



Evaluation of acoustic emission activities in a steel fiber reinforced concrete beam by I_b value analysis

Sena Tayfur¹*, Ninel Alver¹, Selçuk Saatcı²

¹Department of Civil Engineering, Ege University, Bornova, Izmir, 35100, Turkey

²Department of Civil Engineering, Izmir Institute of Technology, Urla, Izmir, 35430, Turkey

Highlights:

- I_b value analysis was applied to investigate effect of the steel fiber on I_b value.
- Damage in steel fiber reinforced concrete beam was evaluated by AE parameter analysis.
- I_b value distribution is affected after post-peak because of higher amplitude values due to steel fiber activities.

Keywords:

- Steel fiber reinforced concrete beam
- Damage detection
- Acoustic emission
- I_b value

Article Info:

Research Article

Received: 16.06.2017

Accepted: 08.11.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416493

Acknowledgement:

The authors are thankful to the Scientific and Technological Research Council of Turkey for having supported this work (TUBITAK, Grant Number 112M822).

Correspondence:

Author: Sena Tayfur
e-mail: sena.tayfur@ege.edu.tr
phone: +90 232 388 60 26

Graphical/Tabular Abstract

There are numerous nondestructive testing methods that are used to determine damages within structures. Acoustic Emission (AE), being one of these methods makes it possible to obtain significant pieces of information such as origin time, location and type of damage formed in a material during loading by analyzing AE data using various algorithms. I_b value analysis is one of these algorithms which is based on AE signal and this analysis enables to have information on formation of new cracks or propagation of existing cracks by scaling the magnitude of AE activities. In this study, in order to investigate effect of the steel fiber in concrete matrix on I_b value, two reinforced concrete beams were tested under simple bending while one of them was the reference. Afterwards, AE parameters obtained were analyzed, I_b value analyses were applied to amplitude values and these parameters were associated to each other. Furthermore, effect of steel fiber existence on behavior of the beam and distribution of I_b value were examined.

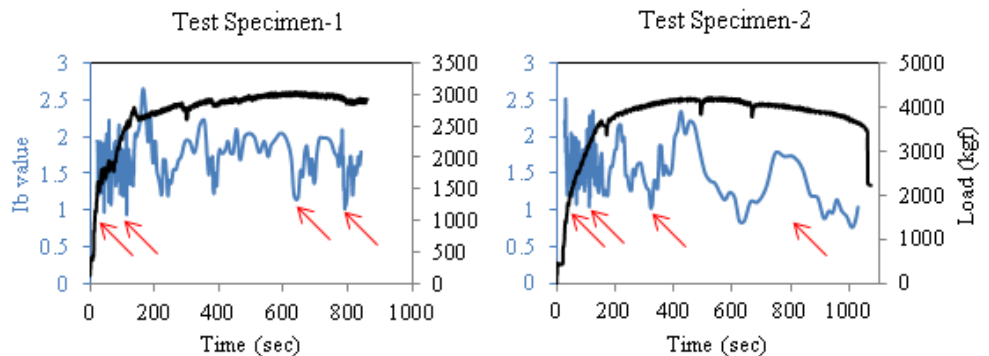


Figure A. I_b value vs time distributions of the test specimens

Purpose: In this study, it was aimed to evaluate AE activities of plain and steel fiber reinforced concrete beams by I_b value analysis and to reveal effects of steel fiber presence on I_b value distribution.

Theory and Methods:

I_b value analysis is a technique to evaluate Acoustic Emission (AE) data for scaling failure mechanisms. While higher I_b values indicate more activities having lower amplitude (micro activities), lower I_b values show less activities having higher amplitude (macro activities).

Results:

Figure A indicates the lowest I_b values in Test Specimen-1 at 41st and 114th sec when the beam reached up to 56% and 82% of its ultimate capacity. Likewise, the lowest I_b values in Test Specimen-2 were observed at 69th and 112nd sec when the beam reached up to 59% and 75% of its ultimate capacity. These states point out that I_b value gives a warning before macro failures. Decrease of I_b values reveals cracking of concrete matrix in pre-peak region. However, presence of steel fiber affects the I_b value distribution at post-peak region due to higher ductility.

Conclusion:

Increase in AE energy and amplitude causes lower I_b values because of macro damages. Thus, I_b value can be used as a damage parameter for AE analysis. While higher I_b values indicate micro activities, lower I_b values show macro activities. Presence of steel fiber increases ductility of reinforced concrete beam; thus I_b value distribution is affected after post-peak because of higher amplitude values due to steel fiber activities in this region.



Çelik lifli betonarme kirişte akustik emisyon aktivitelerinin I_b değeri analizi ile değerlendirilmesi

Sena Tayfur^{1*}, Ninel Alver², Selçuk Saatci³

¹Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir, 35100, Türkiye.

²Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir, 35100, Türkiye.

³İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Urla, İzmir, 35430, Türkiye.

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çelik lifli betonarme kirişte hasar
- Akustik emisyon
- I_b değeri analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.06.2017

Kabul: 08.11.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416493

Anahtar Kelimeler:

Çelik lifli betonarme kiriş,
hasar tespiti,
akustik emisyon,
 I_b değeri

ÖZET

Yapılarda meydana gelen hasarların belirlenmesinde birçok tahribatsız muayene yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan Akustik Emisyon (AE) ile test edilen malzemeden yükleme esnasında elde edilen veriler çeşitli algoritmalarla analiz edilerek yükleme süresi boyunca malzemedeki hasarların oluşum zamanı, yeri, türü gibi önemli bilgiler elde edilebilmektedir. Sinyal veya parametre bazlı olan bu algoritmalarından biri de I_b değeri analizidir; bu analiz, AE aktivitelerinin şiddet dağılımını ölçeklendirerek aktivitelerin büyüklüğüne göre çatlak oluşumları veya mevcut çatlakların gelişimi hakkında bilgi verir. Bu çalışmada, beton matrisine eklenen çelik lifin varlığının I_b değerlerine etkisini araştırmak amacıyla biri referans, diğeri de çelik lif katılarak üretilen iki betonarme kiriş basit eğilme altında test edilmiş ve AE ile izlenmiştir. Deneysel sonuçta elde edilen AE parametreleri çözümlenmiş, genlik değerlerine I_b değeri analizi uygulanmış ve bu parametreler birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca çelik lifin varlığının kirişin davranışına ve I_b değeri dağılımına etkisi incelenmiştir.

Evaluation of acoustic emission activities in a steel fiber reinforced concrete beam by I_b value analysis

H I G H L I G H T S

- I_b value analysis was applied to investigate effect of the steel fiber on I_b value.
- Damage in steel fiber reinforced concrete beam was evaluated by AE parameter analysis.
- I_b value distribution is affected after post-peak because of higher amplitude values due to steel fiber activities.

Article Info

Research Article

Received: 16.06.2017

Accepted: 08.11.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416493

Keywords:

Steel fiber reinforced
concrete beam,
damage detection,
acoustic emission,
 I_b value

ABSTRACT

There are numerous nondestructive testing methods that are used to determine damages within structures. Acoustic Emission (AE), being one of these methods makes it possible to obtain significant pieces of information such as origin time, location and type of damage formed in a material during loading by analyzing AE data using various algorithms. I_b value analysis is one of these algorithms which is based on AE signal and this analysis enables to have information on formation of new cracks or propagation of existing cracks by scaling the magnitude of AE activities. In this study, in order to investigate effect of the steel fiber in concrete matrix on I_b value, two reinforced concrete beams were tested under simple bending while one of them was the reference. Afterwards, AE parameters obtained were analyzed, I_b value analyses were applied to amplitude values and these parameters were associated to each other. Furthermore, effect of steel fiber existence on behavior of the beam and distribution of I_b value were examined.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton içerisinde lif kullanımı, yapı elemanlarında dayanımı arttırmaya yönelik uygulanan metotlardan birisidir. Çelik liflerin beton elemana sağladığı en önemli katkı dayanımı ve sünekliliği arttırmak iken, çatlama sonrası mukavemeti ve pik sonrası davranışı da iyileştirmekte ve çatlak yüzeylerinde köprüleme mekanizması oluşturarak betonun çekme dayanımında artış meydana gelmektedir. Bu sayede yapı elemanının enerji yutma kapasitesi, eğilme rijitliği ve sünekliliği artarken, çatlak genişlikleri ve aynı yük altında oluşan deplasman değerleri de azalmaktadır. Literatürde çalışmaları sonucu bu bulgulara erişen çok sayıda çalışma vardır: Abdul-Ahad ve Aziz [1] ile Mertol vd. [2] çelik fiber içeren betonarme elemanların eğilme davranışlarını incelerken, Lu vd. [3] ve Wang vd. [4] benzer elemanları basınç etkisi altında değerlendirmişlerdir. Afroughsabet ve Ozbakkaloglu [5] ile Sahoo vd. [6] ise çelik ve sentetik fiber içeren betonarme elemanların mekanik davranışlarından, Yoo vd. [7] fiber içeren yüksek performanslı betonarme kirişlerin darbe yükü altındaki davranışlarından bu bulgulara ulaşmışlardır. Saatçı ve Batarlar [8] tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı fiber oranlarına sahip etriyesiz betonarme kirişlerin mekanik özellikleri deneysel ve analitik olarak irdelenmiştir. Saatçı vd. [9] ise çelik fiberin farklı boyuna donatı oranına sahip betonarme döşemelerin zımbalama davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Mevcut durumdaki yapılarda meydana gelen hasarların belirlenmesi amacıyla çeşitli test teknikleri geliştirilmiştir. Genellikle bu test yöntemleri yapının hasarlı durumunu incelemektedir ve test için elemandan numune alma gereksinimi doğurmaktadır. Ancak yapının güçlendirmeye veya herhangi bir tedbire ihtiyaç duyup duymadığı gözle görülür şekilde hasar aldıktan sonra değil, öncesinde fark edilmelidir. Tahribatsız test yöntemleri bu amaçla geliştirilmiş yöntemlerdir [10]. Düşük yük seviyelerinde gelişen mikroskobik ve her türlü çatlak gelişmelerinin belirlenmesini sağlayan Akustik Emisyon (AE) tekniği de tahribatsız test yöntemlerinden biridir. Yöntem kırılmadan dolayı boşalan enerjinin oluşturduğu elastik dalgaların malzemede yayılması ve yüzeye yerleştirilen sensörler ile algılanıp analiz edilmesi ilkesine dayanmaktadır. AE'nin inşaat mühendisliğinde kullanımı yaygın olmakla birlikte, gerçekleştirilen çalışmalar ile yöntem gün geçtikçe geliştirilmeye devam etmektedir. Akustik Emisyon yöntemi ile yük etkisine maruz mevcut yapı elemanlarındaki çatlak gelişimi durumu incelenebilmektedir. Mirmiran ve Philip [11] kırılma mekanizmalarını inceledikleri betonarme kirişlerde AE aktivitelerinin yüklemeye düzenleri ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Carpinteri ve Lacidogna [12] mevcut külelerin stabilitelelerini AE ile incelemiş ve elde ettikleri AE aktiviteleriyle yapıların hasar parametrelerini ilişkilendirmişlerdir. Alver vd. [13, 14] Lee [15], Degala vd. [16], Rizzo vd. [17], karbon lifle güçlendirilmiş betonarme elemanların kırılma mekanizmalarının AE ile belirlenebildiğini ortaya koymuşlardır. Anastasopoulos vd. [18] karbon lifle

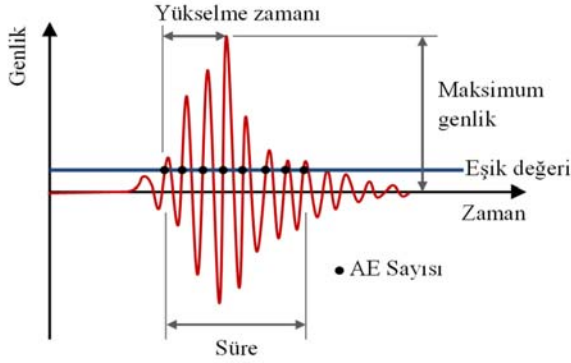
güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kırılma türü farklılıklarını AE ile belirlemişlerdir. Soulioti vd. [19] çelik lifli betonarme kirişlerde AE aktivitesinin lif içeriğiyle doğrudan orantılı olduğunu ortaya koymuşlardır.

AE yöntemi ile yük altındaki bir malzemeden elde edilen AE verilerinin çeşitli tekniklerle işlenip analiz edilmesi ile yüklemeye esnasında kırılmanın ne zaman, nerede başladığı ve çatlak türleri hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Bu yöntemleri iki ana başlıkta toplayabiliriz; parametre analizine dayanan yöntemler ve sinyal analizine dayanan yöntemler. Parametre analizine dayanan yöntemler AE sinyalinden elde edilen parametrelerin yüklemeye süresince gelişimi, değişimi, kümülatif değişimi bu değerlerin çeşitli istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmesi ile kırılma ile ilgili bilgi edinilebilecek yöntemlerdir. Sinyal analizine dayanan yöntemler ise sinyali tek olarak ele alıp, eşik seviyesi gibi durumların göz önüne alınmadığı, sinyalde varış süresi ve sinyal genişliği gibi değerlerin değerlendirilerek kırılma ile ilgili bilgi edinilen yöntemlerdir. AE yöntemi ile malzemede kırılmanın oluşma zamanı sinyalin varış zamanının belirlenmesiyle kolaylıkla tespit edilebilmektedir [13, 14]. Yine sinyalin sensöre varış zamanının belirlenmesi ile ve çoklu sensör kullanarak kırılmanın yeri de tespit edilebilir. AE mikro sismik bir olaydır ve depremle benzerleştirilebilir. Depremde yer kabuğu kırıldığında nasıl bu kırılma noktası, başka bir deyişle depremin merkezi belirlenebiliyorsa, AE de aynı şekilde kırılma lokasyonunu belirleyebilir. Kırılma tipi ise yine sinyal analizi yapılarak SIGMA gibi yöntemlerle belirlenebilir. [13, 14]. I_b değeri analizi de AE veri işleme tekniklerinden biridir ve meydana gelen AE aktivitelerinin şiddet dağılımını ölçeklendirir. AE'de "şiddet" sismolojide de uygulanan ve Richter tarafından önerilen "manyütüt" ile aynı kavramdır ve AE dalga formundaki genlik değerleri ve AE sensörlerinin kırılma kaynağından mesafesini birlikte değerlendiren bir büyüklüktür. Hesaplanan I_b değerleri ile AE aktivitelerinin büyüklüğüne göre yeni çatlak oluşumları, mevcut çatlakların gelişimi veya hızlı veya yavaş çatlak ilerlemesinin ayrımı yapılabilmektedir. Kurz vd. [20] çalışmalarında betonda çatlakların ani büyüdüğü ve AE aktivitelerinin arttığı yerlerde I_b değerinin minimum değere ulaştığını ortaya koymuşlardır. Colombo vd. [21] yüklemeye çatlaklar arttıkça I_b değerinin de deney boyunca azaldığını belirtmişlerdir. Kaphle vd. [22] en düşük I_b değerini ve en yüksek genlik değerlerini akma sırasında gözlemlenmişlerdir. Sagar ve Rao [23] betonarme elemanda gevrekliğin artmasıyla I_b değerinin azaldığını ve daha güçlü AE aktivitelerinin ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada beton matrisindeki çelik lifin varlığının I_b değerlerine etkisini araştırmak amacıyla biri referans numunesi, diğeri çelik lifli olarak üretilen iki betonarme kiriş basit eğilme altında test edilmiş ve Akustik Emisyon ile izlenmiştir. Deneyler sonunda elde edilen AE verileri analiz edilerek kirişlerin davranışları I_b değeri analizi ile değerlendirilmiştir. Ayrıca çelik lifin varlığının kirişin davranışına ve I_b değeri dağılımına etkisi incelenmiştir.

2. AKUSTİK EMİSYON (ACOUSTIC EMISSION)

Akustik Emisyon (AE), gerilme altındaki malzemelerde bir ya da daha çok kaynağın hızla enerji salarak geçici elastik dalgalar ürettiği olaylar ve bu şekilde oluşan geçici elastik dalgalar olarak tanımlanmaktadır [24]. Kırılmadan kaynaklanan bu elastik dalgalar test edilen malzeme yüzeyine yerleştirilen sensörler yardımıyla algılanmakta ve akustik emisyon veri kayıt cihazları tarafından kayıt edilmektedir. AE veri toplama sistemleri genellikle sensörler, ön yükselticiler, yükselticiler ve veri kayıt sistemlerinden oluşmaktadır. Kırılmadan dolayı oluşan elastik dalgalar malzeme yüzeyine ulaştıklarında yüzeyde bir titreşim meydana getirirler ve bu titreşim AE sensörleri tarafından algılandıktan sonra bir önyükselteç yardımıyla genlik değerleri yükseltilir. Önyükselteçten çıkan sinyal verisi yükselteç, filtre ve eşik değerlerinin belirlenebildiği veri kayıt sistemine iletilir. Burada işlenen sinyal kayıt edilir. Sinyalin analiz edilip sonuca ulaşılmasından önce, elde edilen AE dalga formuna ait çeşitli parametreler ile de bazı tahminleri yapmak mümkündür. Bu parametreler tipik bir AE sinyali üzerinde Şekil 1’de gösterilmektedir. Burada eşik değeri kullanıcı tarafından belirlenen, test edilen malzemeye ve ortam gürültüsü, test edilen elemanın büyüklüğü, sensörlerin birbirinden uzaklığı gibi test koşullarına bağlı olarak farklılık gösteren bir parametredir. Elde edilen AE parametrelerinin zamanla değişiminin değerlendirilmesi ile yük altındaki malzemede kırılmanın zamanı ve türü gibi önemli bilgileri tahmin etmek mümkündür.



Şekil 1. AE parametreleri (AE parameters)

2.1. *I*b Değeri (*I*b Value)

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 [25]. *b* değerinin hesaplanmasında Eş. 1 eşitliğinde verilen “Gutenberg-Richter Formülü” kullanılmaktadır.

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

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 değer AE'ye uygulanmasında ise maksimum AE genlik değerlerinin kullanımı için Gutenberg-Richter Formülü düzenlenerek Eş. 2 eşitliği elde edilmiştir.

$$\log N = a - b(A_{dB}/20) \quad (2)$$

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 [26]. 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 [27].

Ancak deprem ve AE aktivitelerinin yüklenme 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 *Ib* (Improved *b*-value) değeri geliştirilmiştir [28, 29]. *Ib* değeri analizi, gerilme altındaki malzemede meydana gelen AE aktivitelerinin şiddet dağılımının ölçeklendirilmesi olarak tanımlanmaktadır [30]. 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 *Ib* değerleri hesaplanmaktadır. Zamana bağlı elde edilen *Ib* değerlerinde gözlenen değişimler hasar ile ilişkilendirilebilmektedir. Bir genlik dağılımında *Ib* değeri Eş. 3 eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

$$Ib = 20(\log_{10} N_1 - \log_{10} N_2) / (a_2 - a_1) \quad (3)$$

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

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

3.1. Deney Elemanlarının Tasarımı (Design of Test Specimens)

Deneysel çalışma kapsamında net açıklıkları 2 m, en kesit boyutları ise 150x250 mm olan iki adet betonarme kiriş numune eğilme etkisi altında test edilmiştir. Etriyesiz tasarlanan kirişlerde kesitin altında ve üstünde 2 adet 8 mm çapında boyuna donatılar kullanılmıştır (Şekil 2). Kirişlerden biri (Deney Elemanı-1) lifsiz, diğeri (Deney Elemanı-2) ise hacimsel olarak %1 oranında çelik lifli betondan üretilmiştir.

3.2. Malzemeler (Materials)

Deney elemanlarının üretiminde kullanılan beton C25/30 sınıfına ait olup, çimento tipi CEM II B-M (L-W) 42.5R'dir. Karışımında kullanılan su/çimento oranı 0,63 ve maksimum

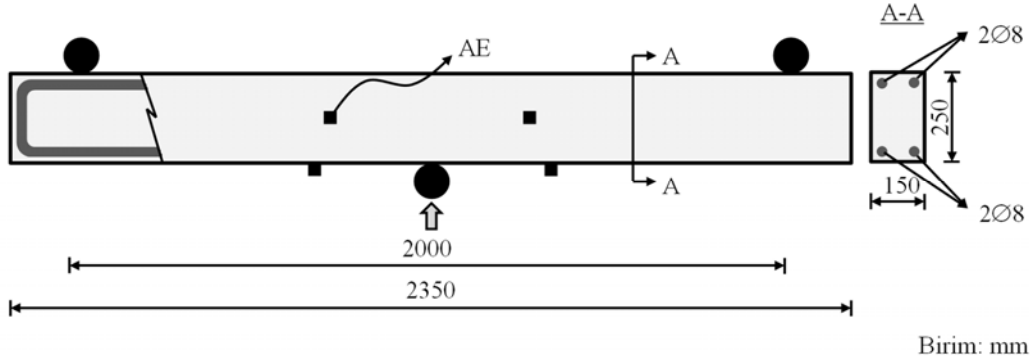
agrega çapı 16 mm'dir. Beton dökümleri sırasında karışımlardan alınan silindir (15x30 cm), küp (15x15 cm) ve prizmatik (15x15x75 cm) numunelere uygulanan mekanik testlerden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan çelik lifler BEKAERT firmasına ait Dramix RC 8060 BN kanca uçlu liflerdir. Liflerin üretici tarafından bildirilen çekme dayanımları 1050 MPa, uzunlukları 60 mm, en kesit çapları 0,75 mm, uzunluk/çap oranları ise 80'dir. Ayrıca 8 mm çapa sahip çeliklere uygulanan çekme testleri sonucunda donatıların akma dayanımları 480 MPa, elastisite modülleri 192 GPa olarak bulunmuştur.

3.3. Yükleme Düzeni (Test Setup)

Üretilen deney elemanları üç nokta eğilme deneyi ile test edilmiştir. Yükleme kirişleri basit eğilmeye çalıştıracak şekilde kirişlerin alt yüzeyinden yukarı doğru monotonik ve yük kontrollü olarak hidrolik pompa aracılığıyla, düzenli ve çatlak gelişiminin gözlenmesine izin verecek 3 kgf/s hızda yapılmıştır. Yükleme düzeneği Şekil 3'te gösterilmiştir.

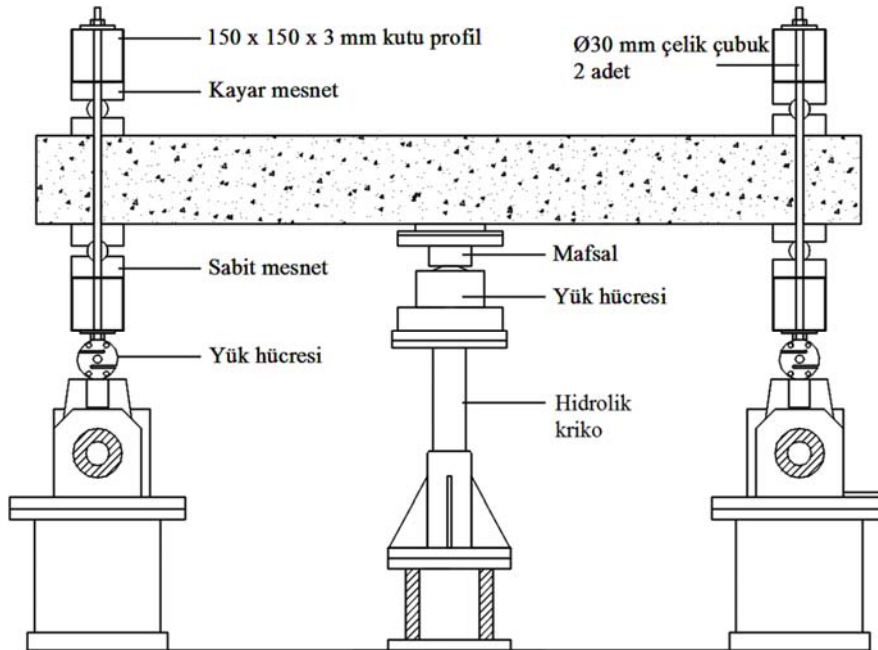
Ayrıca yükleme altındaki elemanların kırılma mekanizmalarını belirlemek üzere kiriş yüzeylerine 7 adet 150 kHz frekanslı AE sensörü (R15, PAC) yerleştirilmiştir. AE sensörlerinin kiriş elemanlara yerleşim noktalarının



Şekil 2. Deney elemanları (Test specimens)

Tablo 1. Beton mekanik test sonuçları (Mechanical test results of concrete)

Lif Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)		Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)		Eğilme Dayanımı (MPa)
	28 gün	Deney dönemi	Deney dönemi	Deney dönemi	
0	33,8	42,4	2,3		3,45
1	35,2	45,4	3,5		5,25



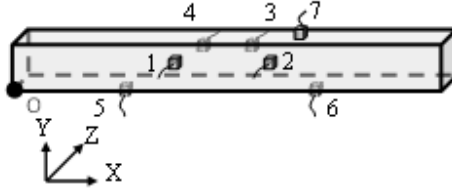
Şekil 3. Yükleme düzeneği (Test setup)

seçiminde kirişlerde üç nokta eğilme testi altında meydana gelecek çatlak gelişimlerinin yoğun olacağı tahmin edilen bölgeler göz önüne alınmıştır. Ayrıca bu yerleşimler yapılırken dalga sönümlenmesi problemi ile karşılaşmamak amacıyla birbirine en uzak iki sensör arasındaki mesafe 1 metreyi geçmeyecek şekilde alınmıştır. Bunun dışında sensörlerin her bir yüzeyde de bulunmasına dikkat edilerek sensörler gelişigüzel bir şekilde yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmayı yapmadan önce sensörler için bir kalibrasyon ölçümü yapılmıştır. Sensörler yerleştirildikten sonra her sensörün yanında ucu 0,5 mm kalınlıkta 2H kurşun kalem ucu kırılır, bu ölçüme Hsu-Nielsen ölçümü de denir. Kalem ucunun kırılması bir AE kaynağı gibi algılanır ve sensörlere varan sinyaller değerlendirilerek hem sensörlerin yüzeye iyi temas edip etmediği ve hem de sensörlerin bilgiyi alabilecek yeterli mesafede olup olmadığı kontrol edilir. Deneylerde eşik seviyesi test edilen malzemeye ve ortam gürültüsü, test edilen elemanın büyüklüğü, sensörlerin birbirinden uzaklığı gibi test koşullarına bağlı olarak 40 dB olarak belirlenmiştir. AE verilerini kaydetmek üzere kullanılan sistem Mistras Holding'e ait olup DiSP AE sistemidir. Sensörlerin kirişler üzerindeki yerleşim şeması Şekil 4'te gösterilmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

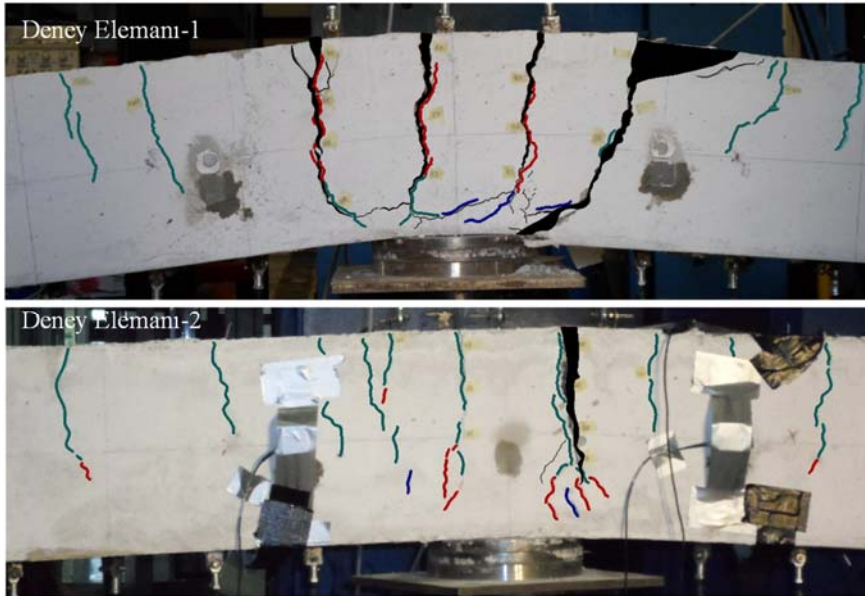
4.1. Mekanik Bulgular (Mechanical Results)

Deney Elemanı-1'de ilk çatlaklar 1,9 ton seviyesinde kirişin ortasında deplasman 2,7 mm iken gözlenmiştir. Yük arttıkça mevcut çatlaklar ilerlemiş, çekme bölgesinde açılmış ve yeni çatlaklar oluşmuştur. 2,61 ton yük ve 15,9 mm deplasman seviyelerinde ise yeni çatlaklar gözle görülebilir hale gelmiştir. Deney Elemanı-1, 37 mm deplasmanda nihai taşıma kapasitesi olan 3,04 ton'a ulaşmıştır. Daha sonra kirişin yük taşıma kapasitesinde azalma görülmekle beraber, deplasman artmaya devam etmiştir. Deplasman 52,1 mm'ye ulaştığında numune dört ana çatlak ile eğilmeden göçmüştür. Deney sonunda Deney Elemanı-1'in durumu Şekil 5'te gösterilmiştir. Burada kırmızı çatlaklar 1,9 ton seviyesinde, yeşil çatlaklar 2,61 ton seviyesinde, mavi çatlaklar ise göçmeye kadar geçen seviyede gözlenen çatlakları belirtmektedir. Kiriş 1,5 ton'a kadar oldukça rijit bir davranış ve elastik şekil değişimi göstermiş olup, 2,7 ton'da donatı akmıştır. Bu deneysel çalışmada donatıların davranışı



#	X	Y	Z
1	0,895	0,125	0,000
2	1,430	0,125	0,000
3	1,440	0,120	0,150
4	0,955	0,115	0,150
5	0,865	0,000	0,080
6	1,490	0,000	0,075
7	1,380	0,250	0,085

Şekil 4. AE sensör yerleşimi (Birim: m) (Locations of AE sensors (Unit: m))



Şekil 5. Kırılma sonunda deney elemanlarında gözlenen çatlaklar (Cracks observed in the test specimens after failure)

gerinim-ölçer yapıştırılarak incelenmemiştir. Donatının aktığı yük-deplasman eğrisinden ve davranıştan anlaşılmaktadır. Yük artışı olmadan deplasmanlar sünek bir şekilde artmaya başladıysa ve betonda ezilme görülüyorsa çekme donatısının aktığı sonucuna varılmıştır.

Deney Elemanı-2'de ilk çatlaklar 3,55 ton seviyesinde kirişin orta deplasmanı 4,4 mm iken gözlenmiştir. Yük arttıkça mevcut çatlaklar ilerlemiş, çekme bölgesinde açılmış ve yeni çatlaklar oluşmuştur. Kiriş 14,6 mm deplasman yaparken nihai taşıma kapasitesi olan 4,22 ton'a ulaşmıştır. Deplasman 15,6 mm'ye ulaşmış yük 4,1 ton'a düştüğünde ise yeni çatlaklar gözle görülebilir hale gelmiştir. Deplasman 41,5 mm'ye ulaştığında numune eğilmeden dolayı göçmüştür. Deney sonunda Deney Elemanı-2'nin durumu Şekil 5'te gösterilmiştir. Burada yeşil çatlaklar 3,55 ton seviyesinde, kırmızı çatlaklar 4,1 ton seviyesinde, mavi çatlaklar ise göçmeye kadar geçen seviyede gözlenen çatlakları belirtmektedir. Kiriş 1,5 ton'a kadar Deney Elemanı-1'den daha rijit bir davranış göstermiş olup, 3,6 ton'da donatı akmıştır. Donatı aktıktan sonra ise çelik lifin pik sonrası etkisiyle kiriş bir miktar daha yük tutmaya devam etmiştir. Deney elemanlarına ait yük-deplasman eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir.

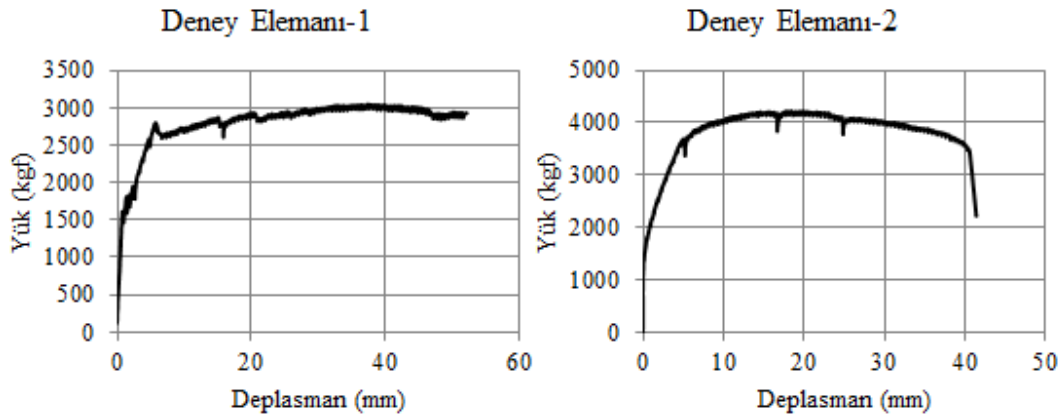
Deney yük kontrollü olarak çatlak gelişiminin gözlenmesine izin verecek şekilde 3 kg/s hızla yüklenmiştir. Deney esnasında oluşan çatlakları işaretlemek için yük uygulamasına ara verilmiştir. Ayrıca Kaiser ve Felicity etkileri gibi problemlerin ortaya çıkmaması için yük uygulamasına ara verildiğinde yük boşalmasına izin vermeyecek tüm önlemler alınmıştır. Bu süre içinde AE veri toplama sistemi de eşzamanlı olarak durdurulmuştur.

4.2. Ib Değeri Analizi Bulguları (Ib Value Analysis Results)

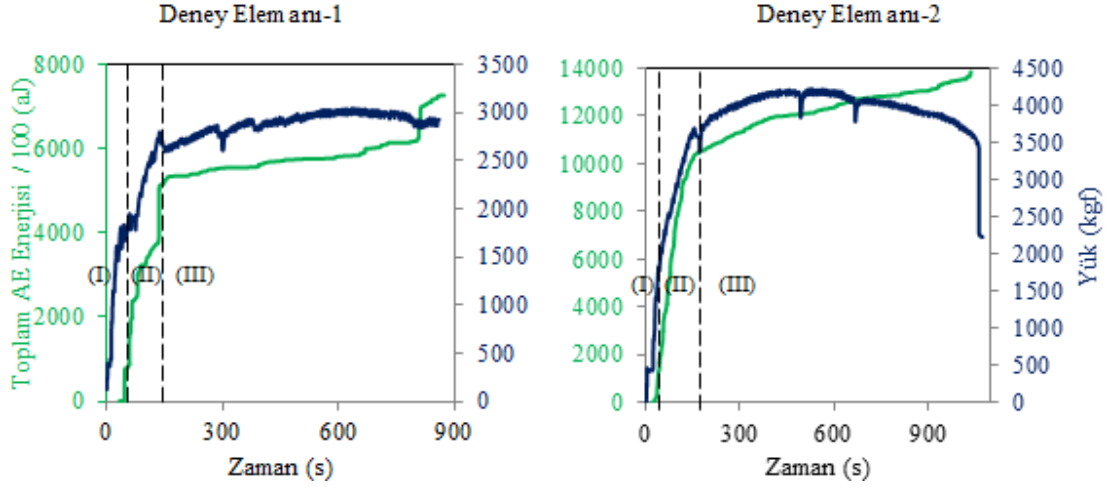
Deneyler boyunca Deney Elemanı-1'den 9044, Deney Elemanı-2'den ise 7551 adet AE vuruşu elde edilmiştir. Her bir deney elemanının AE enerji ve genlik parametreleri incelenmiş olup, genlik dağılımlarına Ib değeri analizleri uygulanmıştır. AE enerjisi ve genlik değerleri, kırılmanın büyüklüğü ve davranışın seyri ile ilgili bilgi veren

parametrelerdir. AE enerjisi, bir AE genlik-zaman sinyal grafiğinin altında kalan alandır. Şekil 7'de verilen grafikte AE enerjisinin birimi atto-joule'dur. Şekilde yük ve AE enerjisi gibi iki ayrı büyüklüğün zamana bağlı değişimi aynı grafikte gösterilmek istendiği için AE enerjisi değeri 100'e bölünerek gösterilmiştir. AE enerjisinin zamana bağlı değişimi, AE aktivitelerinin ve bu aktivitelerin enerji büyüklüklerinin zamanla ve aynı zamanda yüklemeye birlikte nasıl değiştiğini göstermektedir. Deney Elemanı-1'in ilk mikro çatlaklarının oluştuğu ve yükün hızlı bir şekilde taşındığı I. Bölge'de beton çekme çatlama maruz kalmıştır ve çok az sayıda AE aktivitesi gözlenmektedir (Şekil 7). Makro çatlamların başladığı ve yükte ani düşüş gözlemlendiği II. Bölge'de ise AE aktiviteleri artmış ve enerjide sıçramalı bir artış gözlenmiştir. Ayrıca bu sırada maksimum yükün %86'sına ulaşılmıştır. Beton matrisinde oluşan çatlakların açıldığı ve ilerlediği III. Bölge'de ise AE aktivitesindeki artış devam etmektedir. Deney elemanlarının zamana bağlı AE genlik değişimlerini gösteren Şekil 8 incelendiğinde ise, Deney Elemanı-1'de deney boyunca genlik değerlerinin 40-50 dB'de yoğunlaştığı, yükün düştüğü ve makro kırılmaların gözlemlendiği zamanlarda ise 90 dB'e kadar yükseldiği görülmektedir.

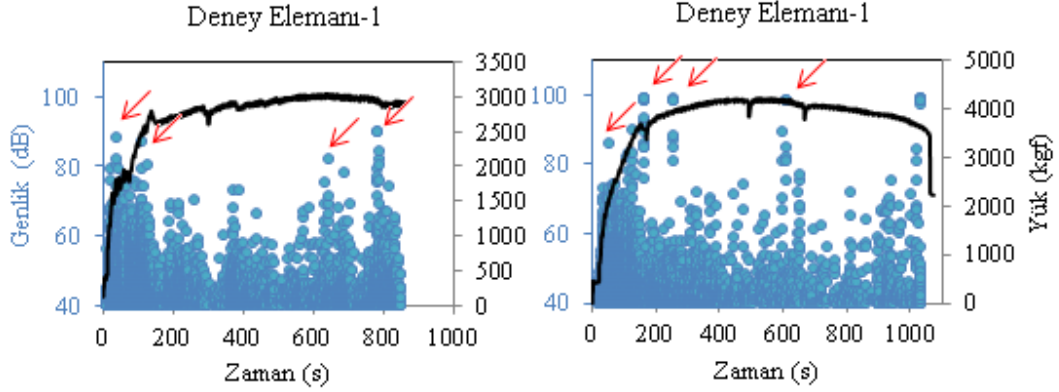
Deney Elemanı-2'de ilk mikro çatlaklarının oluştuğu I. Bölge'de çok az sayıda AE aktivitesi gözlenmektedir. Makro çatlamanın başladığı II. Bölge'de ise AE vuruş sayısı artmakta ve maksimum yükün yaklaşık %80'ine ulaşıldığı anda taşınan yükte ani düşüş gözlenmektedir (Şekil 7). Ayrıca yükün düştüğü sırada AE enerjisinde Deney Elemanı-1'de olduğu gibi sıçramalı değil, aşamalı bir yükselme söz konusudur. Bu durum Benhia vd. [31] tarafından lifli elemanın betonun çatlama sonrası lif kopmaları ile desteklenen kırılma türünün AE olaylarında ani değişime yol açmadığı şeklinde yorumlanmaktadır. III. Bölge'de ise AE aktivite hızı yükseliş eğiliminde olmakla birlikte, Deney Elemanı-1'e göre daha düşük hızda artmaktadır. Deney Elemanı-1'den farklı olarak bu durumun sebebi çelik liflerin köprüleme mekanizması ile çatlak oluşumunu geciktirmesidir. Şekil 8 incelendiğinde ise Deney Elemanı-2'de başlangıçta çelik lifin varlığıyla çatlak gelişiminin engellenmesi sebebiyle daha düşük genliklere sahip vuruşlar



Şekil 6. Deney elemanlarına ait yük-deplasman eğrileri (Load vs. displacement curves of the test specimens)



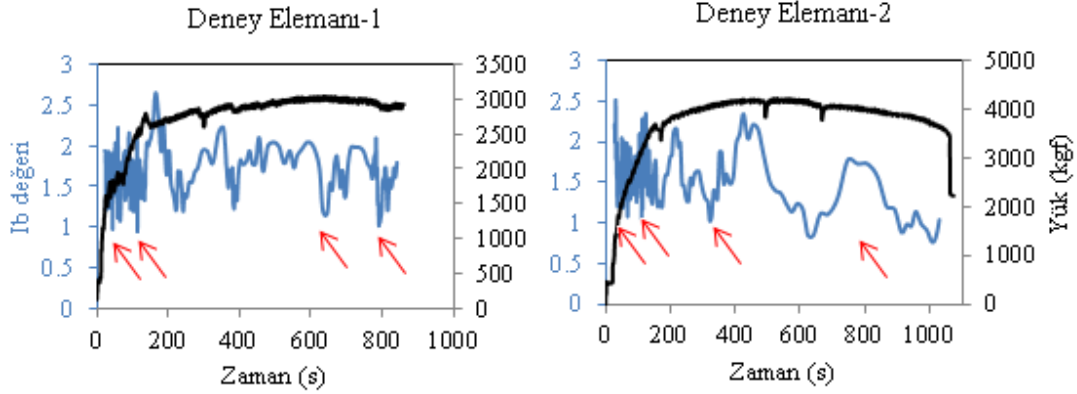
Şekil 7. Deney elemanlarına ait yük-zaman ve toplam AE enerjisi-zaman eğrileri (Load vs. time and total AE energy vs time curves of the test specimens)



Şekil 8. Deney elemanlarının zamana bağlı AE genlik dağılımları (AE amplitude vs time distributions of the test specimens)

görülmektedir. Bu elemanda ise deney boyunca genlik değerlerinin 40-50 dB'de yoğunlaştığı, yükün düştüğü makro kırılmaların gözlemlendiği zamanlarda ise 100 dB'e kadar yükseldiği görülmektedir. Deney Elemanı-1'de gözlenen en yüksek değer 90 dB olduğundan, 100 dB seviyedeki genliklerin çelik liflerin kopmaları olabileceği düşünülmektedir. Yöntemin anlatıldığı 2,1 başlığı altında 20'şer AE genlik değeri artışıyla ilerleyen gruplar halinde I_b değerlerinin hesaplanması gerektiği belirtilmişti. Bu bağlamda her birinde ardışık 20'si ortak olmak üzere 100 adet AE genlik değeri içeren gruplara bağlı hesaplanan I_b değerlerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'den de görüleceği üzere I_b değerlerinde ani düşüşler meydana gelen anlarda AE enerji ve genlik değerlerinde artışlar mevcuttur. Bu noktalarda kirişlerin yük değerlerinde önce pikler, daha sonra düşüşler gözlemlenmiş olup, çatlakların artmasıyla AE aktiviteleri oluşmuştur. Bu durum hasarın maksimum olduğu anlarda I_b değerinin minimum değerlere ulaştığını ve I_b değerinin akustik emisyon açısından bir hasar parametresi olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca yüksek I_b değerlerinin hesaplandığı bölgelerde çok sayıda düşük genlikli AE vuruşlarının yani yeni veya yavaş çatlak

oluşumlarının, düşük I_b değerlerinin hesaplandığı bölgelerde ise az sayıda ancak daha yüksek genlikli AE vuruşlarının yani hızlı çatlak gelişimlerinin meydana geldiği ortaya çıkmaktadır. Deney Elemanı-1'de 41. ve 114. saniyelerde hesaplanan en küçük I_b değerlerinin kirişin yük taşıma kapasitesinin %56 ve %82'sine ulaşıldığında elde edildiği görülmektedir. Benzer şekilde Deney Elemanı-2'de 69. ve 112. saniyelerde hesaplanan en küçük I_b değerlerinin kirişin yük taşıma kapasitesinin %59 ve %75'ine ulaşıldığında elde edildiği görülmektedir. Bu durum I_b değerinin elemanda makro çatlama oluşmadan uyarıda bulunduğunu kanıtlar niteliktedir. Çelik lifin varlığı I_b değerlerinin II. Bölge'deki davranışını etkilememiştir. Bu durumun sebebi çelik lifin etkinliğinin kirişte pik sonrası davranışı etkileyerek sünekliği artırmasıdır. Dolayısıyla her iki elemanda da pikten önceki bölgelere ait I_b değer düşüşleri beton matrisinin çatlamasına işaret etmektedir. Kirişlerin pik sonrası davranışları incelendiğinde ise Deney Elemanı-2'de çatlak gelişimleri sırasında çelik liflerin davranışa katkısı dolayısıyla genlik değerlerinde yükselme görülmektedir. Bu durum da Deney Elemanı-2'de hesaplanan I_b değerlerinin zamanla daha düşük değerlerde seyretmesine sebep olmuştur.



Şekil 9. Deney elemanlarının zamana bağlı I_b değeri dağılımları (I_b value vs time distributions of the test specimens)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada çelik lifin varlığının I_b değerlerine etkisini araştırmak amacıyla biri referans, diğeri çelik lifli üretilen iki betonarme kiriş basit eğilme altında test edilmiş ve Akustik Emisyon ile izlenmiştir. Deneyler sonunda elde edilen AE parametreleri çözümlenmiş, genlik değerlerine I_b değeri analizi uygulanmış ve bu parametreler birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca çelik lifin varlığının kirişin davranışına ve I_b değeri dağılımına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonunda şu sonuçlar elde edilmiştir: AE enerji ve genlik değerlerindeki artışlar I_b değerlerinde ani düşümlere sebep olmaktadır. Bu bölgeler AE aktivitelerinin, dolayısıyla hasarların fazla olduğu bölgelerdir. Hasarın maksimum olduğu anlarda I_b değeri minimum değere ulaşmaktadır. Bu sayede I_b değeri akustik emisyon açısından bir hasar parametresi olarak kullanılabilir. Yüksek I_b değerlerinin meydana geldiği bölgelerde çok sayıda düşük genlikli AE vuruşları yani yeni veya yavaş çatlak oluşumları, düşük I_b değerlerinin hesaplandığı bölgelerde ise az sayıda ancak daha yüksek genlikli AE vuruşları yani hızlı çatlak gelişimleri meydana gelmektedir. I_b değerindeki ani düşüş elemanda makro çatlama oluşmadan uyarıda bulunmaktadır. Çelik lifin varlığı pik öncesi bölgede I_b değerlerini etkilememiştir. Bu durumun sebebi çelik lifin etkinliğinin kirişte pik sonrası davranışı etkileyerek sünekliği artırmasıdır. Çelik lifin varlığı pik sonrası davranışa katkı sağladığından ve çelik lifler koparak AE aktivitelerini arttırdığından, referans numunesine göre bu bölgelerde daha yüksek genlik değerleri gözlenmiştir. Bu durum çelik lif varlığının pik sonrası davranışta I_b değerlerinin azalmasına sebep olmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmanın kiriş deneylerinin yapılması için sağladığı finansal destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK, Proje No: 112M822) teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Abdul-Ahad R.B. ve Aziz O.Q., Flexural Strength of Reinforced Concrete T-beams with Steel Fibers, *Cement & Concrete Composites*, 21, 263-268, 1999.
2. Mertol H.C., Baran E., Bello H.J., Flexural Behavior of Lightly and Heavily Reinforced Steel Fiber Concrete Beams, *Construction and Building Materials*, 98, 185-193, 2015.
3. Lu Y., Li N., Li S., Liang, H., Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete-Filled Steel Tube Columns under Axial Compression, *Construction and Building Materials*, 95, 74-85, 2015.
4. Wang Z.L., Wu L.P., Wang J.G., A Study of Constitutive Relation and Dynamic Failure for SFRC in Compression, *Construction and Building Materials*, 24, 1358-1363, 2010.
5. Afroughsabet V. ve Ozbakkaloglu T., Mechanical and Durability Properties of High-Strength Concrete Containing Steel and Polypropylene Fibers, *Construction and Building Materials*, 94, 73-82, 2015.
6. Sahoo D.R., Maran K., Kumar A., Effect of Steel and Synthetic Fibers on Shear Strength of RC Beams without Shear Stirrups, *Construction and Building Materials*, 83, 150-158, 2015.
7. Yoo D.Y., Banthia N., Kim S.W., Yoon Y.S., Response of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams with Continuous Steel Reinforcement Subjected to Low-Velocity Impact Loading, *Composite Structures*, 126, 233-245, 2015.
8. Saatçı S. ve Batarlar B., Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1143-1154, 2018.
9. Saatçı S., Yaşayanlar S., Yaşayanlar Y., Batarlar B., Effects of Steel Fibers on the Punching Behavior of Reinforced Concrete Slabs with Different Longitudinal Reinforcement, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.460507>, 2018.

10. Tayfur S. ve Alver N., Imaging of Voids in Concrete by Impact-Echo and Ultrasonic-Echo Methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 167-176, 2018.
11. Mirmiran A. ve Philip S., Comparison of Acoustic Emission Activity in Steel-Reinforced and FRP-Reinforced Concrete Beams, *Construction and Building Materials*, 14, 299-310, 2000.
12. Carpinteri A. ve Lacidogna G., Damage Evaluation of Three Masonry Towers by Acoustic Emission, *Engineering Structures*, 29, 1569-1579, 2007.
13. Alver N., Tanarlan H.M., Tayfur S., Monitoring Fracture Processes of CFRP-Strengthened RC Beam by Acoustic Emission, *Journal of Infrastructure Systems*, 23 (1), B4016002/1-9, 2017.
14. Alver N., Tanarlan Sulun O.Y., Ercan E., Karcili M., Selman E., Ohno K., Effect of CFRP-Spacing on Fracture Mechanism of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Beam Identified by AE-SiGMA, *Construction and Building Materials*, 67 (B), 146-156, 2014.
15. Lee J., Nondestructive Evaluation on Damage of Carbon Fiber Sheet Reinforced Concrete, *Composites Structures*, 58, 139-147, 2002.
16. Degala S., Rizzo P., Ramanathan K., Harries K.A., Acoustic Emission Monitoring of Externally Bonded FRP-Reinforced Concrete, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Pittsburgh, 3700 O'Hara Street, 949 Benedum Hall, Pittsburgh, PA, 15261, USA, 2008.
17. Rizzo P., Degala S., Ramanathan K., Harries K., Acoustic Emission Monitoring of CFRP Reinforced Concrete Slabs, *Construction and Building Materials*, 23 (5), 2016-2026, 2009.
18. Anastasopoulos A., Tsimogiannis A., Toutountzakis T., Papanicolau C., Triantafyllou T., Non Destructive Testing of Reinforced Concrete Beams Using Acoustic Emission, The 5th National Conference of the Hellenic Society for Non-Destructive Testing "Non-Destructive Testing: Certification, Applications, New Developments, Athens, Greece, November 18-19, 2005.
19. Soulioti D., Barkoula N.M., Piapetis A., Matikas T.E., Shiotani T., Aggelis D. G., Acoustic Emission Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete under Bending, *Construction and Building Materials*, 23, 3532-3536, 2009.
20. Kurz J.H., Finck F., Grosse C.U., Reinhardt H.W., Stress Drop and Stress Redistribution in Concrete Quantified over Time by the b-value Analysis, *Structural Health Monitoring*, 5 (1), 69-81, 2006.
21. Colombo I.S., Main I.G., Forde M.C., Assessing Damage of Reinforced Concrete Beam Using b-value Analysis of Acoustic Emission Signals, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (3), 280-286, 2003.
22. Kaphle M. R., Tan A.C.C., Thambiratnam D.P., Chan T. H.T., Study of Acoustic Emission Data Analysis Tools for Structural Health Monitoring Applications, *Progress in Acoustic Emission XV: Proceedings of the 20th International Acoustic Emission Symposium*, Kumamoto-Japan, November 16-19, 2010.
23. Sagar R.V. ve Rao M.V.M.S., An Experimental Study on Loading Rate Effect on Acoustic Emission based b-values Related to Reinforced Concrete Fracture, *Construction and Building Materials*, 70, 460-472, 2014.
24. ASTM E 1316, Standard Terminology for NDT, 2002.
25. Gutenberg B. ve Richter C. F., *In Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton University Press, Princeton, NJ, A.B.D., 1954.
26. 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.
27. Proverbio E., Venturi V., 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.
28. Shiotani T., Fujii K., Aoki T., Amou K., Evaluation of Progressive Failure Using AE Sources and Improved b-value on Slope Model Tests, *Progress in Acoustic Emission VII: Proceedings of the 12th International Acoustic Emission Symposium*, Sapporo, Japan, October 17-20, 1994.
29. Shiotani T., Yuyama S., Li Z.W., 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.
30. Rao M.V.M.S. ve Prasanna Lakshmi K.J., Analysis of b-value and Improved b-value of Acoustic Emissions Accompanying Rock Fracture, *Current Science*, 89 (9), 1577-1582, 2005.
31. Behnia A., Chai H.K., Ranjbar N., Jumaat M.Z., Damage Detection of SFRC Concrete Beams Subjected to Pure Tension by Integrating Acoustic Emission and Weibull Damage Function, *Structural Control and Health Monitoring*, Published Online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com), DOI: 10.002 /stc. 1753, 2015..