere 40 dB (eşik değeri) civarında kaydedilen AE aktivitelerinin düzeltilen genlik değerleri farklı genlikleri kapsayan geniş bir aralıkta değişmiştir. Ancak, kaydedilen genlik değeri arttıkça bu aralık daralmıştır. Bu durum aynı sensör tarafından kaydedilen farklı genliklere sahip aktivitelerin,

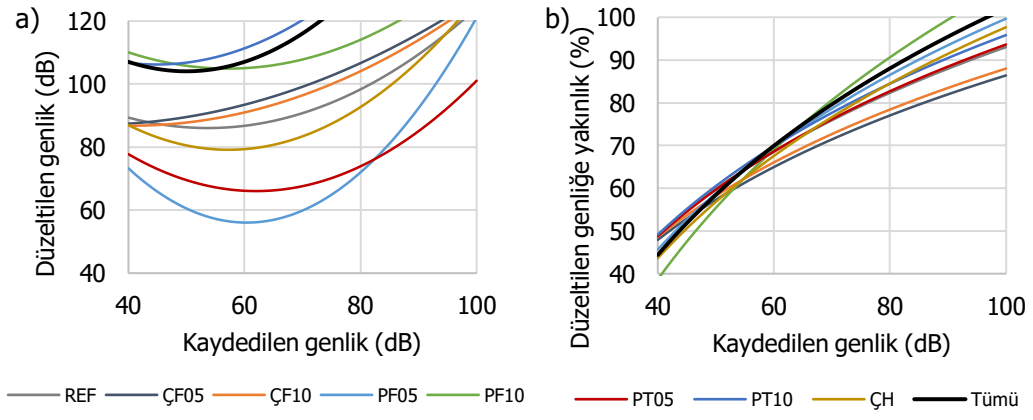
farklı sönümlenme faktörleri nedeniyle eşit genliğe sahip olarak algılanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, aktivitenin genliği arttıkça, parametre düzeltmesine ihtiyacı da azalmıştır. Şekil 6.14 standart eğilme elemanlarında kaydedilen genliklerin düzeltilen genliklere yakınlıklarını göstermektedir. Regresyon analizi ile hesaplanan ve bu dağılımlara en uygun davranışı belirten logaritmik eğriler ve denklemleri de grafikler üzerinde verilmiştir.



Şekil 6.14. Standart eğilme elemanlarında kaydedilen genliklerin düzeltilen genliğe yakınlıkları.

Kaydedilen genlik değeri arttıkça, düzeltilmiş genliklere olan yakınlık artmıştır. Ayrıca, çelik fiberler kaydedilen ve düzeltilen genlikler arasındaki yakınlık seviyesini düşürürken, sentetik fiberler bunu arttırmıştır. Çimento harcında ise düzeltilen genlikler, daha sönümleyici olan beton numuneye göre kaydedilen genliklere daha yakındır.

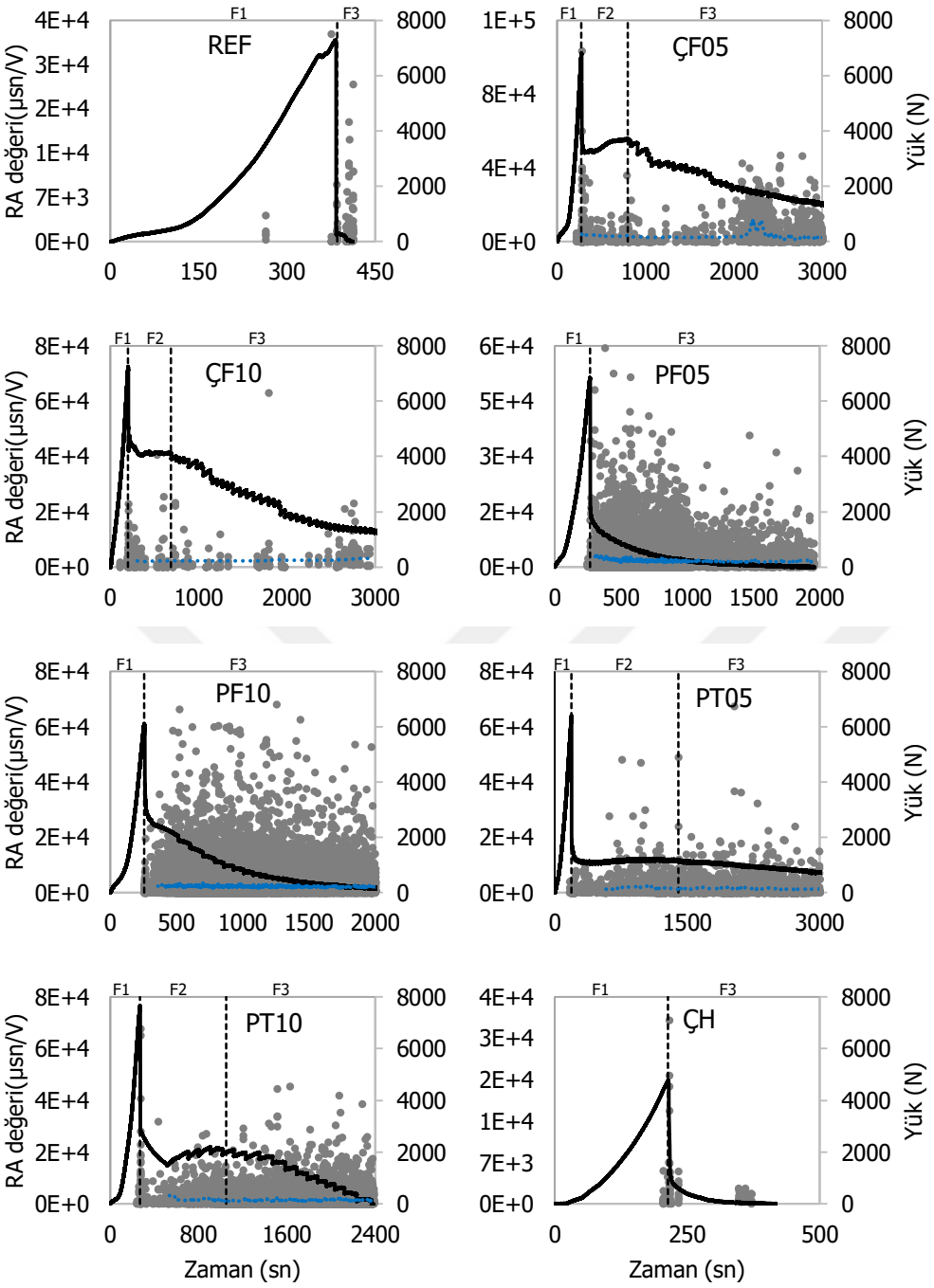
Sinyal genliğinin deney elemanlarının içeriklerine (fiber türlerinin ve miktarlarının) göre değişimlerini incelemek için yukarıda bulunan eğri denklemleri kullanılarak 40 dB ile 100 dB arasındaki genlik değerleri için Şekil 6.15.a ve Şekil 6.15.b çizilmiştir. Deney elemanlarının düzeltilen genlik değerine karşılık yakınlık sıralamalarının her genlik değerinde farklı olduğu görülmektedir. Örneğin, bu eğrilere göre kaydedilen genlik değeri 40 dB olan bir sinyalin en yüksek düzeltilen genlik değeri PF10'da elde edilirken, kaydedilen genlik değeri 60 dB olan bir sinyalin en yüksek düzeltilen genlik değeri PT10'da elde edilmektedir. Benzer durum Şekil 6.15.b'de de görülmektedir. Çünkü her ne kadar fiber miktarı ile malzeme heterojenliği artsa da; bu heterojenlikler de düzenli olmayıp, hasar sinyalinin kaynağı olan lokasyondaki sönümleyicilik daha düşük olabilmektedir. Bu sebeple sinyal genliğinin deney elemanları içeriklerine göre sıralamaları belirli lokasyondaki sönümleyiciliğe bağlı olmakla beraber, her deney elemanının kendine özgü eğrileri kaydedilen ve düzeltilen genlik değerlerini veya yakınlıklarını belirlemede kullanılabilir.



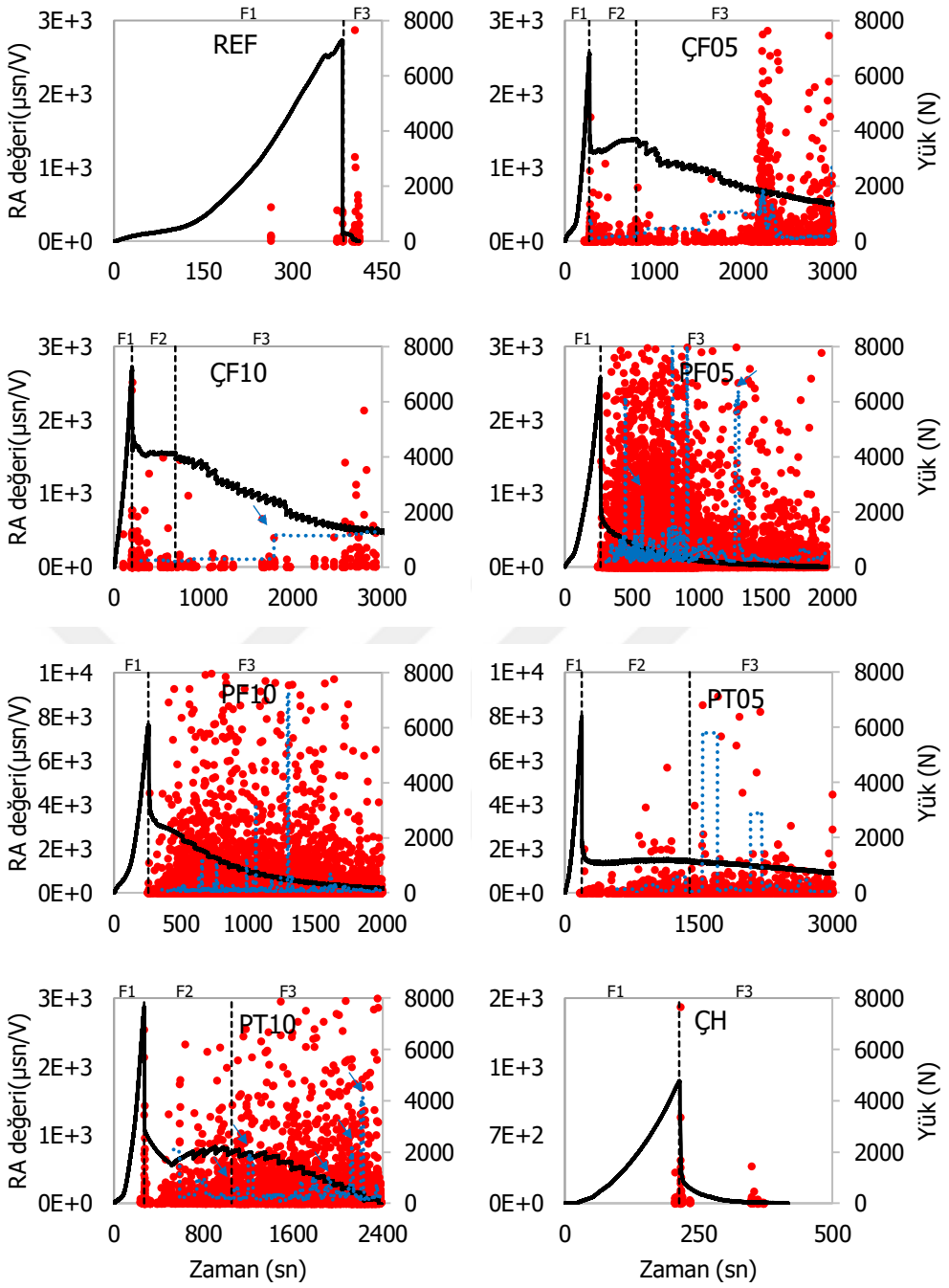
Şekil 6.15. Standart eğilme elemanlarında a) kaydedilen genlik-düzeltilen genlik eğrileri, b) kaydedilen genlik-düzeltilen genliğe yakınlık eğrileri.

Şekil 6.16 ve 6.17 AE aktivitelerinin sırasıyla ham ve 3D-PCT ile düzeltilmesi sonrası hesaplanan RA değerlerinin dağılımlarını göstermektedir. Parametre düzeltmesinin hasar değerlendirmesine etkisi için düzeltilen RA

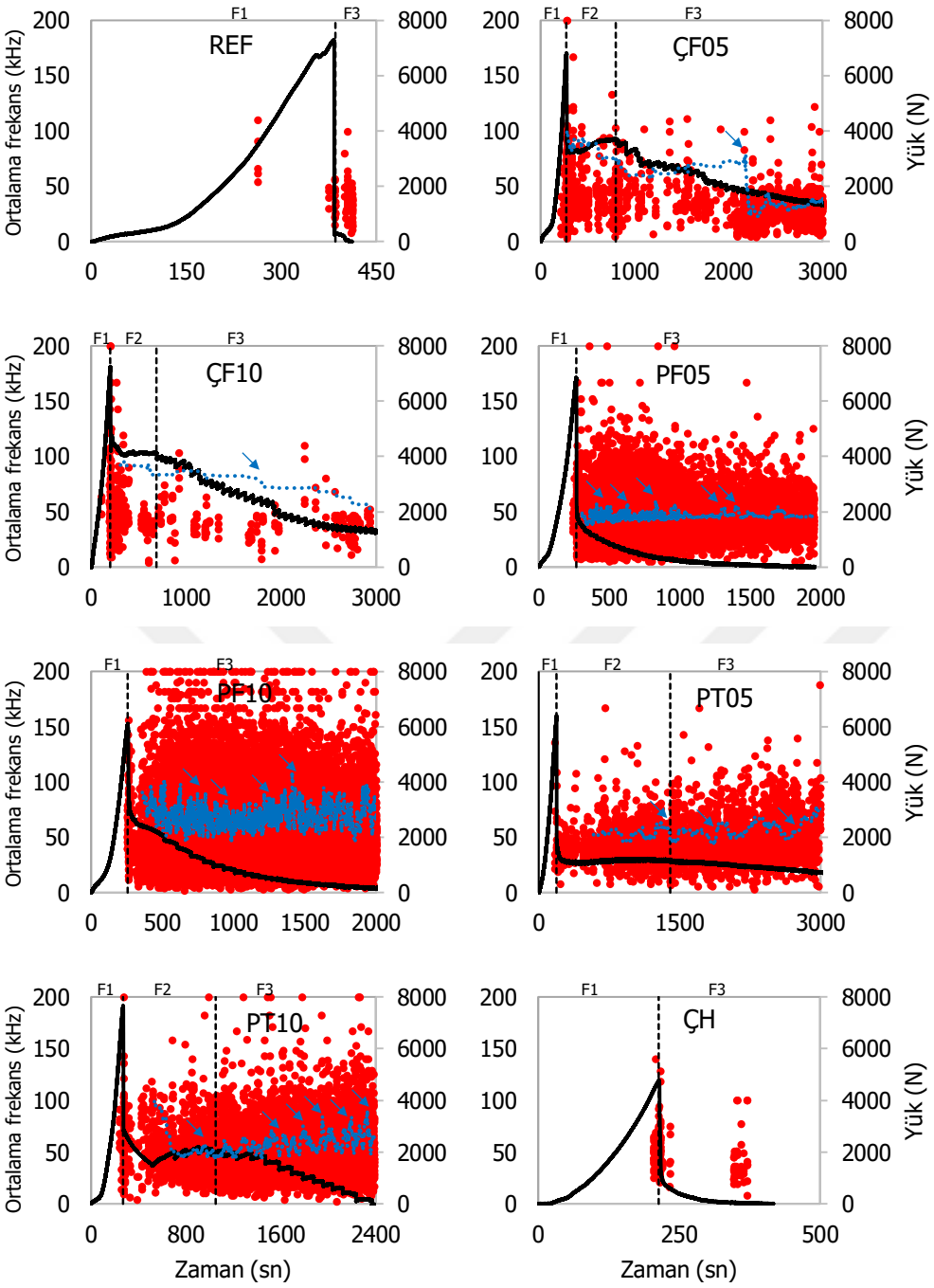
değerleri ve hareketli ortalamaları (mavi renkli kesikli çizgiler), sinyallerin ortalama frekansları (Şekil 6.18) ile birlikte değerlendirilmiştir. Şekil 6.16 (ham RA değeri dağılımı) ve 6.17 (düzeltilen RA değeri dağılımı)'den görüldüğü üzere düzeltilen RA değerleri ham RA değerlerinden daha düşüktür. Çünkü RA değeri genlik parametresiyle ters orantılı olmakta ve düzeltilen genlik değeri yükseldikçe RA değeri azalmaktadır. Bu durumda sönümlenme sonucu genlikleri azalan sinyallerde daha yüksek RA değeri hesaplanıp, bu aktivitelerin daha fazla kesme karakteri türünde görüldüğü yanılgısı doğduğu söylenebilmektedir. REF ve ÇH'de çok az sayıda AE aktivitesi düzeltildiğinden, dağılımların hareketli ortalamaları oluşturulamamıştır. Fiber katkılı numunelerde ise şu değişiklikler gözlenmiştir: ÇF05'in hasar oluşumunun hızlandığı 2050., ÇF10'da ise 1800. saniyelerden sonra ortalama frekansın hareketli ortalamasında ani bir düşüş gözlenmektedir. Ortalama frekanstaki düşüş kesme türünden sinyal veren fiber aktivitelerini belirtmektedir. Bu durum düzeltme sonrası yeniden hesaplanan RA değerleri ile de belirlenebilmektedir: Düzeltilen RA değeri dağılımında bu bölgede hareketli ortalamada sıçramalara sebep olan yüksek RA değerleri göze çarpmaktadır. Benzer şekilde sentetik mikro fiberli numunelerde de oklarla işaretlenen noktalarda hareketli ortalamada sıçramaya sebep olan yüksek RA değerleri göze çarpmaktadır. Sentetik fiberler ise çok daha fazla hasar gördüğünden mikro ve makro sentetik katkılı numunelerde bu sıçramalar daha fazla görülmüştür: PF05 numunesinde 442., 590, 820,, 930, 1294. sn'de; PF10'da 667, 800, 1004, 1070, 1301. sn'de; PT05'te 1300, 1542, 2140, 2800. sn'de ve PT10'da 772, 1093, 1200,, 2121, 2210. sn'de fiber sıyrılmalarını belirten AE aktivitelerinin düzeltilen RA değerlerinin hasar türü belirleyiciliği ham değerlerinden daha fazladır. Bu anlarda oluşan aktiviteler örüntü tanıma bulgularında karşılaşılan ikinci frekans grubunda yer almamaktadır. Bu aktivitelerin bahsedilen frekans grubundaki aktivitelerden (kopma) bu sebeple farklı olarak fiberlerin sıyrılma aktivitelerinden kaynaklandığı tanımladığı söylenebilir. Bu sayede fiberlerin sıyrılma aktiviteleri betonun çatlama aktivitelerinden ayırt edilebilmiş ve kesme ile karakterize olduğu belirlenebilmiştir.



Şekil 6.16. Standart eğilme elemanlarında AE aktivitelerinin ham RA değerleri.



Şekil 6.17. Standart eğilme elemanlarında AE aktivitelerinin düzeltilen RA değerleri.



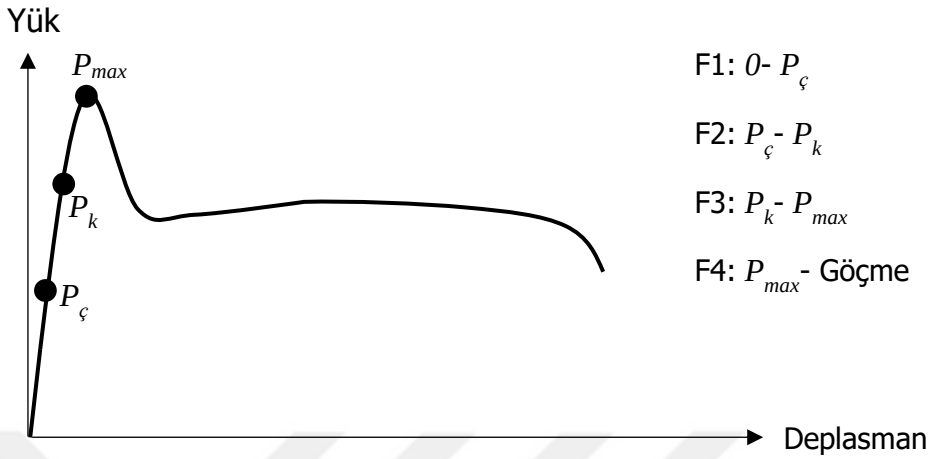
Şekil 6.18. Standart eğilme elemanlarında AE aktivitelerinin ortalama frekansları.

6.2. Betonarme Kiriş Deneyleri Bulguları

6.2.1. Mekanik bulgular

Betonarme kirişlerin eğilme deneyleri davranışları Şekil 6.19'da verilen hasar fazlarına göre değerlendirilmiştir. Burada $P_ç$, ilk çekme çatlağının oluştuğu yükü; P_k ilk kesme çatlağının oluştuğu yükü; P_{max} maksimum yükü tanımlamaktadır.

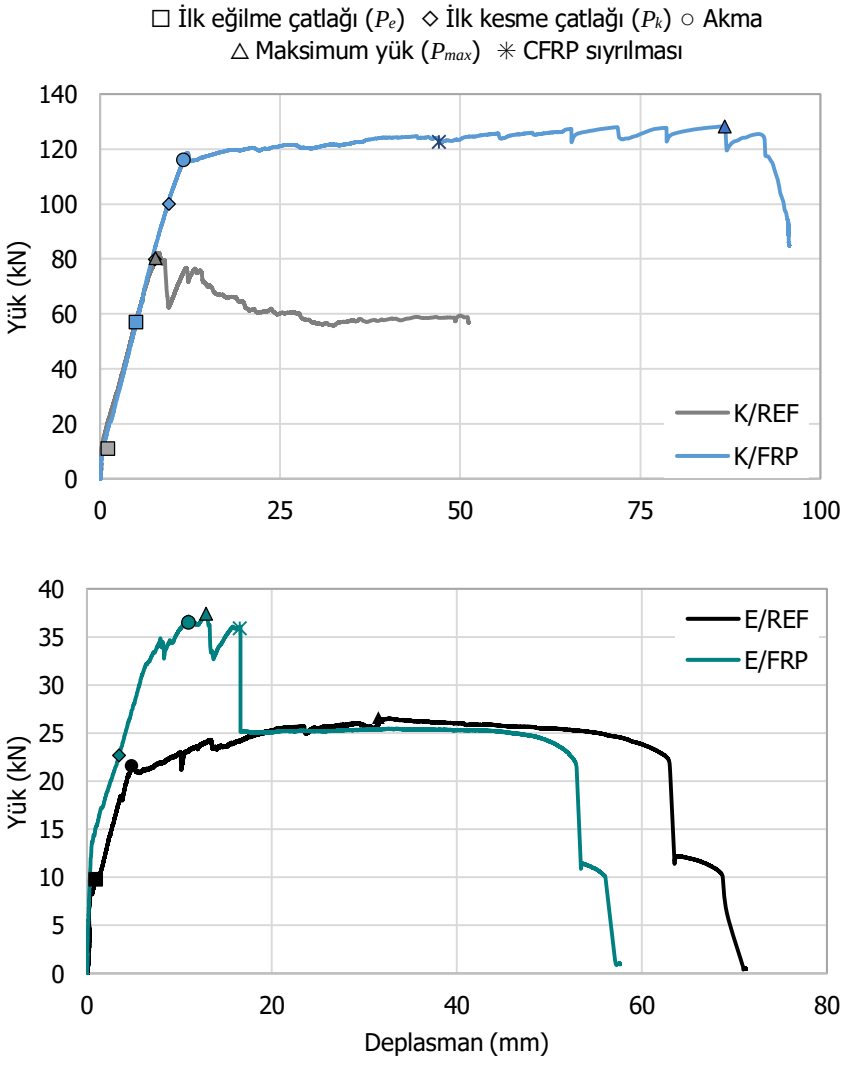
Şekil 6.20'de kirişlerin yük-deplasman davranışları verilmiştir. Grafikler üzerinde kirişlerde meydana gelen hasarların oluşumları da işaretlenmiştir.



Şekil 6.19. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişin eğilme davranışında hasar fazları.

U şekilli CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirilen K/FRP ile kesme yetersizliğine sahip referans kirişi olan K/REF'in çekme çatlaklarının oluşmaya başladığı F1 fazında davranışlarının ve rijitliklerinin birebir aynı olduğu görülmektedir. Ancak burada K/FRP, K/REF'e göre %60 daha fazla yük taşımıştır. Ardından K/FRP'in F2 fazında CFRP şeritlerin aralarında kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Maksimum yüke ulaşılana kadarki F3 fazında ise CFRP şeritlerden çıtırtı sesleri duyulmaya başlanmıştır. Merkezdeki CFRP şeritin beton yüzeyden ayrılması ile ise maksimum yük kapasitesine ulaşılmıştır. Kesme yetersizliğine sahip K/REF'te beklendiği gibi boyuna donatı akmadan gevrek kesme göçmesi gerçekleşmiş, K/FRP'de ise boyuna donatı akmış, göçme türü kesmeden eğilmeye dönmüş ve süneklik oranı 8.1 olarak bulunmuştur. K/REF'in enerji yutma kapasitesi 1595 J hesaplanırken, K/FRP'de 7024 J'a yükselmiştir. Bu bulgular U şekilli CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirmenin betonarme kirişin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Eğilme bölgesinden CFRP ile güçlendirilen E/FRP ise, eğilme yetersizliğine sahip referans kirişi olan E/REF'in çatlaklarının oluşmaya başladığı fazda (E/REF için F1 ve E/FRP için F2) davranışlarının ve rijitliklerinin değişmediği görülmektedir. Ancak bu fazda çatlak türleri çekmeden kesmeye dönmüştür. E/FRP'de, E/REF'e göre çatlak ilerleyişi ve kirişin rijitliğinin düşmesi %36 daha fazla yük taşıyarak gecikmiştir. Bu seviyeden sonra F3 fazında ise CFRP ile güçlendirilen E/FRP, referans kirişi E/REF'e göre

%42 daha fazla yük taşımıştır. F4 fazında CFRP şeritlerden çıtırtılar duyulmuş ve kesme çatlağının da oluşumuyla güçlendirmenin eğilme davranışına katkısı görülebilmiştir. Ancak, gevrek CFRP-epoksi birleşiminin kopması sonucu kirişin ani enerji tüketmesi sebebiyle göçmesi ile E/FRP'nin enerji yutma kapasitesi bir miktar daha düşük olmuştur: E/REF'te 1591 J, E/FRP ise 1449 J olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple süneklik değeri de 13.2 (E/REF)'den 4.8 (E/FRP)'e düşmüştür. Ayrıca E/FRP'nin eğilme bölgesindeki CFRP malzeme gözle görülecek büyüklükteki eğilme çatlaklarını engelleyerek kesme çatlaklarının oluşmasına sebep olmuştur.



Şekil 6.20. Betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışları.

Kısaca CFRP-epoksi birleşiminin gevrekliği CFRP malzemenin kiriş yüzeyinden ayrılarak ani bir güç tükenmesine sebep olmuştur ve CFRP ile betonarme kirişi eğilmeye karşı güçlendirmenin sünekliği olumsuz etkilediği

görülmüştür. Deneyler sırasında kirişlerde gözlenen hasarların yük ve deplasman seviyeleri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Çizelge 6.3'te ise bu değerlerden hesaplanan mekanik özellikler verilmiştir.

Çizelge 6.2. Betonarme kirişlerde deneyler sırasında gözlenen hasarlar.

Betonarme kiriş	İlk eğilme çatlağı		İlk kesme çatlağı		Akma		Maksimum yük		CFRP sıyrılması		Göçme
	kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm	mm
K/REF	11	1.4	79.8	7.6	-	-	80.3	7.6	-	-	51
K/FRP	57	5.0	100	9.6	116	11.5	128	86.8	122.4	47	95
E/REF	9.8	0.9	-	-	21.6	4.8	26.6	31.5	-	-	53
E/FRP	-	-	22.7	3.5	36.5	11.0	37.4	12.9	35.9	16.5	53

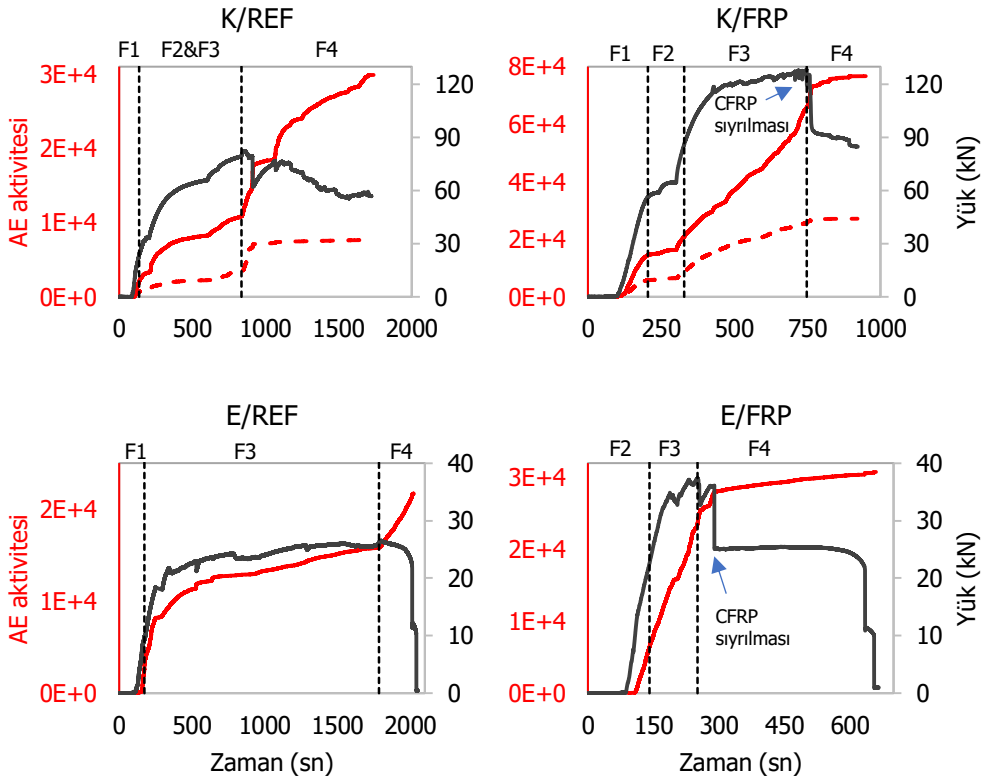
Çizelge 6.3. Betonarme kirişlerin mekanik özellikleri.

Betonarme kiriş	Süneklik	Rijitlik	Enerji yutma kapasitesi	Göçme Türü
		kN/mm	J	
K/REF	-	10.1	1595	Kesme
K/FRP	8.2	10.1	7024	Eğilme
E/REF	12.5	4.5	1591	Eğilme
E/FRP	4.8	3.3	1449	Eğilme

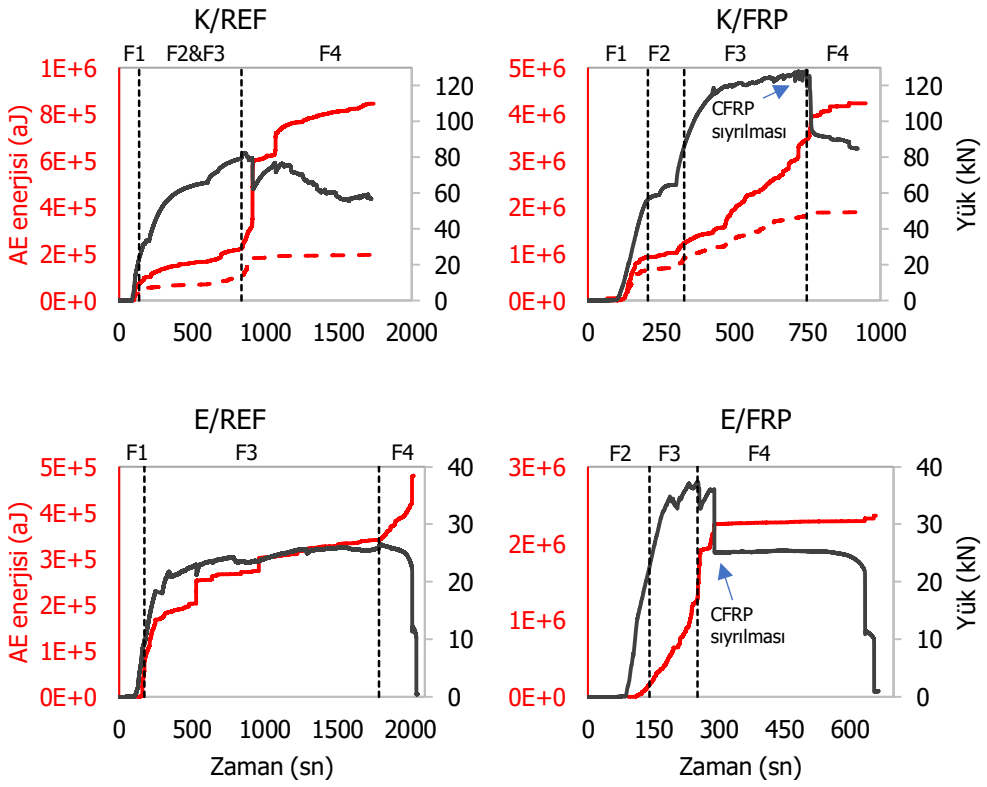
6.2.2. AE bulguları

Şekil 6.21 ve 6.22 betonarme kirişlerde deney süresince kaydedilen AE miktarlarını ve enerjilerini hasar fazlarına göre göstermektedir. Fazlar arasındaki hasar oluşum anlarında (siyah kesikli çizgiler) AE aktivitesi miktarı ve enerjisi davranışlarında da değişiklikler olduğu açıkça görülmektedir. K/REF'in sol (sürekli kırmızı çizgi) ve sağ (kesikli kırmızı çizgi) kesme açıklıklarında kaydedilen AE aktivitelerinden görüldüğü üzere F1 fazında düşük yük seviyelerinde dahi AE aktiviteleri kaydedilmeye başlamıştır. F2'den itibaren ise AE salınım hızı artmış, AE enerjisi ise neredeyse sabit kalmıştır. Yük artıp maksimum değere ulaşana kadar (F2 ve F3 fazı) kılcal kesme çatlaklarının oluşmasıyla kirişin her iki kesme açıklığında da nihai AE aktivitesinin yaklaşık %40'ı hızla oluşmuştur. Yükün düştüğü ve gözle görünür ilk kesme çatlaklarının gözlendiği anda her iki açıklıkta da çok sayıda AE aktivitesi oluşumu ve deney boyunca en yüksek AE enerjisi salınımı gözlenmiştir. Kiriş tekrar yük alıp deney sonlandırılana kadar göçmeye sebep olacak çok sayıda kesme çatlakları da kirişin sol kesme açıklığında oluşmuş

ve bu sistem tarafından kaydedilen yüksek enerjili AE aktiviteleri de artmıştır. K/FRP'nin sol (sürekli kırmızı çizgi) ve sağ (kesikli kırmızı çizgi) kesme açıklıklarında kaydedilen AE aktivitelerinden görüldüğü üzere E/REF'in aksine F1 ve F2 fazında da kirişin her iki kesme açıklığında nihai AE aktivitesinin yaklaşık %30'u hızla oluşmuştur. İlk kesme çatlaklarının gözlendiği andan yük düşüşü anına kadar F3 fazında her iki kesme açıklığında da AE oluşumu ve AE enerjisi çok hızlı artmıştır. K/REF'ten farklı olarak düşük yük seviyelerinde bu düzeyde çok daha fazla aktivite gözlenmesinin sebebi çatlak oluşumlarını engellemek üzere çalışan CFRP şeritlerin aktiviteleridir. Göçmeye kadar F4 fazında ise çok sayıda çatlak ve CFRP aktiviteleri de kirişin sol kesme açıklığında oluşmuş ve bu sistem tarafından kaydedilen AE aktiviteleri de artmıştır. E/REF'in özellikle F1 fazından sonra AE aktiviteleri artmaya başlamıştır. Akma gerçekleşene kadar AE aktivitesi oluşum da hızla ilerlemiş, maksimum yüke ulaşılana kadar ise daha düşük bir eğimle artmaya devam etmiştir. Yükün düştüğü ve F4'ün başladığı andan itibaren ise AE oluşumu tekrar hızlanmış ve çekme donatısı kopana dek hızla AE salınmıştır. E/FRP'de ise henüz ilk kesme çatlağı gözlenmeden önce (F1 fazında) dahi AE aktiviteleri oluşmaya başlamıştır, buna rağmen hala AE enerjisi düşük seviyelerdedir. CFRP malzeme yüzeyden ayrılmaya başlayana kadar F2 fazı süresince ise AE aktivitesi oluşumu da artmış, akma gerçekleştiğinde ise daha yüksek bir eğimle artmaya devam etmiştir. Taşıma kapasitesine ulaşıp yükün düştüğü anda ise AE enerjisinde sıçrama meydana gelmiştir. CFRP malzeme koptuğu anda da akma sırasındaki kadar olmasa da yüksek enerjili AE aktiviteleri aniden salınmıştır. CFRP ile güçlendirilen K/FRP ve E/FRP'de beton çatlama aktivitelerinin yanı sıra CFRP malzemenin beton yüzeyden ayrılması ve kopması olayları daha fazla AE salınımına sebep olmuştur.

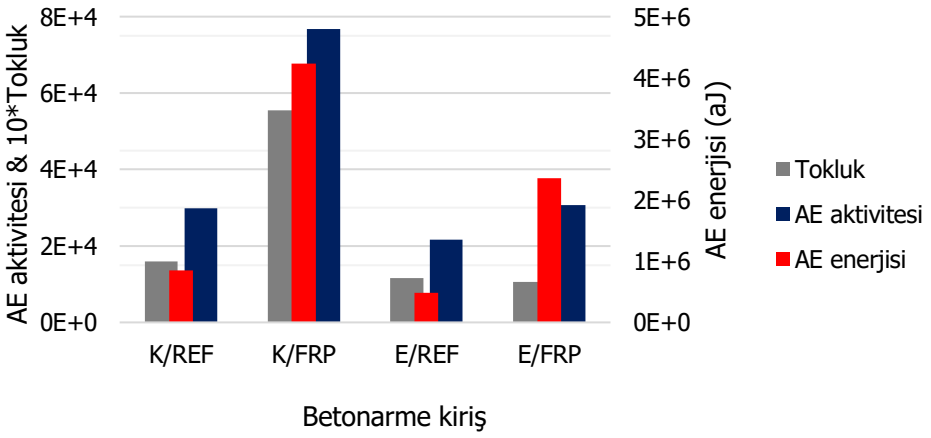


Şekil 6.21. Betonarme kirişlerin AE aktiviteleri.



Şekil 6.22. Betonarme kirişlerin AE enerjileri.

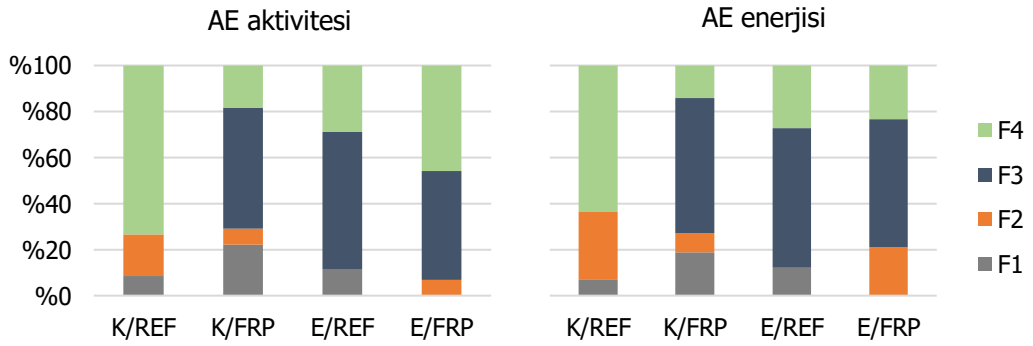
Şekil 6.23'te kirişlerin AE miktarları ve enerjileri, tokluk değerleriyle değerlendirilmiştir. Kesme bölgesinden CFRP ile güçlendirilen K/FRP'de CFRP etkinliği tokluğu artırarak şeritlerin çalışmaları sırasında fiberlerden kaydedilen aktiviteler sebepli de AE miktarı ve enerjisi artmıştır. Eğilme bölgesinden CFRP ile güçlendirilen E/FRP'de ise E/REF'e göre tokluk bir miktar azalmasına rağmen AE miktarı ve enerjisi artmıştır. Ancak bu kirişte AE enerjisi, AE miktarına nazaran çok daha fazla artmıştır. Bu durum eğilmeye karşı CFRP ile güçlendirmede, kesmeye karşı güçlendirmedekinin tersine eğilme bölgesindeki CFRP'nin beton yüzeyden ayrılması sonucu çok daha fazla hasar enerjisinin salındığını göstermektedir.



Şekil 6.23. Betonarme kirişlerin AE aktivitesi ve enerjilerinin tokluk değerleriyle karşılaştırılması.

Şekil 6.24'te betonarme kirişlerin AE aktivite miktarlarının ve enerjilerinin fazlara göre değerlendirilmesi verilmiştir. Kesmeye karşı CFRP ile güçlendirme betonarme kirişlerde ilk eğilme çatlakları oluşana kadar F1 fazında salınan AE aktivitesi miktarını ve enerjisini artırmış, kesme çatlaklarının oluştuğu F2 fazındakileri ise azaltmıştır. Bu durum kesme performansının iyileşmesi sonucu K/FRP'de F1 fazında daha çok eğilme çatlağı oluştuğunu, F2 fazındaki kesme çatlaklarının ise azaldığını göstermektedir. K/FRP'de maksimum yüke kadar oluşan hasarları tanımlayan F3 fazı oluşmuştur ve bu kirişte en çok hasar miktarı ve enerjisi bu fazda gözlenmiştir. Ayrıca K/REF'in göçme fazı olan F4'te AE aktivitelerinin ve enerjilerinin sırasıyla %73 ve %64'ü salınırken, güçlendirilmiş K/FRP'de F3 fazının da ortaya çıkması ile göçme fazında bu değerler %18 ve %14'e kadar gerilemiştir. Bu durum kirişi göçmeye götürecek ani ve büyük enerjili hasarların daha erken yük seviyelerinde daha küçük enerjilerle oluştuğunun göstergesidir. Eğilmeye karşı

CFRP ile güçlendirmede ise F1 fazında kesmeye karşı güçlendirmede karşılaşılanın tam tersi bir durum söz konusudur. Eğilmeye karşı CFRP ile güçlendirilen E/FRP'de F1 fazı gözlenmemiş, F2 fazı gözlenmiştir. Bu durum eğilme performansının iyileşmesi sonucu E/FRP'de düşük yük seviyelerinde eğilme çatlaklarının oluşmasının engellendiğini, çatlakların kesmeye döndüğünü göstermektedir. Bu durum eğilmeye karşı güçlendirme için olumlu olsa da, kesme çatlaklarının gözlenmesi istenmeyen bir durum yaratmıştır. Maksimum yüke kadar oluşan F3 fazında ise eğilmeye karşı güçlendirme ile hem AE aktivitesi miktarı hem de enerjisi azalmıştır. Asıl farklılık ise, kirişi göçmeye götüren F4 fazında gözlenmiştir: Eğilmeye karşı CFRP ile güçlendirme ile bu fazda AE aktivitesi miktarı artmasına rağmen, AE enerjisi düşmüştür. Bu durum, E/FRP CFRP şeritin beton yüzeyden ayrılmasıyla güç tükenmesi yaşadığı için fiber hasarlarının hasar miktarını artırsa bile daha düşük enerjilerle salındıklarını belirtmektedir.

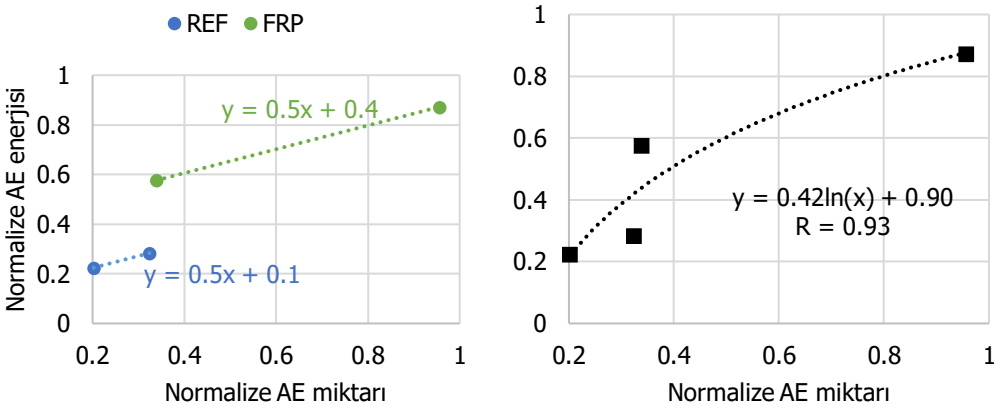


Şekil 6.24. Betonarme kirişlerin hasar fazlarına göre AE aktiviteleri ve enerjileri.

Şekil 6.25'te kirişlerin AE aktivitelerinin normalize edilmiş sayıları ve enerjileri arasındaki ilişkiler regresyon doğruları ve denklemleriyle verilmiştir. Soldaki grafikte kirişler türlerine göre güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş olarak, sağdaki grafikte ise bir arada verilmiştir. Tüm kirişlerin AE aktiviteleri birlikte değerlendirildiğinde normalize AE aktivitesi miktarı ve enerjisi arasındaki ilişki R değeri 0.93 olan 6.2 numaralı aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

$$E=0.42*\ln A+0.9 \qquad (6.2)$$

Burada *E*, AE'nin normalize enerjisini; *A* ise normalize miktarını belirtmektedir.

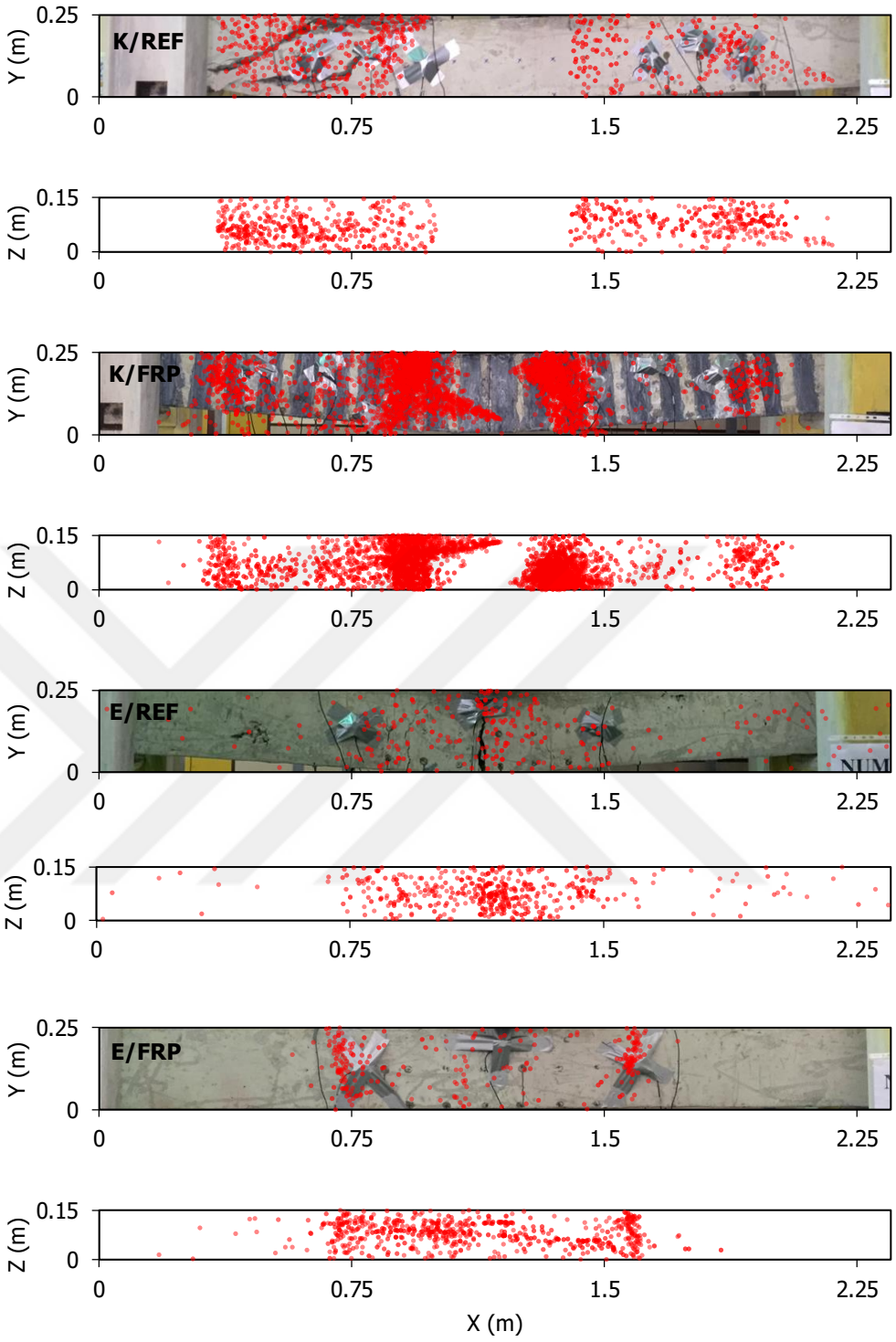


Şekil 6.25. Betonarme kirişlerin normalize AE aktivitesi miktarı ve enerjileri arasındaki ilişki.

AE aktivitelerinin bu tez çalışmasında geliştirilen 3 boyutlu hasar konumlandırma algoritmasıyla elde edilen konumları, göçme sonrası çatlak haritalarıyla beraber Şekil 6.26'da verilmiştir. Bu aktiviteler konumlarına göre belirlenen 3D-PCT ilişkileriyle düzeltilmiştir.

6.2.3. 3D-PCT bulguları

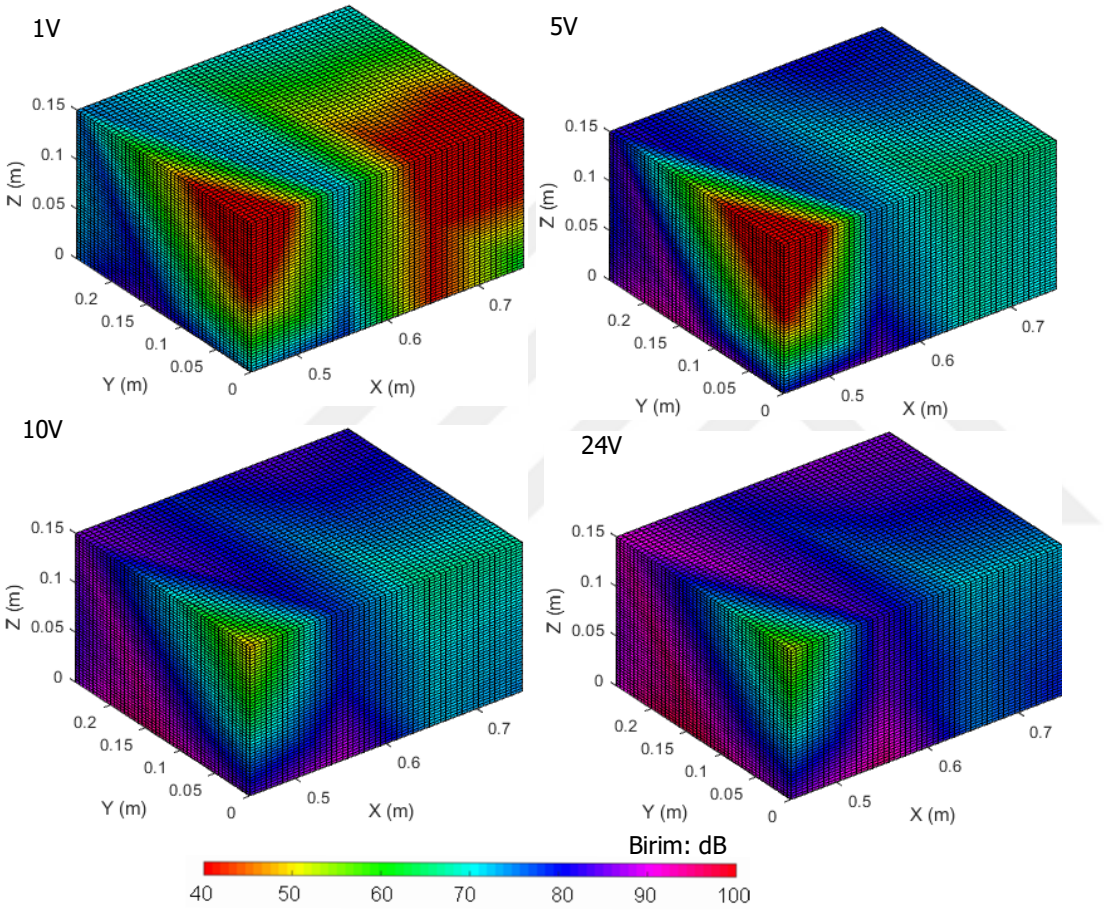
Betonarme kirişlerde eğilme deneyleri öncesinde gerçekleştirilen 3D-PCT deneylerinde PCT hacimlerindeki noktalardan gönderilen dört yapay kaynağın AE aktiviteleri sekiz sensör (K/REF ve K/FRP için 16) tarafından okunmuştur. Bu sayede K/REF ve K/FRP'de 2048, E/REF ve E/FRP'de ise 1536 adet genlik değeri kaydedilmiştir. Bu değerler her bir nokta için kaynak ve sensörlere göre ayrılmıştır. PCT hacimleri X ekseni doğrultusunda 6 mm'lik, Y ekseni doğrultusunda 5 mm'lik, Z ekseni doğrultusunda 3 mm'lik hücrelere bölünmüş ve PCT noktaları üzerinde elde edilen değerler arasında interpolasyon yapılmıştır. Böylelikle 4 adet noktadan veri alınan X doğrultusunda 51 adet, 3 adet noktadan veri alınan Y doğrultusunda 51 adet, 3 adet noktadan veri alınan Z doğrultusunda da 51 adet nokta üzerinde PCT ilişkileri oluşturulmuştur. Sonuç olarak her bir deney elemanı için sekiz adet sensörün dört adet yapay kaynağı okumasıyla toplam 64 adet 3 boyutlu hacimsel kontur haritası elde edilmiştir.



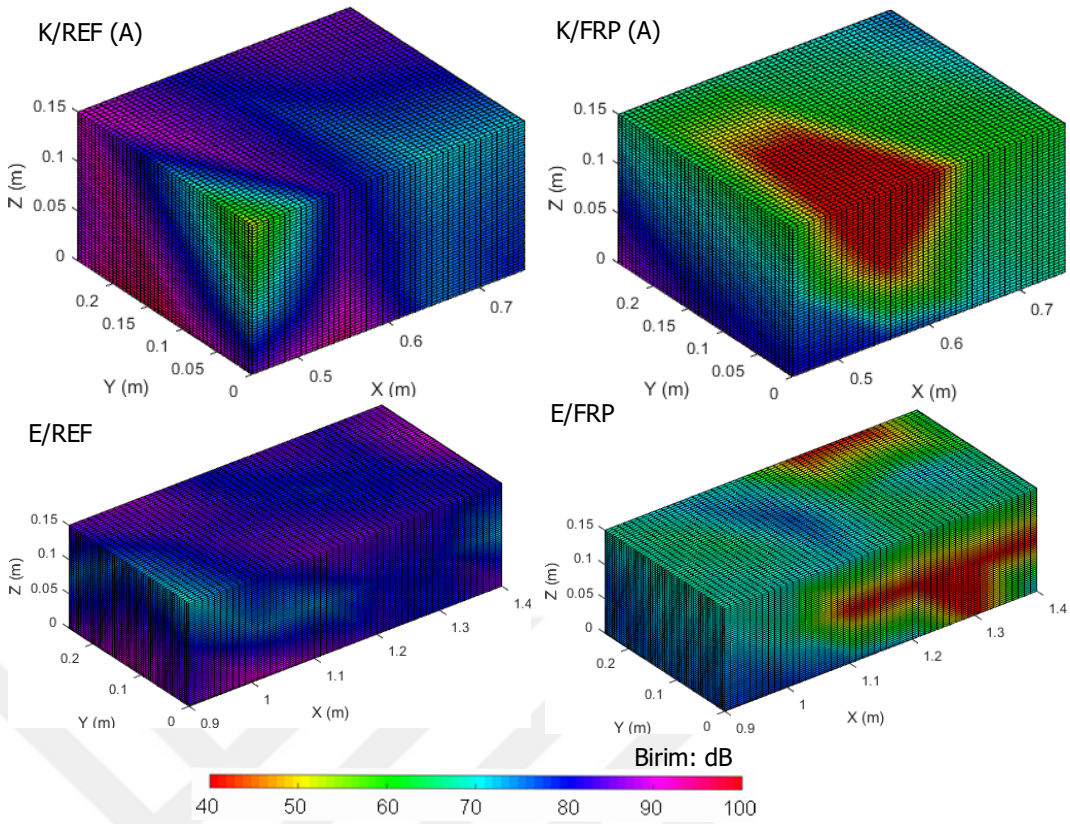
Şekil 6.26. Betonarme kirişlerde AE aktivitelerinin 3 boyutlu konumlandırma sonuçları.

Şekil 6.27'de incelenen hacimlerin heterojenliğini belirlemek üzere kullanılan kontur haritalarının dokusuna gönderilen sinyalin genliğiyle ilişkisine örnek olması için K/REF verilmiştir. Görüldüğü gibi gönderilen sinyalin genliği arttıkça haritaların renkleri de skaladaki yüksek genlik renklerine doğru ilerlemiştir. Ancak haritaların dokusu değişmemiş ve hacmin sönümleyici özellikleri tüm

haritalarda aynı davranışı göstermiştir. Örneğin, hacmin (0, 0, 0.15) noktasının çevresinin en sönümleyici bölgesi olduğu açıktır. Şekil 6.28'de betonarme kirişlerin 24V (108 dB) genlik değerine sahip yapay kaynağın A1 (kesme kirişleri) ve 1 (eğilme kirişleri) sensörleri tarafından kaydedilen değerlerini gösteren üç boyutlu kontur haritaları sunulmuştur. Her kontur haritası 40 dB ile 100 dB aralığındaki renk skalasına sahiptir. Haritalardan CFRP ile güçlendirilen kirişlerde sinyalin güçlendirilmemiş kirişlere göre daha çok sönümlendiği görülmektedir. Bu durumun sebebi sinyalin henüz gönderilirken temas ettiği CFRP tarafından sönümlenmesidir.

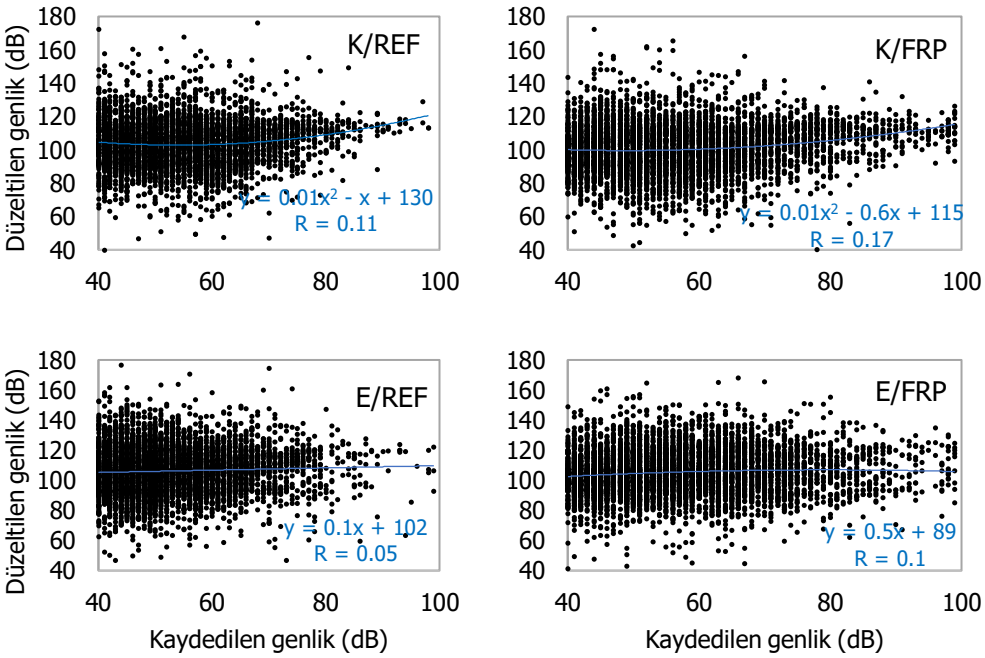


Şekil 6.27. Üç boyutlu kontur haritalarının dokusu ile gönderilen sinyalin genliği ilişkisine K/REF (1 sensörü) örneği.



Şekil 6.28. Betonarme kirişlerin 24V (108 dB) genlikli yapay kaynağı A1 ve 1 sensörü tarafından algılama düzeylerini gösteren üç boyutlu kontur haritaları.

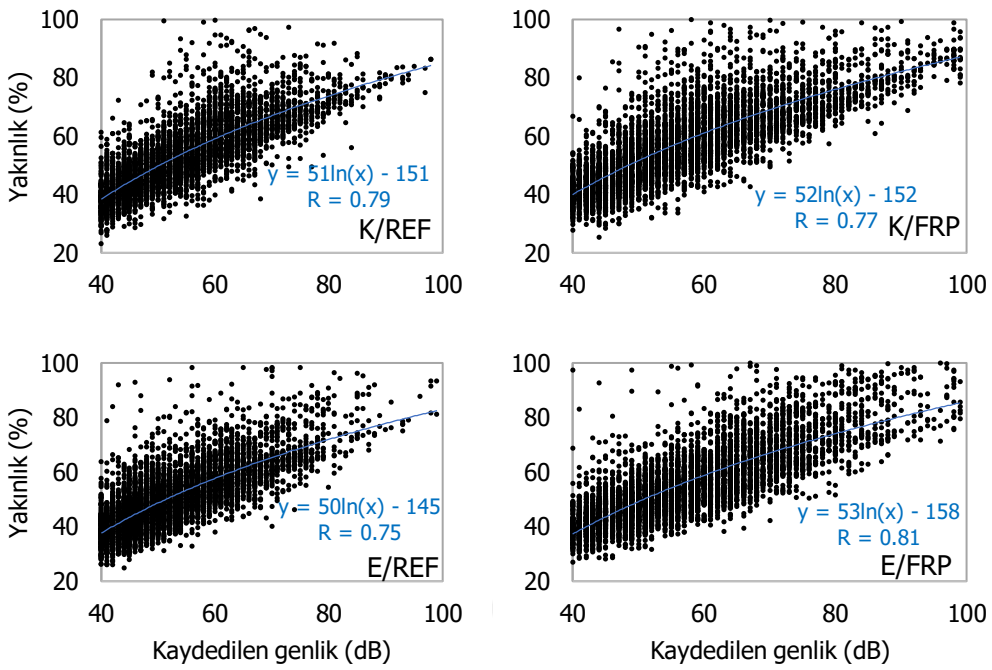
Şekil 6.29'da betonarme kirişlerde kaydedilen genlik değerlerine karşılık düzeltilen genlik değerleri verilmiştir. Regresyon analizi ile hesaplanan ve bu dağılımlara en uygun davranışı belirten ikinci derece polinom eğrileri ve denklemleri de grafikler üzerinde verilmiştir. Burada R değerlerinin standart eğilme elemanlarına göre çok düşük olduğuna dikkat edilmelidir. Bunun sebebinin çok daha büyük bir geometriye ve donatılara sahip betonarme kirişlerdeki sönümlenmelerin standart eğilme elemanlarından çok daha fazla olduğu düşünülebilir. Dağılımlardan görüldüğü üzere 40 dB (eşik değeri) civarında kaydedilen AE aktivitelerinin düzeltilen genlik değerleri farklı genlikleri kapsayan geniş bir aralıkta değişmiştir. Ancak, kaydedilen genlik değeri arttıkça bu aralık daralmıştır. Bu durum aynı sensör tarafından kaydedilen farklı genliklere sahip aktivitelerin, farklı sönümlenme faktörleri nedeniyle eşit genliğe sahip olarak algılanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, aktivitenin genliği arttıkça, parametre düzeltmesine ihtiyacı da azalmıştır.



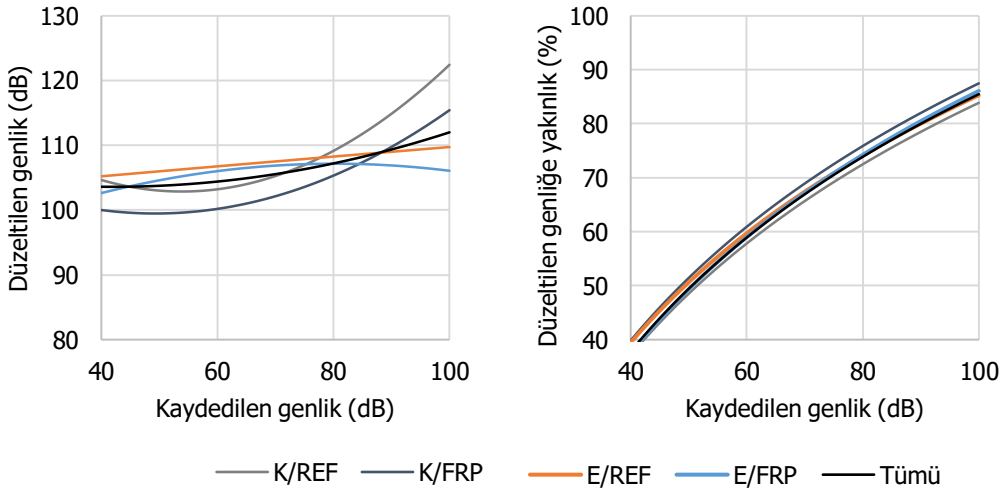
Şekil 6.29. Betonarme kirişlerde kaydedilen ve düzeltilen AE genlikleri.

Şekil 6.30 betonarme kirişlerde kaydedilen genliklerin düzeltilen genliklere yakınlıklarını göstermektedir. Regresyon analizi ile hesaplanan ve bu dağılımlara en uygun davranışı belirten logaritmik eğriler ve denklemleri de grafikler üzerinde verilmiştir. Kaydedilen genlik değeri arttıkça, düzeltilmiş genliklere olan yakınlık artmıştır. Şekil 6.31'de ise betonarme kirişlerin bu dağılımlardan elde edilen tüm eğrileri bir arada sunulmuştur. Özellikle yakınlık eğrilerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

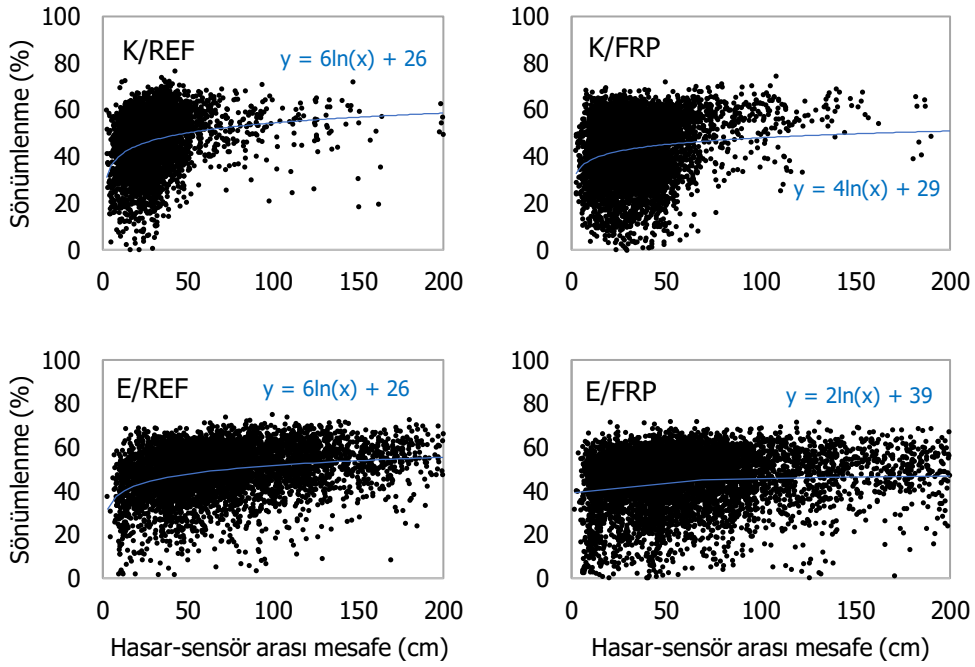
Şekil 6.32'de her AE aktivitesinin kaydedildiği sensör ile oluştuğu lokasyon arasındaki mesafeye karşılık, düzeltilen ve ham genlik değerleri ile hesaplanan sönümlenme miktarları gösterilmiştir. Ayrıca regresyon analizi ile hesaplanan ve bu dağılımlara en uygun davranışı belirten logaritmik eğriler ve denklemleri de grafikler üzerinde verilmiştir. Bu değişimler literatürde de sıklıkla karşılaşılan bir durumu göstermektedir. Hasar ile sensör arası mesafe arttıkça sinyalin daha çok bozulması, dolayısıyla sönümlenmenin artması beklenmektedir. Malzemenin heterojenliği de her lokasyonda değiştiğinden, bazı aktiviteler sensöre daha yakın olsa dahi dalga yol alırken beton içerisinde karşılaştığı farklı ortamlardan dolayı daha çok sönümlenmiştir.



Şekil 6.30. Betonarme kirişlerde kaydedilen genliklerin düzeltilen genliğe yakınlıkları.



Şekil 6.31. Betonarme kirişlerde a) kaydedilen genlik-düzeltilen genlik eğrileri, b) kaydedilen genlik-düzeltilen genliğe yakınlık eğrileri.

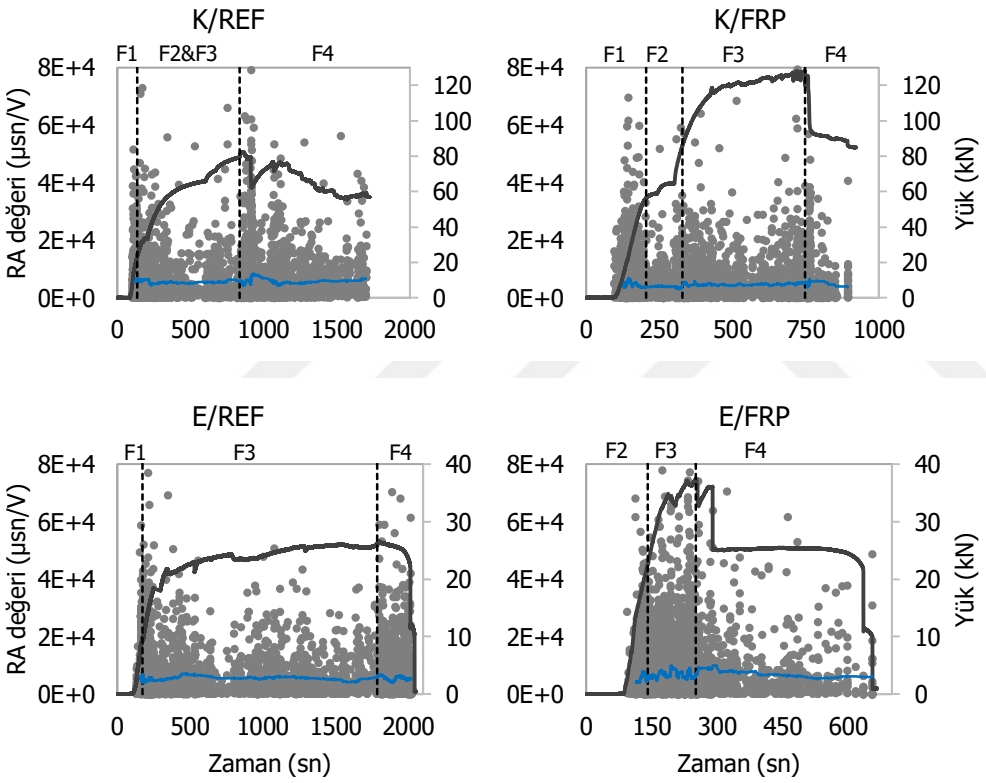


Şekil 6.32. Betonarme kirişlerde kaydedilen AE aktivitelerinin sönümlenme miktarının hasar-sensör mesafesiyle değişimi.

3D-PCT ile AE aktivitelerinin düzeltilmesinin parametre analizi ile hasar değerlendirmeye etkisi için düzeltilen RA değerleri ve hareketli ortalamaları (mavi renkli çizgiler) deneyler sırasında gözlenen mekanik bulgularla ve yukarıdaki AE bulgularıyla değerlendirilmiştir. Şekil 6.33 ve 6.34 AE aktivitelerinin sırasıyla ham ve 3D-PCT ile düzeltilmesi sonrası hesaplanan RA değerlerinin dağılımlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere düzeltilen RA değerleri ham RA değerlerinden daha düşüktür. Çünkü RA değeri genlikle ters orantılı olup,düzeltilen genlik değeri yükseldikçe RA değeri azalmaktadır. Bu durumda sönümlenme sonucu genlikleri zayıflayan aktivitelerde daha yüksek RA değeri hesaplanıp, daha fazla kesme karakteri türünde görüldüğü yanılgısını doğurduğu söylenebilmektedir. CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirilen K/FRP'de maksimum RA değerinin referansı olan K/REF'ten düşük olması daha küçük kesme özelliğine sahip aktivitelerin varlığını gösterir. Dolayısıyla gevrek kesme göçmesine katkıda bulunacak yüksek RA değerli aktivitelerin kesme özelliğinin azaltılabildiği ve kesme çatlaklarının engellendiği görülmektedir. Ham dağılımda bunun tersi bir durum söz konusu iken, düzeltilen dağılım ile bu bulguya ulaşılabilmiştir. K/REF ve K/FRP'nin ham dağılımlarında RA değerlerinin maksimum yoğunlaştığı bölge 30000 µsn/V civarıdır. Düzeltilen dağılımda ise bu değer K/REF'te 250 µsn/V'tan K/FRP'de 800 µsn/V'a yükselmiştir. K/FRP'de aktivitelerin maksimum RA değerleri azalsa da,

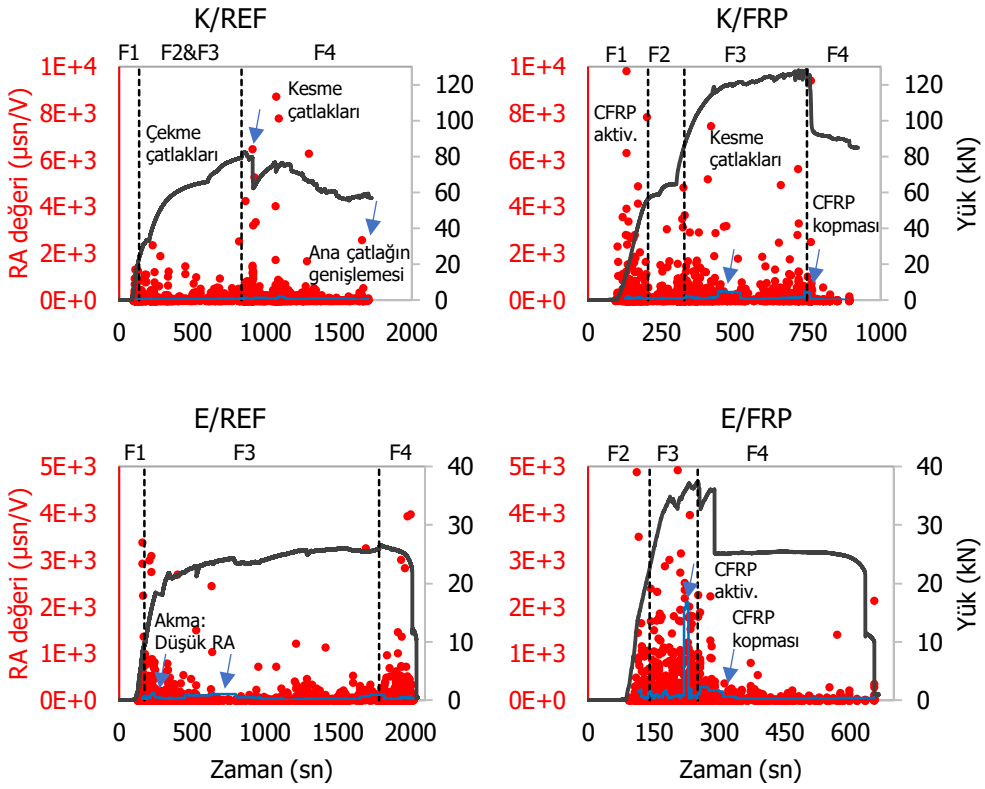
CFRP'nin varlığı ile oluşan beton yüzey ile CFRP arasındaki sıyrılma aktivitelerinin daha çok kesme türü ile karakterize olduğu belirlenmiştir (F1). K/REF'te ilk kesme çatlağının oluştuğu anda (F1-F2 arası) ham RA değeri düşük değerlerdeyken, parametre düzeltme işleminde sonra bu değer 10962 µsn/V'a yükselmiştir. Ayrıca ham dağılımda bu olaydan daha yüksek RA değerine sahip olaylar da gözlenmişken, düzeltme sonrası en yüksek RA değerinin kesme çatlağının oluştuğu anda (F2-F4 arası) gözlenmesi kesme çatlağının AE sinyal özelliği açısından uyumludur. F4 fazında yükleme ilerledikçe ve büyük kesme çatlakları meydana geldikçe RA değerleri de artmıştır. K/FRP'nin ham RA değeri dağılımının F1 fazında gözlenen çekme çatlağı aktiviteleri için RA değerleri CFRP aktivitelerinden daha yüksek iken, parametre düzeltme sonrası bu değer yine AE sinyal özelliği ile uyumlu şekilde düşmüştür. Benzer şekilde, CFRP aktiviteleri ve CFRP'nin ayrılması nedeniyle çıtırtı seslerinin duyulduğu F3 ve F4 fazlarında hareketli ortalama hattında parametre düzeltme prosedüründen sonra ani artışlar gözlemlenmiştir. Kısaca, deney sırasında hasarların gözlendiği anlarda parametre düzeltmesinden sonra bu bulgularda uyumlu RA değerleri elde edilmiştir. E/REF'in ham dağılımında maksimum 8000 µsn/V RA değerli aktivite gözlenirken CFRP ile eğilmeye karşı güçlendirilmiş E/FRP'de bu değer 140000 µsn/V'dur. Düzeltilen dağılımda ise bu değer K/REF için 20000 µsn/V, K/FRP için ise 50000 µsn/V olarak hesaplanmıştır. CFRP ile eğilmeye karşı güçlendirilen E/FRP'de maksimum RA değerinin E/REF'ten yüksek olması eğilme dayanımının artmasıyla kirişte kesme hasarlarının ortaya çıktığını göstermektedir. Yoğunlaşılan bölgenin maksimum değerinde ise K/REF ve K/FPR'deki durumun benzerine rastlanmaktadır. E/REF ve E/FRP'nin ham dağılımlarında RA değerlerinin maksimum yoğunlaştığı bölge 30000 µsn/V ve 50000 µsn/V civarıdır. Düzeltilen dağılımda ise bu değer E/REF'te 400 µsn/V'tan E/FRP'de 600 µsn/V'a yükselmiştir. E/FRP'de CFRP'nin varlığı ile oluşan beton yüzey ile CFRP arasındaki sıyrılma aktivitelerinin daha çok kesme türü ile karakterize olduğu belirlenmiştir. E/REF'in ham RA değeri dağılımında boyuna donatının akma anında maksimum değer gözlenirken; düzeltilmiş RA değeri dağılımında bu değer minimum değere düşmüştür ve bu durum çekme gerilmesinin sebep olduğu bir hasar türünden beklenen AE davranışıyla uyumludur. Ayrıca, E/FRP'nin ham RA değeri dağılımında yüksek değerler, sadece beton çatlama aktivitelerinin aktif olduğu pik sonrası F4 fazında ortaya çıkarken; düzeltilmiş RA değeri

dağılımlarında bu değerler yine çekme özelliği gösteren aktivitelerin düşük RA değerine sahip olması durumuyla uyumlu bir değişiklik göstermiştir. Bu nedenle, pik öncesi F3 fazındaki CFRP aktivitelerinin daha yüksek RA değerleri, parametre düzeltmeden sonra ön plana çıkartılabilmiştir. Ayrıca, CFRP'nin ayrışması anında (F3-F4 arası) düzeltilmiş RA değeri dağılımında hareketli ortalamada ham dağılımdan farklı olarak ani bir sıçrama gerçekleşmiştir. Böylece, parametre düzeltme prosedüründen sonra büyük bir kesme tipi aktivite elde edilmiştir. Boyuna donatının koparak kirişin göçtüğü anda da daha çekme hasarına uyumlu şekilde düşük RA değeri gözlenmiştir.



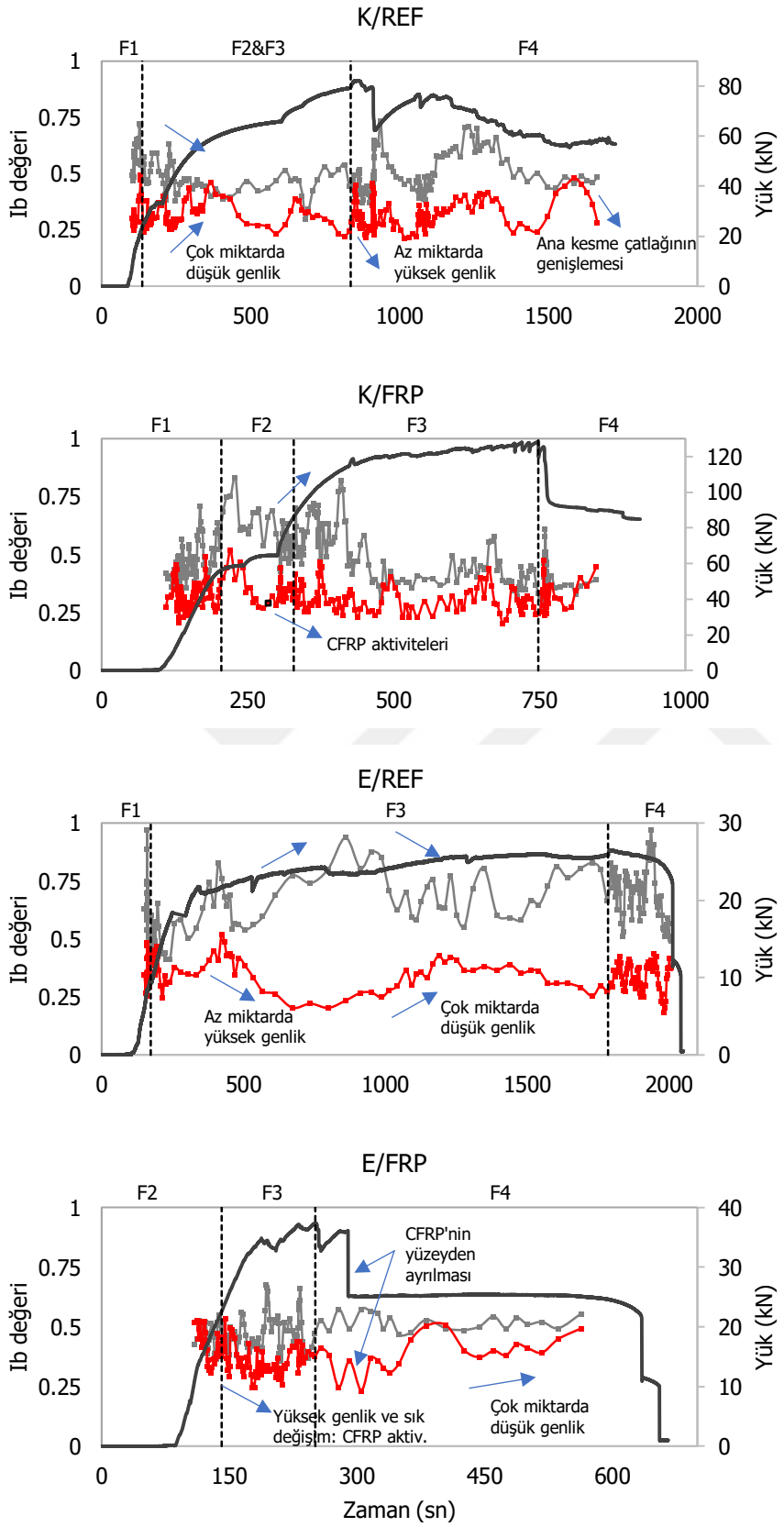
Şekil 6.33. Betonarme kirişlerde AE aktivitelerinin ham RA değerleri.

3D-PCT ile düzeltilen genlik parametreleri, hasar oluşumlarının ve ölçeklerinin değerlendirilmesinde kullanılan *I*b değeri sonuçlarını da doğrudan etkileyecektir. Şekil 6.35'te görüldüğü üzere, parametre düzeltme prosedüründen sonra *I*b değerleri azalmıştır. Tüm kirişlerde genel olarak deney sırasında gözlenen mekanik bulgulara ve aktivite türlerine uygun olarak *I*b değeri hattının davranışı da değişmiştir. Ayrıca bazı hasar anlarında şu değişiklikler elde edilmiştir:



Şekil 6.34. Betonarme kirişlerde AE aktivitelerinin düzeltilen RA değerleri.

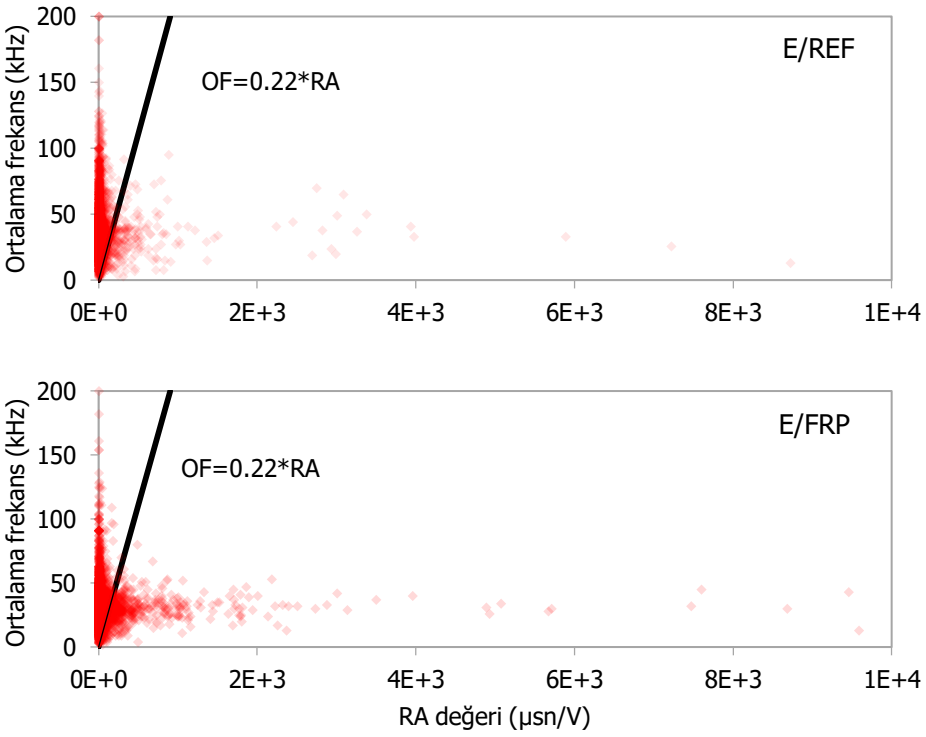
K/REF'te F1 fazının tamamında ve F2 fazının ortalarına kadar kiriş yük taşımaya devam etmektedir ve hasar oluşumu düşüktür. Bu durumda düşük genlikli aktivitelerin beklenmesi normaldir. Ancak bu davranış ham verilerin *I*b değeri değişiminde düşüş eğilimi gösterirken, düzeltilmiş genlik değerleri bu davranışı değiştirmiştir ve yükselen *I*b değeri davranışı, düşük genlikli AE davranışıyla uyumlu olmuştur. Benzer şekilde deney sonunda ana kesme çatlağının genişlediği anda daha büyük genlikli hasarların meydana getireceği *I*b değerinde düşüş eğilimi; ham davranışta değil, parametre düzeltme işlemi sonrasında elde edilmiştir. K/FRP'de kiriş F2 fazında sabit yük taşıyabiliyorken, buna uygun yüksek genlikli aktivitelerin oluşturacağı düşük *I*b değeri eğilimi, parametre düzeltme işlemi sonrasında elde edilmiştir. E/REF'te F3'ün 500-1000 sn. arasında ham *I*b değeri davranışı yükselme eğilimi gösterirken, düzeltilmiş genlik değerleri bu davranışı değiştirmiştir. Tersi durum ise F3'ün ikinci yarısında gözlenmiştir. Son olarak, kırılma anında da düzeltilmiş genlik değerleri daha düşük *I*b değerleri vermiş ve kırılma anına uygun büyük ölçekli hasarı tanımlayabilmiştir. E/FRP'de düzeltilmiş veriler için F3 fazının sonlandığı 250. saniyede ve 290. saniyede *I*b değeri davranışında ham dağılımın aksine azalma olmuştur. Bu değişiklikler, CFRP'nin



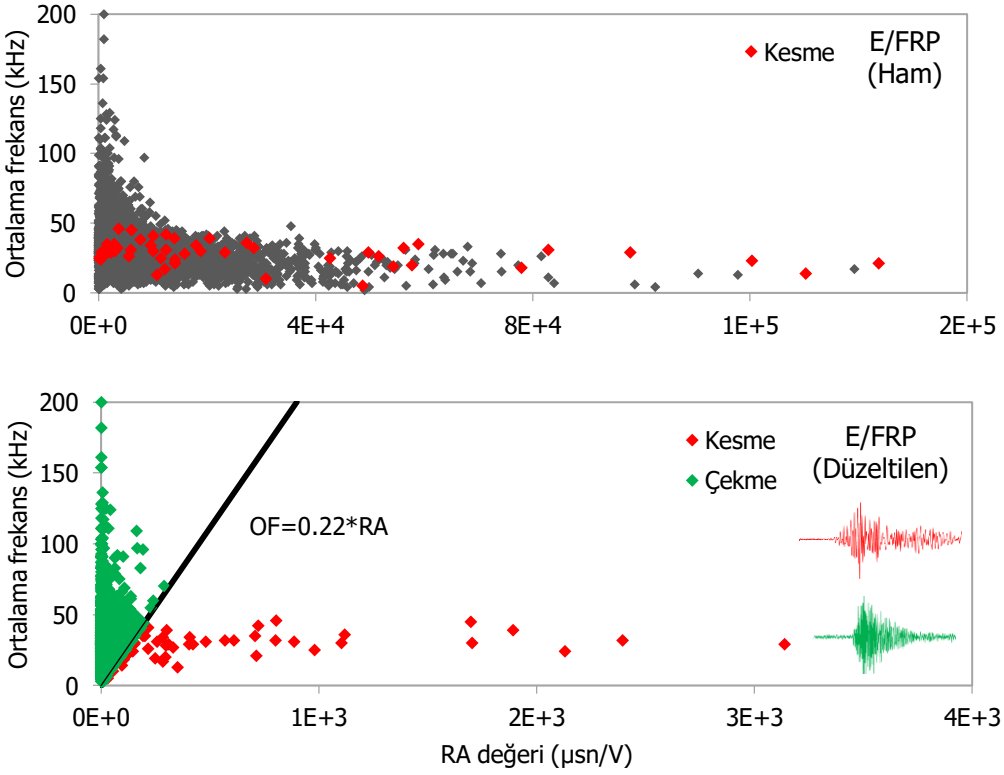
Şekil 6.35. Betonarme kirişlerin AE aktivitelerinin ham ve düzeltilen *I*b değerleri.

beton yüzeyden ayrılma gözlemiyle uyumludur. Böylece, düzeltilmiş parametreler CFRP mekanizmalarıyla ilgili daha fazla ve yeni bilgiler göstermiştir. Bahsedilen bu hasarlar, düzeltilmiş genlik verilerinin *I*b değeri değişimlerinin değerlendirilmesiyle sağlanabilmiştir.

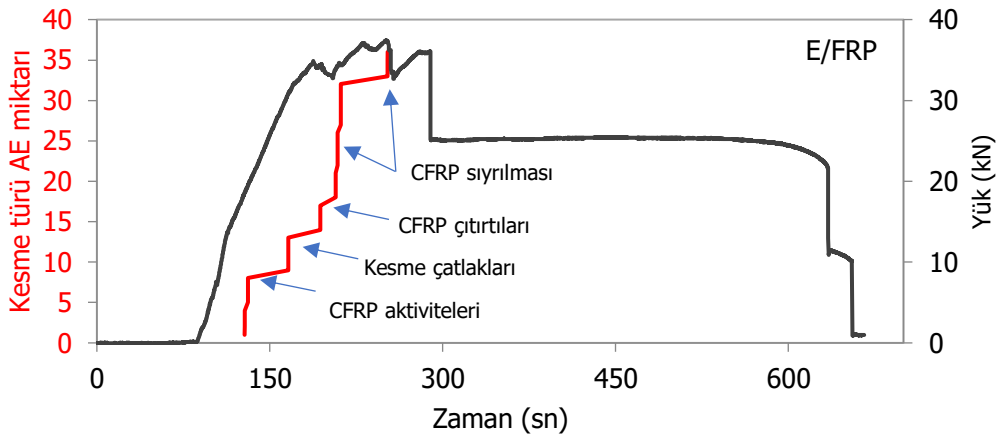
Hasar türü belirlemede kullanılan RA değeri ve ortalama frekans ilişkileri E/REF ve E/FRP için incelenmiştir. Çünkü kesme davranışı incelenen K/REF ve güçlendirilmiş hali olan K/FRP'de kesme aktiviteleri hem betonda oluşan kesme çatlaklarından hem de CFRP aktivitelerinden oluşmaktadır. Bu sebeple kesme kirişlerinde gözlenmeyen bir durum eğilme kirişlerinde gözlenmiştir: Şekil 6.36'da E/REF ve E/FRP'nin düzeltilen RA değeri ve ortalama frekans ilişkileri verilmiştir. Burada bu ilişkilerin bir doğru ile ayrılmış şekilde sıralandığı görülmektedir. Bundan yola çıkarak aktiviteler arası ayrım yapmak istenirse, çekme çatlaklarının bulunduğu yoğun renkli bölgenin E/REF'te OF(kHz)=0.22*RA(μsn/V) denklemiyle ayrıldığı belirlenmiştir. Diğer bir deyişle bu doğrunun altında kalan aktiviteler kesme türünü, üzerinde kalan aktiviteler ise çekme türünü belirtecektir. E/REF'in aktiviteleri bu doğruya göre sınıflandırıldığında, doğrunun altında kalan ve kesme türü ile nitelendirilebilecek olan aktivitelerin AE olayı oluşturmadıkları görülmüştür. Bunun için bir AE olayını oluşturmak için gerekli minimum vuruş sayısı olan dört vuruş aranmıştır. Aynı doğru ile sınıflandırma E/FRP'nin AE aktivitelerine uygulandığında ise doğru altında kalan aktivitelerin AE olayları oluşturduğu görülmüştür. Bu sebeple bu aktiviteler kesme olayları olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.37). Belirlenen bu AE olaylarının oluşma zamanları belirlendiğinde ise Şekil 6.38'de verilen ve kesme türü ile karakterize olan mekanizmalara tekabül ettiği görülmüştür.



Şekil 6.36. E/REF ve E/FRP'nin düzeltilen RA değeri ve ortalama frekans ilişkileri.



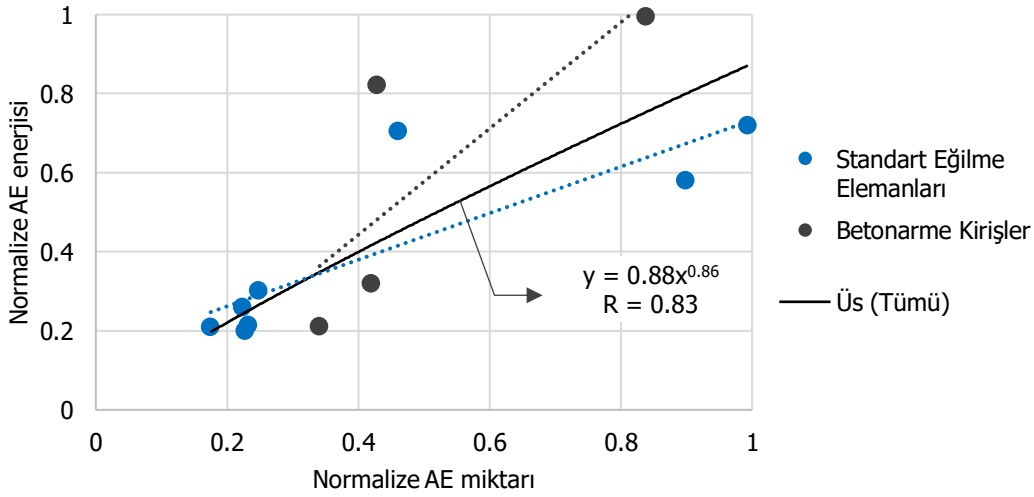
Şekil 6.37. E/FRP'deki ayrılan kesme aktivitelerinin ham ve düzeltilen RA değeri ve ortalama frekans ilişkisinde durumları.



Şekil 6.38. E/FRP'nin 3D-PCT ile elde edilen kesme aktivitelerinin oluşumları.

6.3. Ortak Bulgular ve Genel Değerlendirme

Şekil 6.39'da tüm deney elemanlarının AE aktivitelerinin normalize miktarları ve enerjileri arasındaki ilişkiler regresyon doğruları ve denklemleriyle verilmiştir. Soldaki grafikte numuneler türlerine göre, sağdaki grafikte ise bir arada verilmiştir. Standart eğilme elemanlarında betonarme kirişlere göre daha güçlü bir ilişki elde edilmiş, tüm veriler değerlendirildiğinde ise normalize AE miktarı ve enerjisi arasındaki ilişki R değeri 0.83 olan 6.3 numaralı aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

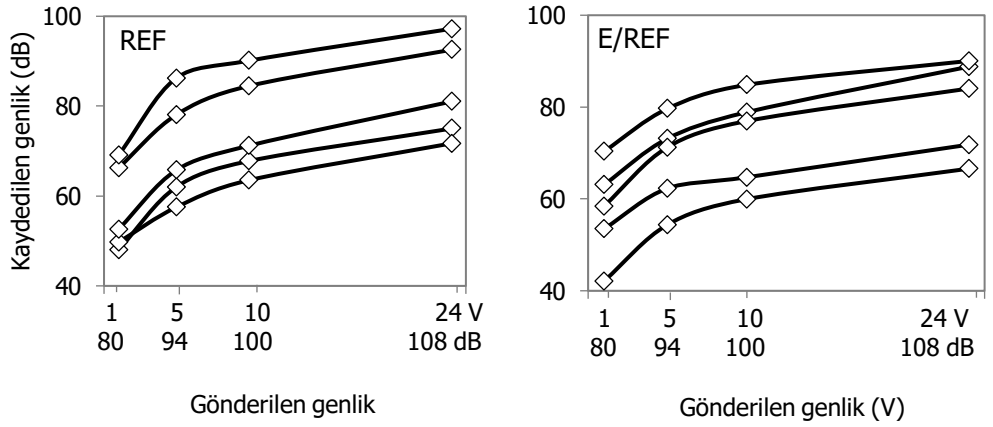


Şekil 6.39. Normalize AE miktarı ve enerjileri arasındaki ilişki.

$$E=0.88*N^{0.86} \quad (6.3)$$

Burada E, AE'nin normalize enerjisini; N ise normalize AE miktarını belirtmektedir.

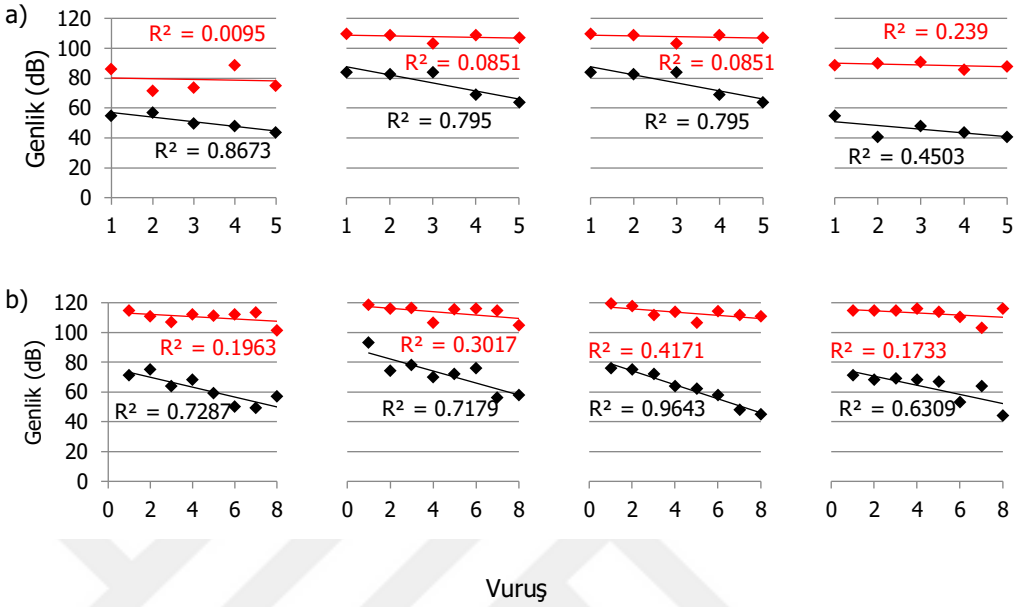
Tüm AE vuruşlarının ilgili sensörlerine ait gönderilen genlik değeri ile kaydedilen genlik değeri arasındaki ilişkilere örnek olmak üzere REF standart eğilme elemanı ve E/REF betonarme kirişte örnek yapay kaynaklar Şekil 6.40'da verilmiştir. Burada gösterilen çizgiler 3D-PCT deneyleri boyunca farklı lokasyonlarda gönderilen sinyallerin kaydedilen genlik değerlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi, gönderilen sinyal sensör tarafından eşit genlik değerinde algılanmamakta, sinyalin sönümlenmesi sebebiyle kaydedilen genlik değerleri gönderilen genlik değerlerinden düşük olmaktadır. Ayrıca gönderilen sinyalin genliği arttıkça (1V'dan 24 V'a doğru) sensör tarafından kaydedilen sinyalin genliği de yükseltmektedir. Siynalin gönderildiği ve kaydedildiği lokasyonların farklı olması dolayısıyla, gönderilen sinyaller her hatta farklı içerikli karşılaşarak sönümlendiği için de, oluşturulan eğriler her yapay kaynak için farklı bir eğilim göstermektedir.



Şekil 6.40. 3D-PCT deneylerinde gönderilen sinyallerin kaydedilen genlik değerlerine örnekler.

Şekil 6.41'de eğilme deneyleri sırasında sensörler tarafından algılanan bazı AE aktivitelerinin ham ve 3D-PCT analizi sonrası düzeltilen genlik değerleri sunulmuştur. Grafiklerin yatay eksenleri vuruşun kaydedilme sırasını göstermektedir. Görüldüğü üzere düzeltilen tüm genlik değerleri ham genlik değerlerinden yüksektir. Parametre düzeltme işlemi sonrası ise farklı sensörler tarafından farklı sönümlenme oranlarında kaydedilmelerine rağmen, vuruşlara ait genlik değerleri birbirlerine büyük ölçüde yaklaşmışlardır. Tüm düzeltilen genlik değerleri arasından geçirilen doğrular ise sürekli artan veya sürekli azalan bir ilişkiyi temsil etmemiş, düzeltilen değerlere ait doğruların R^2 değerleri ham değerleri temsil eden doğrulara ait R^2 değerlerinden çok daha düşük seviyelere

indirilmiştir. Örneğin, betonarme kirişlerde (b) ilk sekiz vuruş ile belirtilen AE olayının ham genlikleri değerlendirildiğinde, olayın genliği maksimum değer olan 71 dB olarak tahmin edilebilecek iken, düzeltme sonrası genlik değerinin ortalama 112 dB olduğu tahmin edilebilmektedir.



Şekil 6.41. AE olaylarında genliklerin düzeltilmesine örnekler: a) standart eğilme elemanları, b) betonarme kirişler (♦ ham, ♦ düzeltilen).

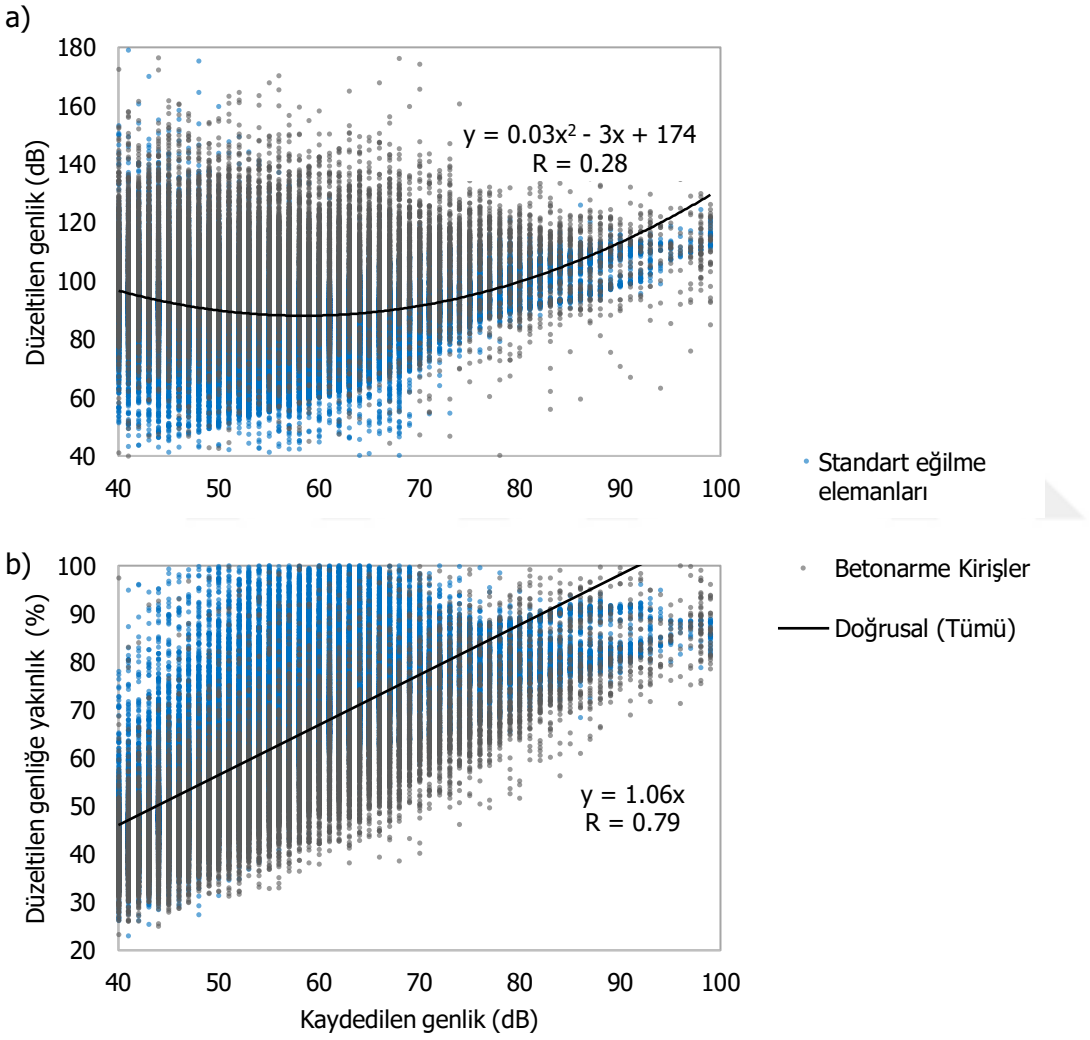
Şekil 6.42'de tüm AE aktivitelerinin kaydedilen genlik değerlerinin 3D-PCT ile düzeltilen düzeltilen genlik değerleri ve bunlara yakınlıklarının ilişkileri verilmiştir. Regresyon analizi ile hesaplanan ve bu dağılımlara en uygun davranışı belirten denklemler de grafikler üzerinde verilmiştir. Şekil 6.42.a'dan görüldüğü üzere 40 dB (eşik değeri) civarında kaydedilen AE aktivitelerinin düzeltilen genlik değerleri farklı genlikleri kapsayan geniş bir aralıkta değişmiştir. Ancak, kaydedilen genlik değeri arttıkça bu aralık daralmıştır. Bu durum aynı sensör tarafından kaydedilen farklı genliklere sahip aktivitelerin, farklı sönümlenme faktörleri nedeniyle eşit genliğe sahip olarak algılanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, aktivitenin genliği arttıkça, parametre düzeltmesine ihtiyacı da azalmıştır. Ancak tüm davranışı en iyi gösteren ikinci dereceden polinom eğrisinin (Eşitlik 6.4) 60 dB'den düşük değerlerinde düzeltilen genlik değerleri de benzer sebeplerle daha yüksek bulunmuştur. Şekil 6.42.b'de ise dağılımı en iyi gösteren doğru denklemine (Eşitlik 6.5) göre kaydedilen genlik değerinin artmasıyla, düzeltilen genlik değerlerine olan yakınlığın arttığı görülmektedir. Bunlara göre sinyal genliğinin sönümlenmesi ortamın heterojenliği ve belirli lokasyondaki sönümleyiciliğe bağlı

olmakla beraber, kaydedilen genliklerin ve düzeltilen genlik değerleri ve bu değerlere yakınlıklarını temsil eden ilişkiler için aşağıdaki denklemler hesaplanmıştır:

$$G_d = 0.03*G_k^2 - 3*G_k + 174 \quad (6.4)$$

$$Y=1.06*G_k \quad (6.5)$$

Burada G_d, dB cinsinden düzeltilen genlik; G_k dB cinsinden kaydedilen genliği; Y ise yakınlığı (%) belirtmektedir.

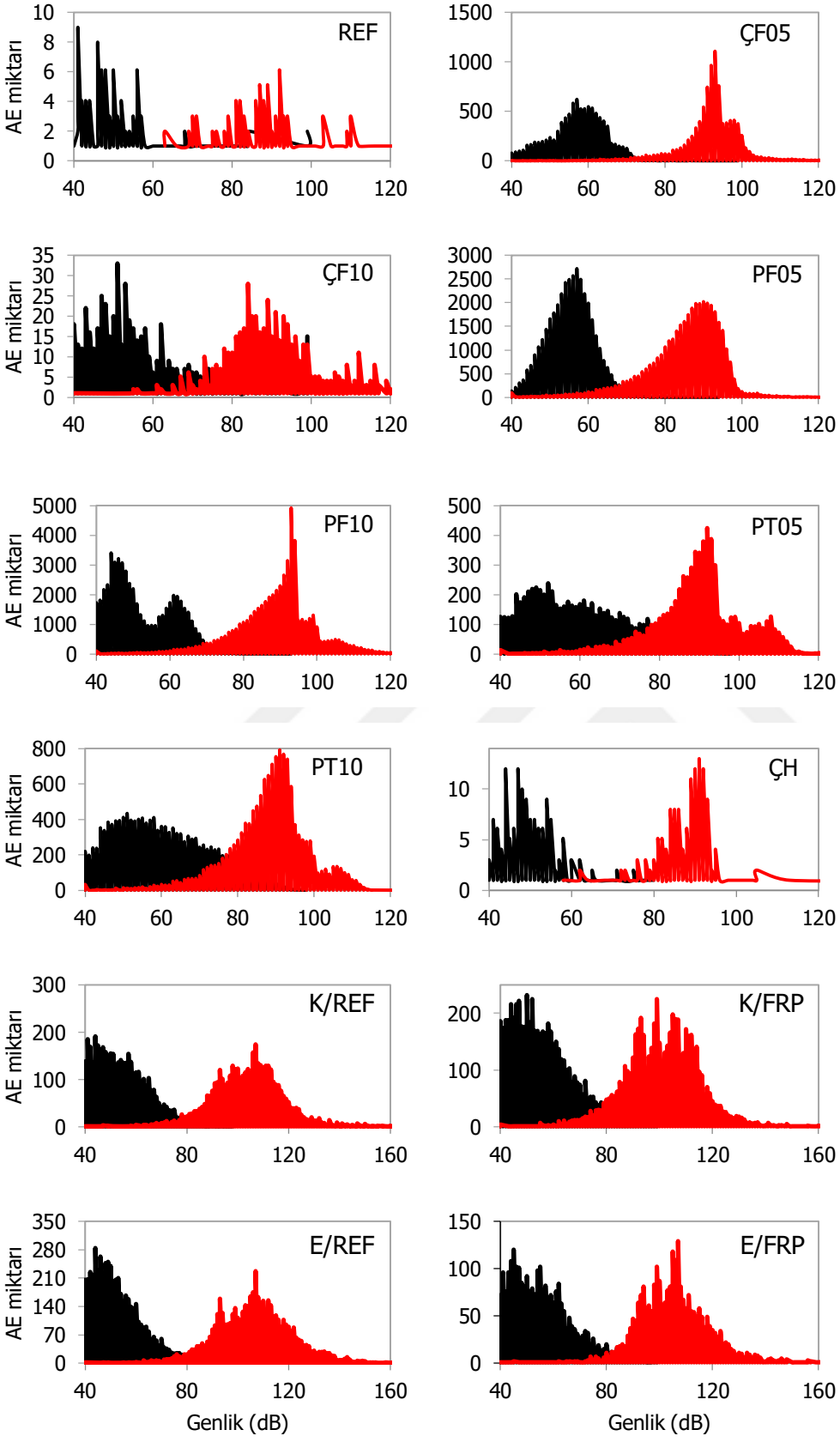


Şekil 6.42. AE aktivitelerinin kaydedilen genlik değerlerinin a) düzeltilen genlikle, b) düzeltilen genliğe yakınlığıyla ilişkisi.

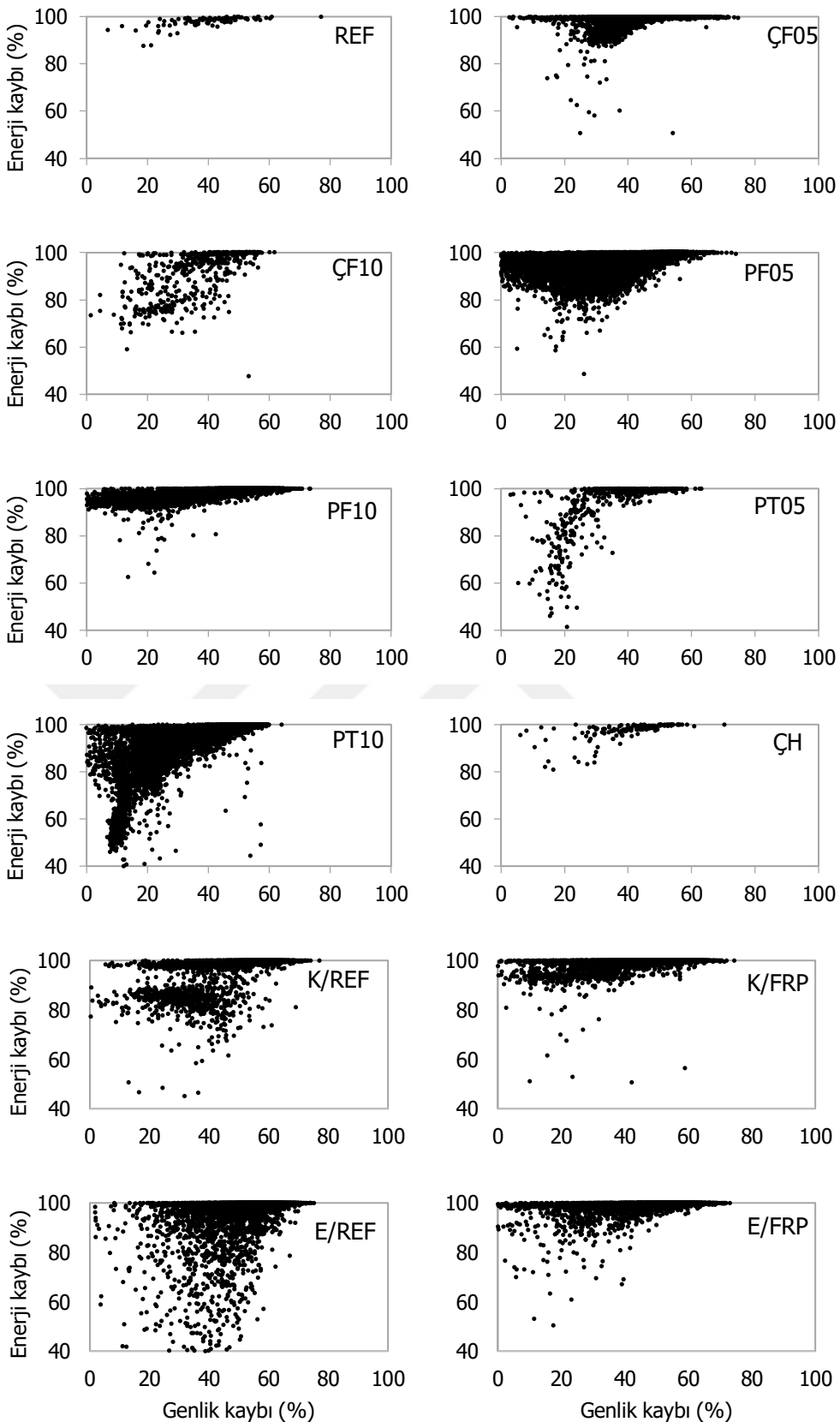
Şekil 6.43'te ham ve düzeltilen genlik değerlerine göre AE aktivitelerinin miktarları verilmiştir. Ham dağılımda 40-90 dB aralığındaki aktivitelerin miktarı ortalama %95, 90-99 dB aralığındaki aktivitelerin miktarı ise %5'dir. Düzeltilen genlik dağılımda ise bu miktarlar tüm elemanlarda farklı olmak üzere ortalama %70

ve %30'a gerilemiştir. Ayrıca parametre düzeltme sonrası 99 dB'den yüksek genlikler de elde edilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere her iki dağılım da Gauss davranışı sergilemektedir. Bu davranış tüm numunelerde elde edilmiştir. Aktivitelerin çok büyük miktarını kapsayan 40-90 dB aralığında genlik değerlerine sahipmiş gibi görünen aktivitelerin gerçek genlik değerleri 3D-PCT ile parametre düzeltme sonrası ayrıştırılabilmiştir.

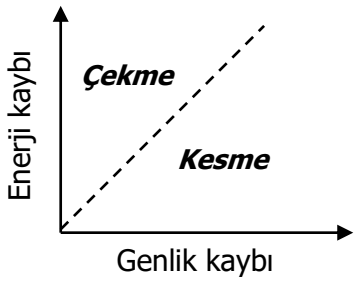
Şekil 6.44 AE aktivitelerinin genlik kayıplarına karşılık enerji kayıplarını göstermektedir. Görüldüğü üzere AE sinyalleri genliklerini maksimum %70-%80 oranlarında, enerjilerini ise en az %60 oranında kaybetmişlerdir. Bu durum sönümlenme etkisiyle enerjinin genliğe göre daha çok bozulan bir AE parametresi olduğunu göstermektedir. Bu durum sebebi dalga sönümlendikçe eşik değerini geçen sayı miktarının ve sinyal süresinin azalması, buna bağlı olarak enerjinin düşmesidir. Enerjilerinin tamamını kaybeden ve yaklaşık %100 enerji kaybı seviyesinde sıralanan aktivitelerin genlik kayıplarına bakarak şu değerlendirmede bulunulabilir: Aynı oranda enerji kaybeden aktiviteler arasında, genlik kaybı düşük seviyelerde seyreden aktiviteler daha çok süre kaybetmiştir. Genlik kaybı yüksek seviyelerde seyreden aktivitelerin ise yine aynı miktarda enerji kaybetmesi, daha düşük süre kaybına uğradığını göstermektedir. Buna göre eşit enerji kaybı altında genlik kaybı az olan aktivitelerin daha çok çekme, genlik kaybı çok olan aktivitelerin ise daha çok kesme ile karakterize olduğu sonucuna varılabilmektedir. Aynı oranda genlik kaybeden aktiviteler arasında ise, enerji kaybı yüksek seviyelerde seyreden aktiviteler daha çok süre kaybetmiştir. Enerji kaybı düşük seviyelerde seyreden aktivitelerin ise yine aynı miktarda genlik kaybetmesi, daha düşük süre kaybına uğradığını göstermektedir. Buna göre eşit genlik kaybında enerji kaybı çok olan aktiviteler daha çok çekme, enerji kaybı daha az olan aktiviteler ise daha çok kesme türü olarak nitelendirilebilir. Tüm bu yorumlar ışığında elastik dalganın sönümlenmesi sebebiyle sinyaldeki genlik ve enerji kayıpları ile hasarın türü ilişkisi için Şekil 6.45'te verilen çıkarım önerilmektedir.



Şekil 6.43. AE aktivitelerinin miktarları (- ham, - düzeltilen).



Şekil 6.44. AE aktivitelerinin genlik ve enerji kayıpları.



Şekil 6.45. 3D-PCT sonuçlarına göre önerilen çıkarım: sönümlenme sebebiyle AE sinyalindeki genlik ve enerji kayıpları ile hasar türü ilişkisi.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez ile akustik emisyon (AE) tekniği ile betonda hasar tespitinde betonun heterojen yapısından kaynaklanan sorunlardan doğan tespit hatalarının düzeltilmesi için 3 boyutlu Parametre Düzeltme Tekniği (3D-PCT) geliştirilmiştir. 3 boyutlu uzayda AE için Parametre Düzeltme Tekniği'nin geliştirilmesi, beton ve betonarme elemanlarda daha etkili bir hasar değerlendirmesi için yeni bir yaklaşımdır. Ayrıca tekniğin beton ve betonarme elemanlar üzerinde ilk uygulamaları eğilme davranışları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan, literatürde yer alan hasar konumlandırma yöntemleri için de betonun heterojenliğinin göz önünde bulundurulduğu bir iyileştirme bu tez çalışması ile ilk kez yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve sonraki çalışmalar için yapılan öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Beton kirişler üzerinde mekanik davranışlarının incelenmesi üzerine yürütülen çalışmalarda beton karışıma fiber katılması ile betonunun eğilme altındaki tokluk özelliklerinin iyileştiği görülmüştür: 10 mm deplasman seviyesine kadar %0.5 ve %1.0 hacimsel oranlarda çelik fiberin varlığı ile sırasıyla %513 ve %1017, %0.5 ve %1.0 hacimsel oranlarda mikro sentetik fiberin varlığı ile sırasıyla %29 ve %136; 0.5 ve %1.0 hacimsel oranlarda makro sentetik fiberin varlığı ile sırasıyla %247 ve %265 artmıştır. Yük taşıma kapasitesinden sadece %1 kayıp vererek mekanik anlamda en verimli davranış %1.0 oranında çelik fiber kullanımıyla sağlanmıştır. Bunu takiben yük taşıma kapasitesini %5 artırarak ve rijitlik ve tokluk değerlerini yükselterek %1.0 oranında makro sentetik fiber kullanımıyla önemli bir katkı elde edilmiştir.
- Fiber katkılı tüm numunelerde düz beton ve çimento harcı numunelere göre AE aktivitelerinin miktarı artmış, ani hasar oluşumları engellenmiş ve yük düşüşü anlarında dahi salınan AE miktarları ve enerjileri düşmüştür. Ancak bu numunelerde (özellikle çelik fiberli numunelerde) maksimum yüke kadar F1 fazında AE miktarı ve enerjisi azalmıştır. En fazla AE aktivitesi mikro sentetik fiberli numunelerde, daha sonra makro sentetik fiberli numunelerde ve son olarak çelik fiberli numunelerde gözlenmiştir. Çelik fiberler sentetik fiberler kadar hasar görmeyerek daha büyük hasar enerjisi salınımını engellemiş ve hamurda oluşan çatlaklar daha küçük enerjiler açığa çıkararak yavaş yavaş ilerlemiştir. Makro sentetik fiberler ise hasara uğradıklarında mikro sentetik fiberlere göre daha büyük

enerji açığa çıkarmışlardır. AE aktivitelerinin frekansa dayalı örüntü tanıma ile kümelendirilmesi ile fiber katkılı numunelerde beton ve çimento harcı numunelerinden farklı olarak fiber aktivitelerini belirten 200 kHz'den yüksek bir frekans aralığı daha elde edilmiştir. Bu aktivitelerin tamamı fiberlerin çalıştığı F2 ve F3 fazlarında gözlenmiştir. Yukarıda belirtilen sebeplerle fiber miktarlarının artmasıyla fiber aktivitelerini tanımlayan kümedeki aktivite miktarı da artmıştır.

- Betonarme kirişler üzerinde mekanik davranışlarının incelenmesi üzerine yürütülen çalışmalarda kesme yetersizliğine sahip kirişin U şeklinde CFRP şeritlerle güçlendirilmesi ile kesme göçmesinin eğilme göçmesine döndüğü ve maksimum yük ve enerji yutma kapasitesinin sırayla %60 ve %340 arttığı görülmüştür. Eğilme yetersizliğine sahip kirişin eğilme bölgesinden CFRP ile güçlendirilmesi ile yük taşıma kapasitesinde %41 artış sağlanmıştır. Ancak, gevrek bir malzeme olan epoksiyle yapıştırılmış CFRP malzemenin aniden yüzeyden ayrılmasıyla betonarme kirişte daha gevrek ve ani bir güç tükenmesi ortaya çıkması sonucu enerji yutma kapasitesi %9 oranında azalmıştır.
- CFRP ile güçlendirilen kirişlerde beton çatlama aktivitelerinin yanı sıra çatlak oluşumlarını engelleyen şeritlerdeki fiberlerin aktiviteleri sebebiyle AE miktarı artmıştır. Hasar fazlarına göre yapılan AE analizi ile güçlendirme türünün (kesme veya eğilmeye karşı) ilgili fazlardaki çatlak miktarlarını azaltıp, diğer fazlara ait çatlak türlerine döndürdüğünü göstermiştir. Ayrıca kirişi göçmeye götürecek ani ve büyük enerjili hasarların daha erken yük seviyelerinde daha küçük enerjilerle atıldığı belirlenmiştir.
- Literatürdeki sabit dalga hızı kabulü yapan yöntemlerden farklı olarak, betonun heterojen yapısını göz önünde bulunduran ve her sensör ve kaynak arasındaki yörüngede yeni bir dalga hızı hesaplayan kaynak konumlandırma algoritması geliştirilmiş ve gözle görünür çatlaklarla daha uyumlu hasar haritaları elde edilmiştir.
- 3 boyutlu hacimsel kontur haritaları, betonun son derece sönümleyici bir malzeme olduğunu göstermiş ve elemanların sönümleyici özelliklerini belirlemede kullanılmışlardır. Bu nedenle, farklı genliklere sahip AE aktivitelerinin genlik değerlerinin aynı sensör tarafından eşit olarak algılanabileceği görülmüştür.
- AE aktiviteleri üzerindeki elastik dalganın sönümlenme etkilerinin ortadan kaldırılması için sinyalin düzeltilmesiyle; genlik, RA değeri, enerji ve Ib değeri

parametreleri de düzeltilmiştir. Böylece farklı sensörler tarafından kaydedilen aynı AE olayına ait genlik değerleri birbirlerine yaklaştırılmıştır.

- Farklı genlik değerlerindeki AE aktivitelerinin dağılımları Gauss davranışı sergilemektedir. Bu nedenle, beton kırılmasında daha yüksek genliğe sahip aktiviteler baskındır.
- Kaydedilen genlik değerinin yükselmesiyle düzeltilen değere yakınlığın arttığı ve düzeltmeye duyulan ihtiyacın azaldığı ortaya konmuştur. Düşük genlikli aktivitelerin doğru tespiti için ise parametre düzeltmesi etkilidir. Çelik fiberin varlığı bu değerler arasındaki yakınlık seviyesini düşürürken, mikro sentetik ve makro sentetik fiberlerin varlığı bunu artırmıştır. Çimento harcında kaydedilen gerçek genlik değerleri, iri agregaların varlığından dolayı daha sönümleyici olan referans beton numuneye kıyasla kaydedilen değerlere daha yakın olmuştur.
- Beton çatlağı, donatı akması, fiber kopması ve CFRP aktiviteleri gibi kritik mekanizmalar, parametre düzeltmesinden sonra yeniden hesaplanarak daha net olarak ayırt edilmiştir.
- Bozulan aktivite sinyallerinin daha fazla kesme karakterine sahip olduğu yanılgısının oluştuğu ortaya konmuştur.
- Aktivitelerin düzeltilen RA değerleri ham dağılımlarda görülmeyen ve mekanik bulgularla ve sinyal frekanslarıyla daha uyumlu davranışlar göstermiştir: Hasar türü değerlemede kullanılan RA değeri ve ortalama frekans ilişkisi parametre düzeltmesinden sonra önemli ölçüde değişmiştir. Buna göre CFRP ile eğilmeye karşı güçlendirilen bir betonarme kirişte hasar türünü ayıran denklem OF(kHz)=0.22*RA(μsn/V) olarak belirlenmiştir. Bu sayede aktivite türü sınıflandırmasında bir gelişme sağlanmıştır ve kesme çatlaması ve CFRP faaliyetleri gibi kritik kesme tipi mekanizmalar ortaya çıkarılmıştır.
- Düzeltilen AE aktivitelerinin Ib değerleri, kritik noktalarda ham dağılımdan farklı olarak mekanik bulgularla daha uyumlu sonuçlar göstermiştir.
- AE miktarı-AE enerjisi, kaydedilen genlik-düzeltilen genlik ve kaydedilen genlik-düzeltilen genliğe yakınlık ilişkileri sayısallaştırılmıştır.
- Enerjinin genlikten daha çok bozulan bir AE parametresi olduğu görülmüştür. Ayrıca eşit enerji kaybı seviyesinde daha çok çekme özelliğine sahip aktivitelerin daha düşük, daha çok kesme özelliğine sahip aktivitelerin ise daha yüksek genlik kaybına maruz kaldığı ortaya konmuştur.

- Genlik kaybı ve enerji kaybı değerlendirmeleri ışığında elastik dalganın sönümlenmesi sebebiyle sinyaldeki genlik ve enerji kayıpları ile hasarın türü ilişkisi için bir çıkarım önerilmiştir.
- Tüm bu sonuçlarla birlikte parametre düzeltmenin bazı sınırlamalarının göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Hasar oluştukça betonun heterojenlik ve sönümleyicilik özellikleri de değişeceğinden, düzeltme faktörlerinin de yenilenmesi gerekmektedir. Ancak bu işlem, tekniğin uygulanabilirliğini ve pratikliğini zorlaştıracaktır. Buna rağmen elde edilen sonuçlarla mekanik bulgular ile daha uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.
- İlerleyen çalışmalarda fiber katkılı betonarme kirişlerde parametre düzeltmesi yapılması, gönderilen sinyalin özelliklerinin tekniğe etkilerinin incelenmesi ve farklı AE analizleri ile değerlendirmelerin genişletilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Aggelis, D. G. and Shiotani, T., 2008, Surface wave dispersion in cement-based media: Inclusion size effect, *NDT&E International*, 41(5), 319-325 pp.

Aggelis, D. G. and Shiotani, T., 2012, Effect of size of inhomogeneity on the surface wave attenuation in cementitious media, *Journal of Materials in Civil Engineering-ASCE*, 24(8), 1097-1102 pp.

Aggelis, D. G., De Sutter, S., Verbruggen, S., Tsangouri, E., Tysmans, T., 2019, Acoustic emission characterization of damage sources of lightweight hybrid concrete beams, *Engineering Fracture Mechanics*, 210, 181-188 pp.

Aggelis, D. G., Momoki, S. and Chai, H., 2009, Surface wave dispersion in large concrete structures, *NDT&E International*, 42(4), 304-307 pp.

Aggelis, D. G., Mpalaskas, A. C., Ntalakas, D. and Matikas, T. E., 2012, Effect of wave distortion on acoustic emission characterization of cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 35, 183-190 pp.

Akaike, H., 1974, Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average, *Annuals of the Institute of Statistical Mathematics*, 26(1), 363–387pp.

Alberti, M. G., Enfedaque, A. and Galvez, J. C., 2015, Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 85, 182-194pp.

Al-Jumaili, S. K., Eaton, M., Holford, K., Pullin, R., 2014, A Parameter Correction Technique (PCT) for acoustic emission characterisation in large-scale composites, 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), September 3-5, Dresden, Germany.

Al-Jumaili, S. K., Holford, K. M., Eaton, M. J. and Pullin, R., 2015, Parameter Correction Technique (PCT): A novel method for acoustic emission characterisation in large-scale composites, *Composites Part B*, 75, 336-344pp.

Alver, N., Tanarslan, H. M., Tayfur, S., 2017, Monitoring Fracture Processes of CFRP-Strengthened RC Beam by Acoustic Emission, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 23(1), B4016002.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Asadollahi, A. and Khazanovich, L., 2019, Numerical investigation of the effect of heterogeneity on the attenuation of shear waves in concrete, *Ultrasonics*, 91, 34-44 pp.

ASTM E 1316, 2002, Standard Terminology for NDT.

Bacaar, H., 2015, Development, Implementation, and Validation of an acoustic emission-based structural health monitoring system, *Duisburg-Essen University*, PhD Thesis, Germany.

Bhosale, A., Rasheed, M. A., Prakash, S. S., Raju, G., 2019, A study on the efficiency of steel vs. synthetic vs. hybrid fibers on fracture behavior of concrete in flexure using acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 199, 256–268 pp.

Bohmann, T., Schlamp, M. and Ehrlich, I., 2018, Acoustic emission of material damages in glass fibre-reinforced plastics, *Composites Part B: Engineering*, 155, 444-451pp.

Boniface, A., Saliba, J., Sbartai, Z. M., Ranaivomanana, N., Balayssac, J.-P., 2020, Evaluation of the acoustic emission 3D localisation accuracy for the mechanical damage monitoring in concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 223, 106742/1-16 pp.

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Accornero, F., Mpalaskas, A. C., Matikas, T. E. and Aggelis, D. G., 2013, Influence of damage in the acoustic emission parameters, *Cement and Concrete Composites*, 44, 9-16 pp.

Carpinteri, A., Xu, J., Lacidogna, G. and Manuello, A., 2012, Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures, *Cement&Concrete Composites*, 34, 529-537 pp.

Chai, H. K., Momoki, S., Kobayashi, Y., Aggelis, D. G. and Shiotani, T., 2011, Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound, *NDT&E International*, 44, 206-215 pp.

Chen, C., Fan, X., Chen, X., 2020, Experimental investigation of concrete fracture behavior with different loading rates based on acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 237, 117472/1-10 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Das, A. K., Suthar, D. and Leung, C. K. Y., 2019, Machine learning based crack mode classification from unlabeled acoustic emission waveform features, *Cement and Concrete Research*, 121, 42-57pp.

Dev, A., Chellapandian, M., Prakash, S. S., Kawasaki, Y., 2020, Failure-mode analysis of macro-synthetic and hybrid fibre-reinforced concrete beams with GFRP bars using acoustic emission technique, *Construction and Building Materials*, 249, 118737/1-12 pp.

Drouillard, R. F., 1979, Acoustic emission: A bibliography with abstracts, Ed. Laner, F. J., *New York: Plenum Publication*, 806 pp.

Drouillard, R. F., 1987, Introduction to acoustic emission technology, Nondestructive Testing Handbook, Eds. Miller, R. K. and McIntire, P., *ASNT*, 5, 1-10 pp.

Duda, R. O., Hart., P. E. and Stork, D. G., 2000, Pattern classification, 2nd Ed. New York: *Wiley-Interscience*.

Fan, L. F., Wong, L. N. Y. and Ma, G. W., 2013, Experimental investigation and modeling of viscoelastic behavior of concrete, *Construction and Building Materials*, 48, 814-821 pp.

Farhidzadeh, A., Denghan-Niri, E., Salamone, S. and Luna, B., 2013, monitoring crack propagation in reinforced concrete shear walls by acoustic emission, *Journal of Structural Engineering*, 139(12).

Farhidzadeh, A., Mpalaskas, A. C., Matikas, T. E., Farhidzadeh, H. and Aggelis, D. G., 2014, Fracture mode identification in cementitious materials using supervised pattern recognition of acoustic emission features, *Construction and Building Materials*, 67, 129-138pp.

Feng, H. and Yi, W., 2017, Propagation characteristics of acoustic emission wave in reinforced concrete, *Results in Physics*, 7, 3815-3819 pp.

Förster, F. and Scheil, E., 1936, akustische untersuchung der bildung von martensitnadeln (acoustic study of the formation of martensile needels), *Zeitschrift für Metallkunde,* 28(9), 245-247pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Gaydecki, P. A., Burdekin, F. M., Damaj, W., John, D. G. and Payne, P. A., 1992, The propagation and attenuation of medium-frequency ultrasonic waves in concrete: a signal analytical approach, *Measurement Science and Technology*, 3, 126–134 pp.

Ge, M., 2003, Analysis of source location algorithms part II: Iterative methods, *Journal of Acoustic Emission*, 21, 29-51 pp.

Goldaran, R., Turer, A., 2020, Application of acoustic emission for damage classification and assessment of corrosion in pre-stressed concrete pipes, *Measurement*, 160, 107855/1-8 pp.

Goldaran, R., Turer, A., Koughdaragh, M., Ozlutas, K., 2020, Identification of corrosion in a prestressed concrete pipe utilizing acoustic emission technique, *Construction and Building Materials*, 242, 118053/1-9 pp.

Grosse, C.U. and Ohtsu, M., 2008, Acoustic Emission Testing, Basics for Research-Applications in Civil Engineering, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.

Gutenberg, B. ve Richter, C. F., In Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, *Princeton University Press*, Princeton, NJ, USA, 2nd edn, 1954.

Iliopoulos, S. N., Malm, F., Grosse, C. U., Aggelis, D. G. and Polyzos, D., 2017, Concrete wave dispersion interpretation through Mindlin's strain gradient elastic theory, *Journal of Acoustical Society of America*, 142(1), 89- 94 pp.

Jacobs, L. J. and Owino, J. O., 2000, Effect of aggregate size on attenuation of Rayleigh surface waves in cement-based materials, *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 126(11), 1124–1130 pp.

JCMS-IIIB5706, 2003, Monitoring method for active cracks in concrete by acoustic emission, *Federation of Construction Material Industries*, Japan, 23-28 pp.

Kaiser, J., 1950, A study of acoustic phenomena in tensile tests, Dr.-Ing. Dissertation, *Technical University of Munich*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Kelkel, B., Popow, V. and Gurka, M., 2018, Combining acoustic emission with passive thermography to characterize damage progression in cross-ply CFRP laminates during quasi-static tensile loading, *12th ECNDT*, Gothenburg.

Khon, H., Bashkov, O. V., Zolotareva, S. V., Solovev, D. B., 2019, Modeling the Propagation of Elastic Ultrasonic Waves in Isotropic and Anisotropic Materials When Excited by Various Sources, *Materials Science Forum*, 945, *Trans Tech Publications*, Switzerland, 926-931 pp.

Kim, Y. H., Lee, S. and Kim, H. C., 1991, Attenuation and dispersion of elastic waves in multi-phase materials, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 24, 1722–1728 pp.

Kishinoue, F., 1990, An experiment on the progression of fracture (A preliminary report), Jisin, 6, 24-31 pp (1934) translated and published by Ono, K., *Journal of AE*, 9, 3, 177-180 pp.

Lacidogna, G., Piana, G., Carpinteri, A., 2019, Damage monitoring of three-point bending concrete specimens by acoustic emission and resonant frequency analysis, *Engineering Fracture Mechanics*, 210, 203-211 pp.

Li, B., Xu, L., Shi, Y., Chi, Y., Liu, Q., Li, C., 2018, Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 181, 474–486 pp.

Li, F., Huang, L., Zhang, H. and Yang, T., 2018, Attenuation of acoustic emission propagation along a steel strand embedded in concrete, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 222-230 pp.

Ma, G. and Du, Q., 2020, Structural health evaluation of the prestressed concrete using advanced acoustic emission (AE) parameters, *Construction and Building Materials*, 250, 118860/1-17 pp.

Ma, G. and Li, H., 2017, Acoustic emission monitoring and damage assessment of FRPstrengthened reinforced concrete columns under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 144, 86–98 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Mirgal, P., Pal, J., Banerjee, S., 2020, Online acoustic emission source localization in concrete structures using iterative and evolutionary algorithms, *Ultrasonics*, 108, 106211/1-10 pp.

Mpalaskas, A. C., Thanasia, O. V., Matikas, T. E. and Aggelis, D. G., 2014, Mechanical and fracture behavior of cement-based materials characterized by combined elastic wave approaches, *Construction and Building Materials*, 50, 649-656 pp.

Nguyen-Tat, T., Ranaivomanana, N., Balayssac, J.-P., 2018, Characterization of damage in concrete beams under bending with Acoustic Emission Technique (AET), *Construction and Building Materials*, 187, 487-500 pp.

Nogueria, C. L. and Rens, K. L., 2018, Ultrasonic wave propagation in EPS lightweight concrete and effective elastic properties, *Construction and Building Materials*, 184, 634–642 pp.

Obert, L. and Duvall, W. I., 1945, The microseismic method of predicting rock failure in underground mining Part II Laboratory Experiments. [Washington, D.C.]: U.S. *Dept. of the Interior, Bureau of Mines.*

Obert, L., 1977 the microseismic method: discovery and early history, *First Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, 11-12pp. *Trans Tech Publications*, Clausthal-Zellerfeld, Germany.

Ohtsu, M, Okamoto, T. and Yuyama S., 1998, Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in concrete, *ACI Structural Journal*, 95(2), 87-95 pp.

Ohtsu, M. and Ohtsuka, M., 1998, Damage evaluation by AE in the fracture process zone of concrete, Journal of Materials, *Concrete Structures and Pavements*, JSCE, 599(40), 177-184 pp.

Ohtsu, M., 1995, Acoustic emission theory for moment tensor analysis, *Research of Nondestructive Evaluation*, 6, 169-184 pp.

Ohtsu, M., 2018, Prospective applications of AE measurements to infra-dock of concrete structures, *Construction and Building Materials*, 158, 1134-1142pp

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Oskouei, A. R., Heidary, H., Ahmadi M. and Farajpur, M., 2012, Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass/polyester composites, *Materials and Design*, 37, 416-422pp.

Otsuki, N., Iwanami, M., Miyazato, and Hara, S. N., 2000, Influence of aggregates on ultrasonic elastic wave propagation in concrete, in: T. Uomoto (Ed.), *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Elsevier, Amsterdam, pp. 313–322 pp.

Philippidis, T. P. and Aggelis, D. G., 2005, Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete, *Ultrasonics*, 43, 584-595 pp.

Prem, P. R. and Murthy, A. R., 2017, Acoustic emission monitoring of reinforced concrete beams subjected to four-point-bending, *Applied Acoustics*, 117, 28-38 pp.

Proverbio, E., Venturi, V. ve Campanella, G., Damage Assessment in Post-Tensioned Concrete Viaduct by b- and Ib-value Analysis of AE Signal, *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, France, June 30th-July 3rd, 2009.

Qasim Ali, H., Tabrizi, I. E., Khan, R. M. A., Tufani, A. and Yildiz, M., 2019, Microscopic analysis of failure in woven carbon fabric laminates coupled with digital image correlation and acoustic emission, *Composite Structures*, 230, 111515.

Ramaniraka, M., Rakotonarivo, S., Payan, C., Garnier, V., 2020, Effect of the Interfacial Transition Zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete, *Cement and Concrete Research*, 124, 105809/1-7 pp.

Rao, M. V. M. S. and Prasanna Lakshmi, K. J., 2006, Amplitude distribution anaylsis of acoustic emissions and investigation of the development of brittle fracture in rock, *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 44, 820-825 pp.

Ren, D., Liu, B., Chen, S., Yin, D., Yu, M., Liu, H., Wu, L., 2020, Visualization of acoustic emission monitoring of fracture process zone evolution of mortar and concrete beams under three-point bending, *Construction and Building Materials*, 249, 118712/1-11 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Ruesch, H., 1959, Physical problems in the testing of concrete, *Zement Kalk- Gips*, 12, 1, 1-9 pp.

Salehi, H. and Burgueno, R., 2018, Emerging intelligence methods in structural engineering, *Engineering Structures*, 171, 170-189pp.

Sause M. G. R. and Horn, S., 2010, Simulation of acoustic emission in planar carbon fiber reinforced plastic specimens, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 29(2), 123–142pp.

Sause, M. G. R. and Horn, S., 2013, Quantification of the uncertainty of pattern recognition approaches applied to acoustic emission signals, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 32, 242-255pp.

Sause, M. G. R., 2013, Identification of failure mechanisms in fiber reinforced composites by acoustic emission analysis, Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures & Infrastructures, Deodatis, Ellingwood & Frangopol (Eds), *Taylor & Francis Group*, London.

Sause, M. G. R., 2016, Acoustic emission source identification in large scale fibre reinforced composites, *Czech Society for Nondestructive Testing 32nd European Conference on Acoustic Emission Testing*, September 7-9, Prague, Czech Republic.

Sause, M. G. R., Gribov, A., Unwin, A. R. and Horn, S., 2012, Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals, *Pattern Recognition Letters*, 33, 17-23pp.

Schofield, B. H., 1961, Acoustic emission under applied stress, Report ARL-150, *Lessels and Associates*, Boston.

Shahid, K. A., Bunnori, N. M., Johari, M. A. M., Hassan, M. H., Sani, A., 2020, Assessment of corroded reinforced concrete beams: Cyclic load test and acoustic emission techniques, *Construction and Building Materials*, 233, 117291/1-13 pp.

Shardakov, I., Shestakov, A., Glot, I., 2018, Elastic and Dissipative Properties of Concrete under Impact Loads, *Procedia Structural Integrity*, 13, ECF22-Loading and Enviromental Effects on Structural Integrity, 1342-1346 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Shiotani, T., Fujii, K., Aoki, T. ve Amou, K., Evaluation of Progressive Failure Using AE Sources and Improved b-value on Slope Model Tests, *Progress in Acoustic Emission VII*, 529–534, 1994.

Shiotani, T., Yuyama S., Li, Z. W. ve Ohtsu, M., Application of the AE Improved b-value to Qualitative Evaluation of Fracture Process in Concrete Materials, *Journal of Acoustic Emission*, 19, 118–132, 2001.

Song, H., Popovics, J. S., 2017, Characterization of steel-concrete interface bonding conditions using attenuation characteristics of guided waves, *Cement and Concrete Composites*, 83, 111-124 pp.

Suthar, D., Srivastava, J., Kabinesh, J. M. and Sagar, R. V., 2017, Probabilistic approach to crack mode classification in concrete under uniaxial compression, *NDE 2017 Conference & Exhibition of the Indian Society for NDT (ISNT)*, 14-16 December 2017, Chennai, T.N., India.

Tabrizi, I. E., Kefal, A., Zanjani, J. S. M., Akalin, C. and Yildiz, M., 2019, Experimental and numerical investigation on fracture behavior of glass/carbon fiber hybrid composites using acoustic emission method and refined zigzag theory, *Composite Structures*, 223, 110971.

Tayfur, S., Alver, N., Abdi, S., Saatcı, S., Ghiami, A., 2018, Characterization of concrete matrix/steel fiber de-bonding in an SFRC beam: Principal component analysis and k-mean algorithm for clustering AE data, *Engineering Fracture Mechanics*, 194, 73-85 pp.

Tayfur, S., Alver, N., Tanarslan, H. M., Ercan, E., 2018, Identifying CFRP strip width influence on fracture of RC beams by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 164, 864-876 pp.

Tayfur, S., SAatcı, S., Alver, N., 2019, Çelik fiberli betonarme kirişte akustik emisyon aktivitelerinin Ib değeri analizi ile değerlendirilmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 309-318pp.

Theodoridis, S. and Koutroumbas, K., 2008, Pattern recognition, 4th ed. *Elsevier*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Thirumalaiselvi, A., Sasmal, S., 2019, Acoustic emission monitoring and classification of signals in cement composites during early-age hydration, *Construction and Building Materials*, 196, 411–427 pp.

TS EN 12390-3, 2003, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.

TS EN 12390-5, 2002, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.

Van Steen, C., Pahlavan, L., Wevers, M., Verstrynge, E., 2019, Localisation and characterisation of corrosion damage in reinforced concrete by means of acoustic emission and X-ray computed tomography, *Construction and Building Materials*, 197, 21–29 pp.

Yim, H. J., Kwak, H.-G. and Kim, J. G., 2012, Wave attenuation measurement technique for nondestructive evaluation of concrete, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(1), 81-94 pp.

Yu, A.-P., Naqvi, M. W., Hu, L.-B., Zhao, Y.-L., 2020, An experimental study of corrosion damage distribution of steel bars in reinforced concrete using acoustic emission technique, *Construction and Building Materials*, 254, 119256/1-11 pp.

Zhang, Q. ve Zhang, X. P., A Numerical Study on Cracking Processes in Limestone by the b-value Analysis of Acoustic Emissions, *Computers and Geotechnics*, 92, 1-10, 2017.

Zhou, W., Zhang, P. and Zhang, Y., 2018, acoustic emission based on cluster and sentry function to monitor tensile progressive damage of carbon fiber woven composites, *Applied Sciences*, 8, 2265.

Zhou, W., Zhao, W., Zhang, Y. and Ding, Z., 2018, Cluster analysis of acoustic emission signals and deformation measurement for delaminated glass fiber/epoxy composites, *Composite Structures*, 195, 349-358pp.

TEŞEKKÜR

Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca engin bilgi ve tecrübeleri ile desteğini de benden hiçbir zaman esirgemeyen, bir danışman olmanın yanı sıra bana kalbini de açan, her zaman örnek alacağım çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ninel ALVER'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Sundukları katkı ve önerileriyle tez çalışmasını geliştiren değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selçuk SAATCI'ya,

Deneyler sırasında büyük yardımları dokunan değerli arkadaşlarım Yük. Mak. Müh. Hasan Yavuz ÜNAL, Yük. İnş. Müh. Hüsna BOLÇAY, Yük. İnş. Müh. Ali Seyed Yousefi SHESHDEH, Yük. İnş. Müh Hojjat HOSSEINNEZDAH, İnş. Müh. Selim ÜSTÜN'e ve hocam Sayın Doç. Dr. Emre ERCAN'a; deney elemanlarının üretimi konusunda bilgisinden faydalandığım değerli arkadaşım Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU'ya; analizler aşamasında yardımını aldığım İnş. Müh. Nuh Muhammed PİŞKİN'e, verileri yorumlamada desteklerini aldığım hocalarım Sayın Prof. Dr. Kambiz RAMYAR ve Dr. Cihat YÜKSEL'e,

Biyomekanik laboratuvarlarını kullanımıma açan Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na,

Malzeme desteklerinden dolayı KORDSA ve ATLAS1 firmalarına,

118M172 numaralı proje kapsamında çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren ve maddi ve manevi daima en büyük destekçilerim çok sevgili Annem'e ve Babam'a gönülden teşekkür ederim.

22/02/2021

Sena TAYFUR

ÖZGEÇMİŞ

Yük. İnş. Müh. Sena TAYFUR ilk ve orta öğrenimini İzmir Özel Türk Koleji'nde, lise öğrenimini İzmir Konak Nevvar Salih İşgören Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. 2013 yılında derece ile Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun olduktan sonra yüksek lisans eğitimini de 2016 yılında aynı bölümde tamamlamıştır. Halen Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.