



**EGE ÜNİVERSİTESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**REAKTİF PUDRA BETON İÇERİKLİ  
BETONARME KİRİŞLERİN GÖÇME  
MEKANİZMALARININ AKUSTİK EMİSYON  
YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**Setenay (EREŞ) SÜRMEİOĞLU**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ninel Alver**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bornova-İZMİR**

**2016**

**E. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**REAKTİF PUDRA BETON İÇERİKLİ**  
**BETONARME KİRİŞLERİN GÖÇME**  
**MEKANİZMALARININ AKUSTİK EMİSYON**  
**YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**Setenay (EREES) SÜRMEİOĞLU**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ninel ALVER**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Sunuş Tarihi : 21.09.2016**

**Bornova-İZMİR**

**2016**



Setenay (EREEŞ) SÜRMEİİÖĞLU tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Reaktif Pudra Beton İçerikli Betonarme Kirişlerin Göçme Mekanizmalarının Akustik Emisyon Yöntemiyle Belirlenmesi” başlıklı bu alışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 21.09.2016 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Doç.Dr. Ninel ALVER. ....

Raportör Üye : Doç.Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR ..

Üye : Doç.Dr. Özgür ÖZÇELİK ..



**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Reaktif Pudra Beton İçerikli Betonarme Kirişlerin Göçme Mekanizmalarının Akustik Emisyon Yöntemiyle Belirlenmesi” 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.

21 / 09 / 2016

İmzası

Setenay (EREEŞ) SÜRMEİİOĞLU





**ÖZET****REAKTİF PUDRA BETON İÇERİKLİ  
BETONARME KİRİŞLERİN GÖÇME MEKANİZMALARININ  
AKUSTİK EMİSYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

(EREEŞ) SÜRMEİİOĞLU, Setenay

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ninel Alver

Eylül 2016, 113 sayfa

Mikro yapı mühendisliği yaklaşımıyla geliştirilmiş yüksek çimento içerikli Reaktif pudra betonu (RPB) yüksek performanslı özel bir beton türüdür. RPB'nin yapısal anlamda kullanımı arttıkça mekanik ve kırılma davranışının bilinmesi, davranışların standartlaştırılması ihtiyacı doğmuştur. Malzeme gelişimi açısından çeşitli araştırmalar yapılsa da RPB ile üretilmiş kirişlerin eğilme davranışını, kırılma mekanizmasını inceleyen yapısal boyutlu numuneler içeren çalışmalar çok sınırlıdır. Akustik Emisyon (AE) tekniği, farklı yapılarda hasarı ve hasarın gelişimini algılamak ve görüntülemek için sıklıkla kullanılan tahripsiz test yöntemlerindedir. RPB'deki yük altında oluşan kılcal çatlak gelişimlerin ve çatlakların hareketini belirlemek AE yöntemi ile mümkündür. Bu çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak ön beton dökümleri gerçekleştirilerek optimum bir karışım elde edilmiş, daha sonra bu optimum karışım ile 3 farklı donatı detayına sahip 125x250x1500 mm RPB betonarme kirişler laboratuvar koşullarında üretilmiş ve son olarak üretilen kirişler üzerinde mekanik ve AE deneyleri gerçekleştirilerek RPB kirişlerin kırılma mekanizmaları incelenmiştir. Deney sonucunda, ortalama frekansın düştüğü, AE enerjisinin arttığı noktalar mekanizmaların oluştuğu noktalara işaret etmektedir. RPB eleman sünekleştikçe daha az enerji açığa çıkaran mikro seviyedeki çatlaklar oluşmaktadır. RPB'deki lifler, çatlağın makro boyuta ulaşmasını geciktirmekte ve böylelikle, eleman belirgin şekilde kesmeden kırılrsa da normalden daha sünek davranmakta ve AE grafiklerinde kademeli artışlar olmaktadır.

**Anahtar sözcükler:** reaktif pudra beton, RPB, akustik emisyon, AE, kırılma mekanizması.



**ABSTRACT****DETERMINATION OF FRACTURE MECHANISMS OF REACTIVE  
POWDER CONCRETE (RPB) BEAMS BY ACOUSTIC EMISSION  
METHOD**

(EREEŞ) SÜRMEİİOĞLU, Setenay

MSc in Civil Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ninel Alver

September 2016, 113 pages

Reactive powder concrete (RPB) is a high-performance-concrete that contains high amount of cement. With increase in structural use of RPB, recognition and standardization of its mechanical and fractural behaviour is in need. Although many studies have been conducted on material development, studies investigating bending behavior and fracture mechanisms of RPB beams are limited. Acoustic emission (AE) method is one of the frequently used nondestructive techniques to detect and monitor the defect and its progress. It is possible to determine development and motion of micro cracks under loading in RPB by using AE method. This study consists of three parts. Firstly, preliminary RPB castings were carried out and optimum RPB mixing was obtained. Afterwards RPB beams which were 125x250x1500 mm in dimension and containing 3 different reinforcement details were produced under the laboratory conditions. Finally, fracture mechanisms of these three beams were investigated by mechanical and AE tests. As a result of the tests, the points where the average frequency decreases and the AE energy increases indicate to fracture of the elements. The more ductile RPB beam had much more micro cracks with more number and with less energy. Steel fibers retard the development of macro cracks and thus, the beam behaves more ductile although it fails due to shear and gradual increases occur in AE graphs.

**Keywords:** reactive powder concrete, RPC, acoustic emission, AE, fracture mechanism.



## TEŞEKKÜR

Deneysel çalışmalarımı düzenleyen, ekipman ve malzeme tedarikini sağlayıp çalışmaların aksamadan devam etmesi için elinden geleni yapan, bilgi ve tecrübesi ile her zaman yanımda olan tez danışmanım Doç. Dr. Ninel ALVER' e teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırma konusu ile beni tanıştıran değerli hocam Doç.Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR'a, bu araştırma için beni yönlendiren, bilgi ve tecrübesi ile karşılaştığım zorlukları aşmama yardımcı olan, gerekli laboratuvar olanaklarının sağlanmasında, deneysel çalışmaların sürdürülmesinde ve yazım aşamasında desteğini esirgemeyen Araştırma Görevlisi Cihat YÜKSEL, Ali MARDANI, H. Süleyman GÖKÇE, Murat TUYAN' a, laboratuvar çalışmalarında yönlendirme sağlayan Doç. Dr. Yalçın ALVER'e, beton basınç testleri için İTÜ laboratuvar imkanlarını kullanmamıza yardımcı olan Yrd.Doç.Dr. Oğuz GÜNEŞ' e, elektrik ve elektronik konularında yardımcı olan Okan TANIL'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar sırasında uzun saatler boyunca yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Selahattin AYDEMİR, Zübeyir ARTUN, Selçuk YORULMAZ, Sena TAYFUR, Hojjat HOSSEİNNEZHAD' a, ayrıca her zaman eğitimimizi destekleyen ve deney ekipmanı sağlayan beraber çalıştığımız işverenlerim Selim ARDALI-Aslı ODABAŞI ve mesai arkadaşlarım Ardali İnşaat ekibine teşekkürü borç bilirim.

Çok sevdiğim ve değer verdiğim, geç saatlere kadar süren deneysel çalışmalar süresince beni yalnız bırakmayan eşime ve aileme maddi, manevi desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Setenay (EREEŞ) SÜRMEİİOĞLU

İzmir, 2016



**İÇİNDEKİLER****Sayfa**

ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
TEŞEKKÜR.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
TABLolar DİZİNİ.....	xxi
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xxiii
1.GİRİŞ.....	1
2. REAKTİF PUDRA BETON (RPB).....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. RPB Tanımı ve Özellikleri.....	5
2.3. RPB Uygulama Alanları ve Yapılan Çalışmalar.....	8
3. AKUSTİK EMİSYON (AE) YÖNTEMİ.....	19
3.1. Giriş.....	19
3.2. AE Çalışma Prensibi.....	22
3.3. AE Sinyallerinin Parametreleri ve Yorumlanması.....	24
3.4. AE'nin Tarihsel Gelişimi.....	27
3.5. AE-SIGMA Analizi.....	28
3.6. AE Uygulama Alanları ve Yapılan Çalışmalar.....	30

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
4. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	35
4.1. Materyal .....	35
4.1.1. Bağlayıcı malzemeler.....	35
4.1.2. Agrega.....	36
4.1.3. Çelik lif .....	37
4.1.4. Akışkanlaştırıcı .....	38
4.1.5. Su .....	39
4.2. Metot .....	40
4.2.1. Karışım Dizaynları .....	40
4.2.2. Karışımın hazırlanması .....	48
4.2.3. Kıvamın belirlenmesi.....	49
4.2.4. Harcın kalıba yerleştirilmesi .....	49
4.2.5. Kütleme.....	50
4.2.6. Basınç dayanımlarının belirlenmesi.....	52
4.2.7. Eğilme dayanımlarının belirlenmesi .....	52
4.2.8. RPB kiriş deney elemanlarında donatıların hazırlanması .....	53
4.2.9. Kiriş yükleme düzeneği .....	55
4.2.10. AE düzeneği.....	56



**İÇİNDEKİLER (devam)****Sayfa**

4.2.11. Çalışmada kullanılan AE parametreleri .....	58
5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	59
5.1. Optimum RPB karışımının seçilmesi.....	59
5.2. RPB Kiriş Numunelerinin Mekanik Deney Sonuçları .....	66
5.2.1. K1 numunesi .....	66
5.2.2. K2 numunesi .....	69
5.2.3. K3 numunesi .....	72
5.2.4. Enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesi.....	75
5.3. RPB Kiriş Numunelerinin AE Deney Sonuçları.....	76
5.3.1. K1 numunesi .....	76
5.3.2. K2 numunesi .....	82
5.3.3. K3 numunesi .....	87
5.4. K1, K2 ve K3 Numunelerinin Mekanik ve Akustik Deney Sonuçlarının Birbiriyle Karşılaştırılması.....	92
5.4.1. Mekanik deney sonuçları .....	92
5.4.2. AE deney sonuçları .....	93
6 . SONUÇ .....	97
7 . ÖNERİLER.....	101

**İÇİNDEKİLER(devam)****Sayfa**

KAYNAKLAR DİZİNİ .....	103
ÖZGEÇMİŞ .....	113
EKLER.....	
Ek 1 Grup-1 Deney Sonuçları Tablosu .....	
Ek 2 Grup-2 Deney Sonuçları Tablosu .....	
Ek 3 Grup-3 Deney Sonuçları Tablosu .....	
Ek 4 Grup-5 Deney Sonuçları Tablosu .....	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Alttan gergili köprü sistemi (Jungwirth ve Muttoni, 2014) .....	11
2.2. Shepherd's Gully Creek Köprüsü'nün (a) kesiti, (b) bir I kirişinin detay çizimi (Cavill ve Chirgwin, 2004).....	13
2.3. (a) Parabolik ark bilgisayar destekli görüntüsü, (b) Penrose istasyonu (Rebentrost ve Annan, 2008) .....	14
2.4. RPB katmanla güçlendirilmiş köprü tabliyesi (Makita ve Brühwiler, 2014).....	15
2.5. Deneysel çalışmada kullanılan kiriş detayları (Yang vd., 2010) .....	17
2.6. Deneysel çalışmada kullanılan kiriş detayları (Kamal vd., 2013) .....	18
2.7. Deneysel çalışmada kullanılan kiriş detayları (Menefy, 2007).....	18
3.1. Elastik dalga metotlarının şematik gösterimi; (a) ultrases yöntemi, (b) darbe-eko yöntemi, (c) akustik emisyon yöntemi (Zaki vd., 2015 modifiye edilmiştir.) .....	21
3.2. Akustik izleme sistemi çalışma prensibi (Nair ve Cai, 2010).....	22
3.3. AE izleme sistemi (Hutton ve Ord, 1970).....	23
3.4. AE sinyal parametreleri (Gholizadeh vd., 2015) .....	25
3.5. Kaiser ve Felicity etkisi (Nair ve Cai, 2010).....	27
3.6. Çatlak sınıflandırılması: (a) çekme çatlağı, (b) karışık mod-çatlağı, (c) Kesme çatlağı (Ohtsu ve Kawasaki, 2010) .....	29
4.1. Agregat elek analizi.....	37

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2. Çelik lifler: (a)SF-1 çelik lif yığını, (b) tanesi, (c) SF-2 çelik lif yığını, (d) tanesi .....	38
4.3. Akışkanlaştırıcılar: (a) “SP” – BCS PB süperakışkanlaştırıcı, (b) “HP”- Levelcon FX10 hiperakışkanlaştırıcı .....	39
4.4. RPB karışımlarının hazırlanma süreci .....	47
4.5. Standart harç mikseri ve toz malzemeler .....	48
4.6. Ön dökümler için kıvam deneyi.....	49
4.7. Kiriş numuneler (125x250x1500mm) için 90°C sıcak su kürü havuzu .....	52
4.8. Kiriş yükleme düzeneği .....	55
4.9. Deplasman ölçer.....	55
4.10. Sensör yerleşim şeması (mm) .....	56
4.11. AE düzeneği elemanları: (a) bilgisayarlı veri toplama sistemi, (b) ana toplayıcı, (c) önyükselteç, (d) sensör .....	57
4.12. AE düzeneği elemanları .....	58
5.1. Grup-1 deney sonuçları.....	59
5.2. Grup-2 deney sonuçları.....	60
5.3. Grup-3 deney sonuçları.....	61
5.4. Grup-4 deney sonuçları.....	63
5.5. Grup-5 eğilme deneyi sonuçları .....	64

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6.Grup-5 basınç deneyi sonuçları.....	65
5.7. Eğilme deneyinden (a) önce, (b) sonra K1 elemanı.....	67
5.8. K1 elemanı kırılma detayı.....	68
5.9. K1 numunesinin yük - deplasman grafiği.....	69
5.10 Eğilme deneyinden (a) önce, (b) sonra K2 elemanı.....	70
5.11. K2 elemanı kırılma detayı.....	71
5.12. K2 numunesinin yük - deplasman grafiği.....	71
5.13. Eğilme deneyinden (a) önce, (b) sonra K3 elemanı.....	73
5.14. K3 elemanı kırılma detayı.....	74
5.15. Kırılmadan sonra yüklemeye devam edildiğinde (a) K3 elemanı ve (b) kırılma detayı.....	74
5.16. K3 numunesinin yük - deplasman grafiği.....	75
5.17. K1 elemanının AE enerji grafiği.....	77
5.18. K1 elemanının AE ortalama frekans grafiği.....	78
5.19. K1 elemanının AE süre grafiği.....	79
5.20. K1 elemanının AE genlik grafiği.....	80
5.21. K1 elemanının (a) 20. sn' den önceki ve (b) 20. sn'den sonraki RA değeri grafiği.....	81
5.22. K2 elemanının AE enerji grafiği.....	83

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.23. K2 elemanın ortalama frekans grafiği.....	84
5.24. K2 elemanın süre grafiği.....	85
5.25. K2 elemanın genlik grafiği .....	86
5.26. K2 elemanın (a) 20. sn'den önceki ve (b) 20. sn'den sonraki RA değeri grafiği .....	87
5.27. K3 elemanın AE enerji grafiği.....	88
5.28. K3 elemanın ortalama frekans grafiği.....	89
5.29. K3 elemanın süre grafiği.....	90
5.30. K3 elemanın genlik grafiği .....	90
5.31. K3 elemanın (a) 20. sn'den önceki ve (b) 20. sn'den sonraki RA değeri grafiği .....	91

**TABLolar DİZİNİ**

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Çimento, silis duman ve uçucu külün kimyasal ve mekanik özellikleri.....	36
4.2. Kimyasal katkıların özellikleri.....	39
4.3. Grup-1 dökümlerinin karışım dizaynları.....	41
4.4. Grup-2 dökümlerinin karışım dizaynları.....	42
4.5. Grup-4 dökümlerinin karışım dizaynları.....	44
4.6. Grup-5 dökümlerinin karışım dizaynları.....	45
4.7. RPB kirişlerin karışım dizaynı, kg/m <sup>3</sup> .....	46
4.8 . Çalışmada kullanılan kür yöntemleri .....	52
4.9. RPB kiriş elemanlar K1 - K2 ve K3 için donatı detayları .....	54
4.10. Sensör koordinatları (cm).....	57
5.1. Grup-4 deney sonuçları .....	63
5.2. Enerji yutma kapasiteleri .....	75
5.3. Mekanik deney sonuçları ve birbirine oranları .....	93
5.4. AE deney sonuçları ve birbirine oranları .....	94
5.5. Belirgin kırılma noktalarındaki yaklaşık değerler.....	95





**SİMGE VE KISALTMALAR**

AE	Akustik Emisyon
CDP	Beton Hasar Plastisite Modeli
HP	Hiperakışkanlaştırıcı
NDT	Tahripiz Test Yöntemleri
RA değeri	Yükselme zamanı/genlik ( <b>R</b> ise Time/ <b>A</b> mplitude)
RPB	Reaktif Pudra Beton
s/b	su/bağlayıcı oranı
SD	Silis Dumanı
SF	Çelik Lif
SP	Süperakışkanlaştırıcı
UHPC	Ultra Yüksek Dayanımlı Beton
UK	Uçucu kül
YDB	Yüksek Dayanımlı Beton



## 1.GİRİŞ

Modern beton; çimento, su ve agreganın basit bir karışımından daha fazlasıdır ve çoğunlukla mineral bileşenler, kimyasal katkıları ve lifler içerir. Bu betonların gelişmesi, yeni beton ve katkı biliminin ortaya çıkışının ve bu özel bilim alanlarının beton mikro ve nano yapısını gözlemek için kullanılmasının sonucudur (Aİtcin, 2000).

Hızla gelişen yüzyılda, az bakım gerektiren, uzun ömürlü ürünlerle birlikte yapım ve işletme verimliliği sağlamak gibi hedefler düşünüldüğünde çok yüksek performanslı özel bir beton türü olan reaktif pudra betonun (RPB) yapı malzemesi olarak kullanımı ön plana gelmiştir. Yakın zamandaki, büyük açıklıklı köprü ve çok katlı yüksek yapı inşaatına eğilim; güvenlik, elverişlilik, durabilite ve ekonomik avantajlarından dolayı yüksek dayanımlı betonların kullanımını zorunlu hale getirmiştir (Yi vd., 2012).

RPB'nin yapısal anlamda kullanımı arttıkça mekanik ve kırılma davranışının bilinmesi, davranışların standartlaştırılması ihtiyacı doğmuştur. Son yıllarda, RPB'nin malzeme bilimi bazında gelişimi, yapısal boyutlu elemanlarda mekanik davranışlarının saptanması önem kazanmıştır. Ancak yapılan çalışmalar sınırlı kalmıştır. RPB'deki kılcal çatlak gelişimlerini, göbek betonunda gelişen gözle görünmeyen mikroskobik çatlakları, oluşan kılcal çatlakların yük altında gelişimlerini ve çatlakların hareketini belirlemek Akustik Emisyon (AE) yöntemi ile mümkündür.

Bu çalışmada öncelikle ön dökümler gerçekleştirilerek RPB karışımı araştırılmıştır. Daha sonra basınç dayanımı ve yayılma değerleri açısından optimum seçilen RPB karışımı ile laboratuvar koşullarında 125x250x1500 mm boyutlu kiriş elemanlar üretilmiş ve ardından AE yöntemiyle RPB kirişlerinin kırılma mekanizmaları incelenmiştir.



## 2. REAKTİF PUDRA BETON (RPB)

### 2.1. Giriş

Modern beton, çimento, agrega, su ve uygun katkı maddelerinin belirli bir üretim teknolojisi ile belirli oranlarda homojen karışımıyla elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidrasyonu sebebiyle katılaşır ve istenilen şekli alabilen kompozit bir yapı malzemesidir (Şimşek, 2009). Gelişen beton teknolojisi ile yeni malzemeler ve yeni üretim teknikleri geliştirilmeye devam etmektedir (Baradan vd., 2012).

Çimento endüstrisinde ve beton teknolojisindeki gelişmeler dört ana grupta toplanabilir:

- 1- Çimento türlerini artırmak,
- 2- Endüstriyel atıkları çimento ve beton üretiminde değerlendirmek,
- 3- Kimyasal katkılarla betonlara belirli özellikler kazandırmak,
- 4- Yeni beton tasarım ve üretim teknikleri geliştirmek (özel betonlar).

Bu çalışmalarda ekonominin sağlanması, beton dayanım ve dayanıklılığının artırılması genellikle en etkili faktörler olmuştur. Portland çimentosu klinkerinin bir bölümünü doğal puzolanlarla yer değiştirmek önemli bir ölçüde ekonomik yarar sağladığı için çimento türlerinin çeşitlenmesinde öncelik taşımıştır. Malzeme bilimindeki gelişmeler çimento ve beton endüstrisinde kullanılabilecek yan ürünlerin yani cüruf, uçucu kül gibi endüstriyel atıkların elde edilmesini sağlamıştır. Elektrik çağının gelişmesi de beton bağlayıcılarında yeni bir dönem açmıştır. Silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarının bacalarında tutulan silis dumanları (mikrosilis) portland çimento tanelerinden daha ince aktif silis ( $\text{SiO}_2$ ) içermektedir. Bunlar da uçucu küller gibi çimento üretiminde veya yüksek performanslı betonların elde edilmesinde direkt olarak belirli oranlarda kullanılmaktadır (Akman, 2003; Yeğınobalı, 2009).

Çimento ve beton sektöründe mineral katkıları dışında kimyasal katkı maddeleri de vardır. Kimyasal katkıları, taze betonun işlenebilmesini arttırmayı, priz ve sertleşme süresini uzatma veya kısaltmayı, taze ve sertleşmiş betonun donma-çözölmeye ve kimyasal etkilere dayanıklılığını geliştirmeyi sağlamak üzere kullanılırlar. Dayanımı aşırı yükselten, çok düşük su/bağlayıcı oranı ile yüksek işlenebilme sağlayan süper

akışkanlaştırıcılar 1960-1970 yılları arasında bulunmuştur. Bu katkılar beton teknolojisinde bir devrim başlatmıştır. İlk önce melamin sülfonat formaldehit (Aignesberger, Almanya) ve naftalen sülfonat formaldehit (Hattori, Japonya) süperakışkanlaştırıcıları üretilmiştir. Bunlar yapı itibarı ile birer polimerdir, yıllardır 0,42'nin altına düşürülemeyen su/çimento oranları dikkate değer düzeyde azaltılabilmektedir, böylelikle dayanım değerlerinde de bir sıçrama meydana gelmiştir. Süper akışkanlaştırıcılı betonların çimento taneleri arasındaki boşlukları silis dumanı ile doldurulunca sağlanan dayanım daha da artırılabilmiştir; eskiden oldukça zorlukla sağlanan 30 MPa'lık dayanım yerine günümüzde artık 120-130 MPa ve hatta daha fazla dayanımlı betonlar üretilmektedir. Son yıllarda süper akışkanlaştırıcılarda da ilerlemeler sağlanmıştır. Melamin ve naftalen sülfonat esaslı katkılar yerine geliştirilmiş karboksilik esaslı katkılarla hiperakışkanlaştırıcılar üretilmeye başlanmıştır. Agregaların boyutları çok küçültülerek ve s/ç oranları 0,09'a indirilerek reaktif toz harçları elde edilmiş, bunların dayanımı 700~800 MPa'ı bulmuştur (Akman, 2003).

Tüm bu gelişmelerle birlikte birçok beton çeşidi üretilmiştir. Bunlar:

-Geleneksel Betonlar,

-Özel Betonlar: Genel olarak betonlar birim ağırlıklarına, kullanıldığı agregaya ve uygulama şekline göre isimlendirilir. Bazı durumlarda, yapının özelliğine göre beton üretilmektedir. Yapı elemanının özelliğine göre üretilen betona özel beton denir. Bu betonlar, genellikle beton karışım dizaynı değiştirilerek, normal agregaya ve çimento kullanılarak, beton üretim tekniğinde değişiklik yapılarak veya beton üretimi sırasında özellik değiştiren katkı maddesi kullanılarak üretilir. Bunlara ek olarak yukarıda sayılan birkaç özelliğin bir arada kullanılmasıyla beton üretmek uygulanacak yere ve kullanım amacına göre daha iyi sonuçlar verir (GN İnşaat, 2017). Son yıllarda üretilip uygulanan pek çok özel beton çeşidi vardır. Bu beton çeşitleri şunlardır: Düşük dayanımlı, yüksek dayanımlı, püskürtme, lifli, ferrocement, su altında döküm, vakumlu, silindire sıkıştırılmış, kendiliğinden yerleşen, SIFCON, SIMCON, prepakt, polimer, ağır, hafif, RPB olarak dayanım, kullanım amacı ve döküm gibi özelliklerine göre sınıflandırılabilir (Baradan vd.,2012; GN İnşaat, 2017).

Bu çalışmada deneyler için laboratuvar koşullarında elde edilen RPB betonu kullanılmıştır.

## 2.2. RPB Tanımı ve Özellikleri

Reaktif Pudra Betonu (RPB) mikro yapı mühendisliği yaklaşımıyla geliştirilmiş yüksek çimento içerikli yeni nesil kompozit bir malzemedir (Topçu ve Karakurt, 2005). RPB; çok düşük su/çimento oranında çimento ve silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı ve çok ince öğütülmüş agrega içeren, liflerle güçlendirilmiş, yüksek dayanımlı kompozit olarak da tanımlanabilir (Şimşek, 2012). İlk kez 1990'lı yıllarda Fransa'da Bouygues'in laboratuvarlarındaki araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (Topçu ve Karakurt, 2005).

RPB'de yüksek dayanımlar elde edilmesi sıkı tane düzeninin ve iyileştirilmiş mikro yapının bir sonucudur (Şimşek, 2012).

Normal çimento içerikli kompozitlerle karşılaştırıldığında RPB'nin en belirgin özelliği homojen yapısı, düşük boşluk oranı ve güçlendirilmiş çimento matrisidir (Şimşek, 2012).

Yüksek dayanımlı betonlar (60-120 MPa) inşaat sektöründe uzun süredir kullanılmaktadır.

Bu yüksek mekanik özelliklere, betonda su/çimento oranı azaltılarak, karışımda silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak ulaşılmaktadır. Bu sayede çimento hamurunun porozitesinde azalma, beton dayanıklılığında ise artış elde edilmektedir. RPB ise aşağıdaki dört ana prensibin uygulanması sayesinde elde edilir (Topçu ve Karakurt, 2005) :

- 1- Bütün iri agregaların karışımdan çıkarılması ile malzeme homojenliğinin artırılması,
- 2- Tane çapı düzenlemesi ve iyi bir sıkıştırma ile boşluksuz bir beton elde edilmesi,
- 3- Sıcaklık kürü ile mikro yapının geliştirilmesi,
- 4- Karışıma çelik lif ilavesiyle malzeme sünekliğinin artırılması.

Karışımda çok ince agrega kullanılması sayesinde yapıdaki mikro boşluklar azaltılarak betonun basınç ve eğilme dayanımında artış sağlanır. Normal betonlarda kullanılan rijit agrega tanelerinin birbirine teması sonucu matris boyunca oluşan ara yüzdeki boşluklar tane çapının azaltılmasıyla ortadan kaldırılmakta, agrega/hamur oranının azaltılması ile karışım daha homojen yapıda olmaktadır. Karışımda

gerçekleştirilen bu düzenleme ile betonun porozitesi azaltılmakta donma-çözülme gibi çevresel etkilerine karşı direnci ise artmaktadır. Karışımda ince taneli agreganın çok ince taneli silis dumanı ile birlikte kullanılması agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki temas yüzeyini artırarak mekanik özelliklerini iyileştirmektedir (Şimşek, 2009; Baradan vd., 2012; Topçu ve Karakurt, 2005 ).

Çimento tanelerinden 50-60 kat daha ince olan silis dumanı kullanılması ile mikro boşlukların azaltılması hedeflenmektedir (Sadrekarimi, 2004; Topçu ve Karakurt, 2005). Silis dumanının özgül ağırlığı da portland çimentosuna göre %20-30 daha hafiftir (Erdoğan, 2010).

RPB'deki silis dumanının 3 önemli etkisi Richard ve Cheyrezy (1995)' de şöyle belirtilmiştir:

- 1- İri taneler arasındaki boşlukların doldurulması,
- 2- Temel taneciklerin mükemmel küreselliğinin sonucu yağlanma etkisi ile reolojik karakteristiklerin iyileştirilmesi,
- 3- Birincil hidrasyondan oluşan kireçle puzolanik reaksiyonu sonucu ikincil hidratların üretimi.

Kompozitin sıkılığı taze betona priz sırasında etkiyen basınç kuvveti ile artırılmaktadır. İlk olarak 1930'lu yıllarda Eugene Freyssinet taze betona priz sırasında uygulanacak basınç kuvvetinin, betonun basınç dayanımını artırmada olumlu etkisi olduğunu söylemiştir. Uygulanan kuvvetle betonun karıştırılması sırasında bünyesine aldığı hava kabarcıkları ve hidrasyon için gerekli su miktarından fazla olan su dışarı atılmakta, böylece porozite azalmaktadır. Sıkıştırma işlemi ile betonun birim ağırlığı da %5 oranında artmaktadır (Topçu ve Karakurt, 2005; Şimşek,2012). RPB' deki sıkıştırma basıncının etkisi Richard ve Cheyrezy (1995)' de de benzer şekilde belirtilmiş ve 3 maddede özetlenmiştir (Sadrekarimi, 2004):

- 1- Hava boşluklarının uzaklaştırılması,
- 2- Fazla suyun uzaklaştırılması ve
- 3- Kimyasal büzölmelerin dengelenmesi.

Boşlukların azaltılarak sıkılığın artırılmasının bir diğer avantajı da karışım suyunun azaltılabilmesini sağlamasıdır (Şimşek,2009). RPB' de su/çimento oranı çok düşük olup 0,15 seviyesindedir. İşlenebilme fazla miktarda kullanılan yeni kuşak bir



süperakışkanlaştırıcı ile sağlanmaktadır. Bu sayede mekanik dayanım olarak RPB, yüksek dayanımlı betonlara göre 2-4 kat daha fazla dayanım verebilmektedir (Topçu ve Karakurt, 2005).

Çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde sıcaklık kürü uygulanması bilinen en klasik yöntemdir (Topçu ve Karakurt, 2005). Buhar kürü ve yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav) uygulanarak dayanımlar oldukça yüksek seviyelere çıkarılabilmektedir (Baradan vd., 2012). 1960'lı yıllarda yüksek sıcaklık ile artan basınç kürü uygulanarak beton basınç dayanımı 650 MPa'a ulaşmıştır (Topçu ve Karakurt, 2005).

Prizi aldıktan sonraki ısı işlemler RPB mikro yapısı değişiklikleri ve fazla suyun çıkışını sağladığından silis ve kuvarsın puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak için gereklidir (Shaheen ve Shrive, 2006). Sıcaklığın en büyük etkisi hidrasyon ürünü malzemelerin daha iyi kristalleşmesi ve silis içerikli filler malzemelerin puzolanik reaksiyonunun başlaması şeklindedir (Şimşek, 2009). Prizin ardından ısı işlemler  $\text{CaO/SiO}_2$  (kalsiyum oksit / silisyum dioksit) ve su/CaO oranlarını azaltarak hidrat ürünlerinin kimyasal yapısını modifiye etmektedir (Tam vd., 2010). Hidrotermal koşullarda kirecin silisle reaksiyona girmesi sonucu  $200^\circ\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklarda tobermorit ( $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  veya  $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ ), daha üstü sıcaklıklarda da karışımdaki  $\text{CaO/SiO}_2$  oranına bağlı olarak truskotit, gyrolit, zonotlit ( $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$ ) ve hillerbrandit oluşmaktadır (Şimşek, 2009; Ng vd., 2010).  $250^\circ\text{C}$  de zonotlit oluşumu Cheyreyz vd. (1995), Zanni vd. (1996) gibi başka çalışmalarda da doğrulanmıştır (Tam vd., 2010). Priz sonrası sıcaklık kürü uygulanan RPB' lerde uygulanmayanlara oranla %60-70 daha fazla dayanım elde edilmektedir (Şimşek, 2012). Sonuç olarak sıcaklığın yükselmesi betonun erken yaşlardaki hidrasyonunu hızlandırmakta bu nedenle de basınç dayanımını iyileştirmektedir. Fakat aynı zamanda da erken yaşlardaki hızlı hidrasyon otojen büzülmelerin hızlı bir şekilde gelişimine neden olmaktadır (Tam vd., 2010).

Çok yüksek dayanıma sahip RPB'ler aşırı gevrek dayanım gösterir. Bu sorunu gidermek için genellikle kısa kesilmiş çelik lifler kullanılır. Mikro çelik liflerin de kullanımıyla 50 MPa kadar olağanüstü eğilme dayanımları elde edilebilmektedir. 13 mm uzunluğunda ve 0,15 mm çapında düz çelik liflerin hacimce %1-3 kullanılması yeterli olmaktadır (Baradan vd., 2012).

RPB hazırlanışı sırasında özel yöntemlerin kullanılması teknik ekipman ihtiyacını arttırmaktadır. Bu nedenle şantiye ortamında RPB üretimi, prefabrike

yönteme göre daha güçtür. Tüm bu etkenler RPB'nin üretim maliyetini yükseltmektedir (Baradan vd., 2012).

### 2.3. RPB Uygulama Alanları ve Yapılan Çalışmalar

RPB; ince cidarlı yüksek basınçlı su ve buhar borularında, altyapıda rögar kapaklarında, patlamaya dirençli güvenlik duvarlarında, ince taşıyıcı duvarlarda, tünel yapılarında, depremden hasar görmüş yapıların güçlendirilmesinde ve yüksek dayanım ve dayanıklılık istenen her projede kullanılabilir. Ayrıca, bağlantısız ve düşük porozitesi ile kütle transferini azaltarak, sıvı/gaz veya radyoaktif maddelerin penetrasyonu hemen hemen ortadan kaldıracığından nükleer atıkların depolarında da kullanılabilir (Şimşek,2012; Baradan vd., 2012).

Ultra yüksek dayanımlı düktil betonlar üretme ve geliştirme amacıyla Bouygues laboratuvarında (Fransa) bir araştırma programı üstlenilmiştir. Bu araştırmalar neticesinde farklı üretim teknikleri ve karışım oranlarıyla 170 MPa ile 810 MPa aralığında basınç dayanımlarına sahip ilk RPB'ler üretilmiştir (Richard ve Cherezy, 1995).

RPB'nin gelişiminde malzeme bazında deneyler yapılmış, silis oranı, çelik lif ilavesi, kür yöntemleri, taze halde sıkıştırma basıncı uygulaması gibi değişkenlerle birçok çalışma yapılmıştır (İpek vd.,2012; Yazıcı vd.,2013).

Chan ve Chu (2004), silis dumanı içeriğinin çelik lif bağ karakteristiği üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, silis dumanının lif-matris ara yüzü özelliklerini özellikle de lif çekme enerjisini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca bağ karakteristiği açısından verilen deneysel program koşullarında optimum silis dumanı oranı %20-%30 olarak bulunmuştur.

Sadrekarimi (2004), çalışmasında ilk hafif RPB'yi bağlayıcı malzemede yüksek oranda silis dumanı kullanarak geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, yüksek silis dumanı içerikli RPB örnekleri üzerinde deneyler yapılmış ve yüksek silis içeriğinin basınç dayanımını yükselttiği fakat yoğunluğu düşürdüğü belirtilmiştir. Numunelere, hepsi eşit koşullarda bir hafta suda, 18 gün 90°C suda bekledikten sonra 90°C ve 240 °C fırında olmak üzere 2 farklı türde kür uygulanmıştır. Numunelerin bazılarında ilk 24 saatlik süre içinde 40 MPa basınç uygulanmış, bazılarında ise hiç uygulanmamıştır. Bu çalışmada, 142-370 MPa arası basınç dayanımları elde edilmiştir.

Yunsheng vd. (2008), yeşil RPB çalışmasında mineral katkıları, doğal ince agrega, kısa çelik teller kullanarak 3 farklı kür rejimi ile 200 MPa dayanımlı reaktif pudra betonun yeni bir tipini üretmeyi ve statik -dinamik davranışlarını incelemeyi amaçlamıştır. Bu karışımın kürleri karşılaştırıldığında lifsiz olarak otoklav küründe en yüksek dayanım 158 MPa olarak elde edilmiştir. Bu karışıma %4 lif ilave edildiğinde ise dayanım 30-50 MPa kadar artarak 200 MPa'nın üzerine çıkmış, eğilme dayanımı da 60 MPa civarında elde edilmiştir. Yunsheng ve arkadaşları, %4 lif içeren karışımın 20 °C' de 180 gün düşük enerjili küründe, 90 °C buhar küründe ve 200 °C otoklav küründe yakın dayanımlar verdiğini ve bu yöntemlerle 200 MPa dayanıma sahip RPB' ler üretilbileceğini gözlemiştir.

Yazıcı vd. (2009) çalışmalarında, C-sınıfı uçucu kül ve öğütülmüş cürufun farklı oranlarda kullanarak üretilen RPB'nin basınç, eğilme dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerini farklı kür koşulları altında araştırmışlardır. 40x40x160 mm boyutlarında numuneler üretilip 16 saat sonunda kalıptan çıkartıp, 8 saat 210 °C otoklav, 3 gün 100 °C buhar kürü veya 20 °C standart su kürü olmak üzere üç çeşit kür yöntemi kullanmışlar, 200-273 MPa aralığında basınç dayanımları elde etmişlerdir. Test sonuçları RPB'nin standart su kürü ile karşılaştırıldığında buhar ve otoklav kürü altında daha yüksek dayanımlar elde edildiğini göstermiştir. Diğer yandan buhar ve otoklav kürünün eğilme dayanımı ve tokluğu azalttığı görülmüştür. Uçucu kül ve cüruf içeriğinin artması ile tokluğun arttığı kaydedilmiştir. Ayrıca elektron mikroskobu ile RPB'nin içyapısını incelemişlerdir.

Tam vd. (2010), çalışmalarında yerel malzemeler kullanarak RPB'nin basınç dayanımı üzerinde etkili olan optimum s/b oranı; kuvars kumu boyutları; katkı dozajı, kürlenme türü (fırın – buhar – su - hava), ısıtma sıcaklığı ve süresini araştırarak optimum koşullarını belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışma optimum olarak değerlendirildiğinde, pratik ve ekonomik açıdan en yüksek dayanımı 144,5 MPa olarak s/b oranı 0,2 olacak şekilde, %2,5 akışkanlaştırıcı miktarı ve 0,15-0,6 mm tane boyutlu kuvars kumu içeren 27 °C' de suda 90 gün kürlenmiş numunelerde elde edilmiştir.

Ng vd. (2010), çalışmalarında yerel malzemeler kullanarak yüksek dayanımlı beton (YDB) ve RPB üretmeyi amaçlamışlardır. Bazı karışımlar 27 °C suda 7-14-28-56 gün, bazıları ise 100 ve 250 °C fırında 16 ve 48 saat boyunca kürlenmiştir. YDB'nin basınç dayanımları 83,4 - 138 MPa arasında, yarmada çekme dayanımı 5,25 - 5,53 MPa arasında ve elastisite modülü 28-38 GPa arasında; RPB'nin ise basınç dayanımları 95,2 -200 MPa arasında, yarmada çekme dayanımları 7.02-8.07 MPa arasında ve elastisite modülü de 39,1-45 GPa arasında elde edilmiştir.

Aydın vd. (2010), çalışmalarında korund, bazalt, kireçtaşı, kuvars, sinterlenmiş boksit ve granit gibi farklı agregalar ile üretilen RPB'nin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Karışımlar standart 20 °C su kürü, atmosferik 100 °C buhar kürü ve 210 °C yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav) koşulları altında incelenmiştir. Taze halde basınç uygulaması yüksek dayanımlı ve pürüzlü yüzeyli agrega kullanıldığında RPB'nin basınç dayanımını büyük oranda geliştirmektedir. Böylelikle, basınç uygulaması ve otoklav kürü ardından boksit agregasıyla 400 MPa'nın üzerinde dayanımlar sağlanmıştır.

Beglarigale vd. (2014) çalışmalarının amacı, çelik mikro lifin hacimsel oranı ve SiO<sub>2</sub> kaynağı olan silis dumanı dozajının otoklav kürü görmüş RPB numunelerinin mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmaktır. Yüksek performanslı çimento içerikli kompozitler % 0 - 1 - 2 hacimce çelik mikro-lif üretilmiştir. Silis dumanı 3 farklı oranda (%0-10-20) kullanılarak dokuz karışım üretilmiştir. Taze halde işlenebilirlik ve eğilme-basınç dayanımı sertleşmiş halde ölçülmüştür. Ayrıca karışımların kırılma enerjisi eğilme etkisi altında değerlendirilmiştir. Basınç dayanımları 120-213 MPa arası elde edilmiştir. 213 MPa olan basınç dayanımı %2 çelik lif, ve %20 silis dumanı ile elde edilmiştir. Otoklav kürünün kısa bir süre uygulanmasından sonra iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülse de hidrasyon ürünlerinin istenen performansın sağlanabilmesi için optimum miktarda SiO<sub>2</sub> kaynağı kullanılarak mikro ölçekte dikkatli bir şekilde dizayn edilmesinin önemi vurgulanmıştır. Ayrıca, silis dumanı kullanımının lif-matris ara yüzeyini geliştirdiği belirtilmiştir.

Gökçe vd. (2017), çalışmalarında elemanların ulaşım ve uygulamasında avantaj sağlaması amacıyla pomza agregası kullanılarak daha hafif reaktif pudra beton üretilmesini hedeflemişlerdir. Bu amaçla çalışmada, 0-1 mm aralığında pomza agregası, CEM I 42.5 R tipi çimento, silis dumanı, çelik lif ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Reaktif pudra betonun yoğunluk, su emme ve basınç dayanımları üzerinde 0-50 MPa arasında değişen ön sıkıştırma basıncının etkisi ve 20 °C standart su kürü ile 200, 235 ve 270 °C otoklav kürünün etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak sertleşmiş reaktif pudra betonların yoğunlukları 1840-2430 kg/dm<sup>3</sup>, su emme değerleri %1.4-6.3 ve basınç dayanımları 69-176 MPa aralığında elde edilmiştir. Çalışmada hafif reaktif pudra betonun yoğunluğu, reaktif pudra betonun yoğunluğundan (2,69 kg/dm<sup>3</sup>) en az %10 daha hafif elde edilmiştir. Çalışmada hafif reaktif pudra betonların su emme oranları özellikle ön sıkıştırma basıncı 0 ve 50 MPa etkisiyle birlikte % 6 seviyesinden %1.4' e kadar indirilmiştir. Çalışmada numunelerin basınç dayanımları 176 MPa'a kadar ulaşmıştır. Ön sıkıştırma basıncının 25 MPa' a kadar reaktif pudra betonun yoğunluk ve su emme özelliklerinde olduğu gibi basınç dayanımlarında da önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Özellikle 35 MPa ön

sıkıştırma basıncı uygulanmış otoklav kürü uygulanmamış numunelerinin basınç dayanımlarının 155 MPa' a kadar ulaşması ön sıkıştırma basıncının reaktif pudra betonların dayanımı üzerindeki önemli etkisinin bir kanıtıdır. Ayrıca çalışmada 5 MPa' lık ön sıkıştırma basıncının göreceli olarak 50 MPa varan ön sıkıştırma basıncı değerleriyle kıyaslandığında hafif reaktif pudra betonların yoğunluk, su emme ve basınç dayanımları üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir.

RPB uygulamada betonarme donatının bulunmaması mimari açıdan şekil ve boyutlar açısından sınırsız olanaklar sunmaktadır.

RPB yapılar için düşünülen çeşitli dizaynlar üzerine araştırmalar yapılmıştır. Köprü uygulamaları ile ilgili çalışmalar yayınlanmış ve geliştirilmesinin önemi üzerinde durulmuştur. Alttan gergili köprüler, yaya köprüleri, karayolu trafiğine açık köprüler, köprü tabliyeleri vs. bu çalışmalar arasındadır.

Jungwirth ve Muttoni (2014)'ün çalışmasında, malzeme karakteristiği dikkate alınarak RPB yapılar için çeşitli dizayn tahminleri tartışılmıştır. RPB yapıların dizaynı için bilimsel dayanaklar yayınlamak hedeflenmiştir. Odak noktası, alttan gergili köprüler için yapısal elemanlar (çubuklar, düğüm noktaları ve bağlantı elemanları) olmuştur (Şekil 2.1). En ilginç modellemenin, düğüm noktasında üç boyutlu gerilme ve öngerilmeli ya da lifle güçlendirilmiş çubuk elemanın deformasyon davranışı olacağını belirtmişlerdir. 120-180 MPa aralığında basınç dayanımları elde etmişler, 90 °C kürleme ile dayanımların arttığı kaydedilmiştir. Eklenen çelik liflerin, çekme davranışını geliştirdiği, düktiliteyi artırdığı ve mikro kırıkların dağılmasını sağladığını, bunun da pasif donatının elimine edilip yapıların sadece beton ve öngerilme halatlarından oluşturulabileceği anlamına geldiğini söylemişlerdir. Son 10 yılda, RPB karışımı üzerine birçok araştırma yapıldığından yeni yapı projelerinde RPB'nin etkili kullanımını sağlamak için yapısal ve yardımcı elemanların RPB'nin karakteristik niteliklerine adapte edilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır.

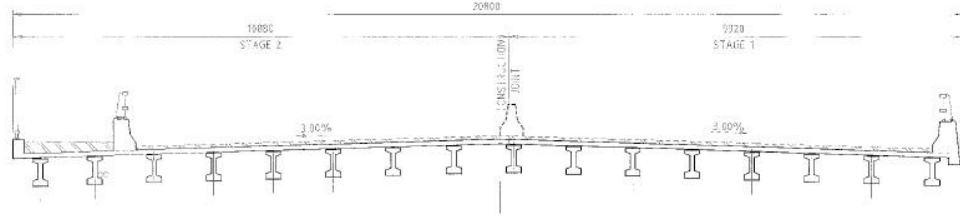


Şekil 2.1. Alttan gergili köprü sistemi (Jungwirth ve Muttoni, 2014)

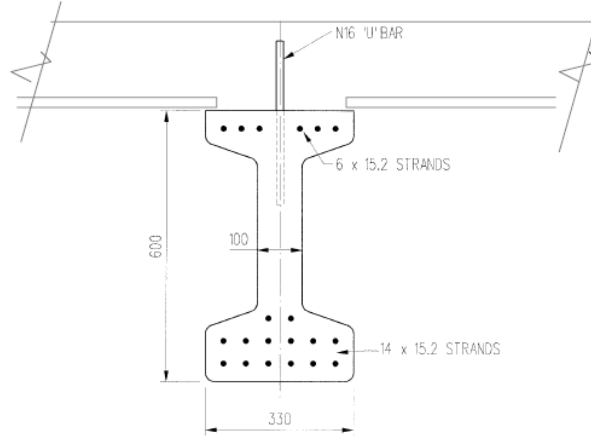
Cavill ve Chirgwin (2004) çalışmasında, Yeni Güney Galler'de (Avustralya) inşa edilen dünyanın ilk RPB karayolu trafiği köprüsü olan Shepherd's Gully Creek Köprüsünü araştırmışlardır (Şekil 2.2). Köprü 15 m tek açıklıklı, 21 m genişlikte, 4 araç şeridi ve 1 yaya şeritlidir. 16° eğimli iki parça halindedir. 16 adet I şeklinde RPB öngerilmeli kirişler kullanılmış, RPB döşemesi ise yerinde imal edilmiştir. I şeklindeki kirişler; 600 mm derinliğinde, 280 kg/m' dir. 1,3 m aralıkla yerleştirilmiştir. Döşeme kalıpları; 1,1 m genişliğinde, 2,4 m uzunluğunda, 25 mm kalınlığındadır. Betonarme döşeme ise 170 mm kalınlığındadır. Ductal™ betonu ile üretilmiştir. Kullanılan RPB ısıtma işlem görmemiş durumda 140 MPa basınç dayanımında, eğilmede kırılma modülü 20 MPa'dır. 90°C' de 48 sa. ısıtma işlem gördüğünde ise 160 MPa basınç dayanımına, 24 MPa eğilmede kırılma modülüne sahiptir. Köprü'nün toplam maliyeti geleneksel uygulamanın yaklaşık %10 üzerindedir. Tipik bir kiriş için, RPB ile üretilen kiriş hacimce %40 daha azdır ve herhangi bir pasif donatı içermemektedir. RPB kullanımının asıl sağladığı ekonomi altyapı ve imalat kolaylığındandır. Yapı ömrü düşünüldüğünde RPB favori bir çözümdür, agresif çevre koşullarında dahi yüzlerce yıllık tasarım ömrüne sahiptir.

Rebentrost ve Annan (2008) çalışmalarında Ductal™ RPB kullanılarak imal edilen iki köprü'nün dizaynı ve üretimini anlatmışlardır. Bunlardan biri hafif raylı sistemi destekleyen kablolu sistemi de içeren Avrupa'daki Brennerpass yaya geçidi, diğeri de Yeni Zelanda'da yer alan çeşitli tren istasyonlarına geçişi sağlayan köprüdür.

**Brenner Pass Bridge:** Gün içinde çevre koşulları sıcaklık değişimleri fazla olduğundan köprüde kullanılan malzemelerin özellikle durabilite yönünden güçlü, kimyasal durumlara karşı dayanıklı olması istenmiştir. Ayrıca iddialı bir mimari düşünüldüğü için Ductal™ RPB tercih edilmiştir. Ductal™ RPB'nin içinde çimento, ince kum, silis dumanı, silis unu, akışkanlaştırıcı, düşük su/çimento oranında su, yüksek dayanımlı çelik lif, ya da metalik olmayan lif kullanılmaktadır. Tasarım için birçok geometri düşünülmüştür. İlk olarak parçalar RPB elemanlardan oluşan ve kemerle desteklenen bir sistem oluşturulmuştur. İkinci seçenekte monolitik asimetrik ve kablolarla desteklenmiş bir sistem oluşturulmuştur. RPB dairesel ve parabolik şekilde yay seçenekleri, çelik gövdeyle desteklenmiş RPB döşemeler kullanılmıştır (Şekil 2.3a).



(a)

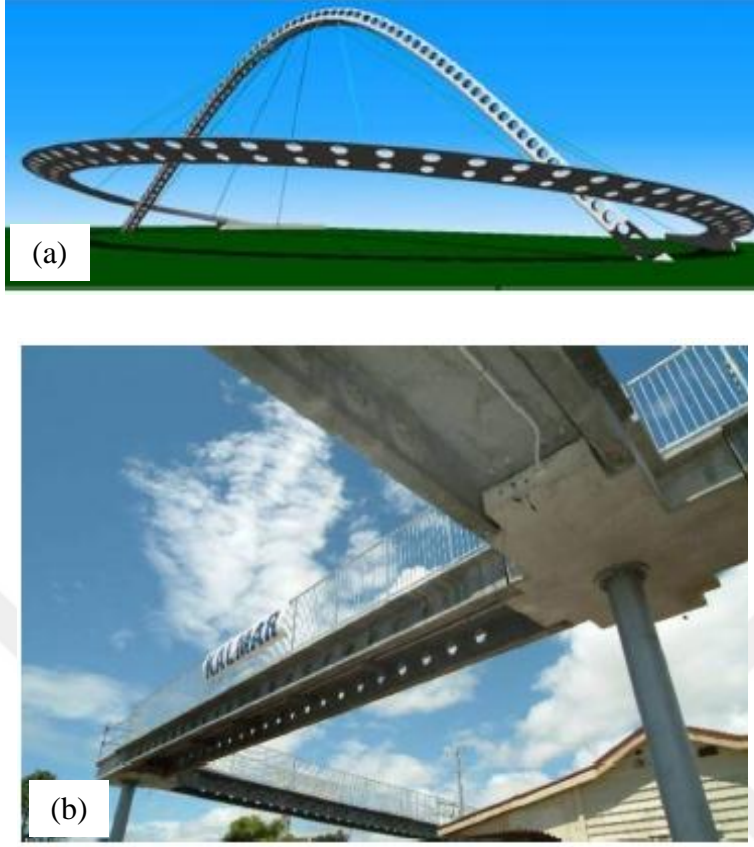


(b)

Şekil 2.2. Shepherd's Gully Creek Köprüsü'nün (a) kesiti, (b) bir I kirişinin detay çizimi (Cavill ve Chirgwin, 2004)

İkinci dizayn üzerinden devam edilmiş ve üzerine geleneksel raylı sistem kullanılmıştır. Tüm elemanlar prefabrik olarak üretilmiş, betonarme elemanlar 90°C' de 48 sa. kürlenmiş ve ard germe işlemi uygulanmıştır.

**Yeni Zelanda Yaya Köprüsü:** Tren istasyonu yenileme çalışmalarının en önemli kısmı olarak yeni yaya köprüleri inşa edilmiştir. Birincisi, Papatoetoe istasyonunda önceden standart öngermeli bir sistem olarak tasarlanmıştır ancak yapı ağırlığını azaltmak için ve maliyetten dolayı Ductal™ kullanımı önerilmiştir. Alt yapıda ve inşa sırasında ekonomi sağlanabilmesi avantajları, yapı ağırlığı azalması ve buna bağlı olarak deprem etkilerinin azalması en büyük avantaj olarak düşünülmüştür. Köprü açıklığı iki parçalı prefabrik RPB elemandan oluşmakta ve toplam uzunluğu 175 m' dir. Genel olarak 10 m açıklıklardan oluşmakta ve en uzun açıklığı 20 m' dir. Tabliye 50 mm kalınlığındadır ve pasif donatı içermemektedir. Ağırlık azaltılmak istendiği için iki simetrik köprü ayağı içlerinde geniş dairesel delik içermektedir. Ard germeli elemanlar olarak kullanılmışlardır. Yapımı 2005'te tamamlanmıştır. Diğer istasyonlar Penrose İstasyonu 265 m uzunlukta, 20 m' lik 15 açıklıklı bir köprüdür (Şekil 2.3b), 2006'da kullanıma açılmıştır, Papakura istasyonu da 2007' de tamamlanmıştır.

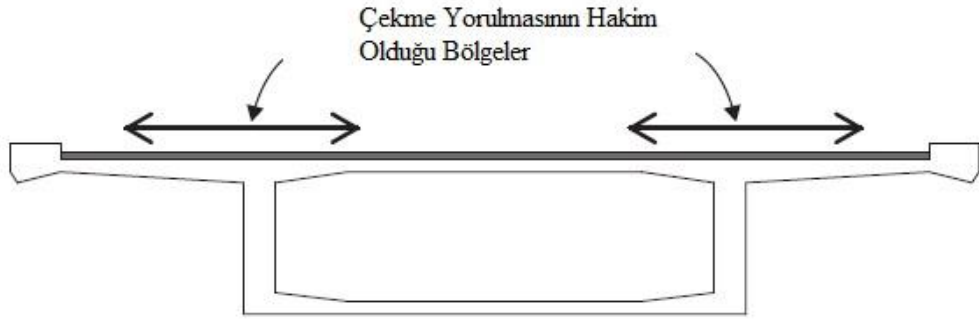


Şekil 2.3.(a) Parabolik ark bilgisayar destekli görüntüsü, (b) Penrose istasyonu (Rebentrost ve Annan, 2008)

Makita ve Brühwiler (2014), çalışmalarında yorulma davranışının kararlaştırılması için RPB elemanları yorulma testine tabi tutmuşlardır. Bunun için beton köprü tabliyesinin üzeri ince bir RPB ile kaplanıp, tekrarlı araç yükü ile test edilmiş ve yorulma limiti durumu düşünülmüştür (Şekil 2.4.). Deneysel sonuçlar, yorulma ömrünü aşan numunelerde gerilmenin RPB'den çelik donatıya geçtiğini göstermiştir. RPB'nin iyi bir yorulma direncine sahip olması köprü tabliyesi gibi betonarme yapısal elemanların yorulma durumuna karşı güçlendirilmesi için etkili bir yöntem olabileceğini göstermiştir.

RPB'nin yapısal anlamda kullanılabilmesi için kırılma mekanizmalarının iyi anlaşılması önem kazanmıştır. Ultra yüksek dayanımlı betonların malzeme gelişimi kapsamında eğilme dayanımı üzerinde boyut etkisi, lif türlerinin etkisi, kırılma mekanizması gözlenen deneysel ve non-lineer analiz yoluyla simülasyonları yapılarak incelenmiştir.





Şekil 2.4. RPB katmanla güçlendirilmiş köprü tabliyesi (Makita ve Brühwiler, 2014)

Mahmud vd. (2013) çalışmalarında 3 noktalı eğilme testi altında aynı çentikli ultra yüksek dayanımlı beton (UHPC) kirişlerin eğilme dayanımı üzerinde boyut etkisini araştırmışlardır. Beton hasar plastisite modeli (CDP), abaqus programı kullanılarak nonlineer sonlu eleman simülasyonu yapılmıştır, tek eksenli çekme ve basınç dayanımı laboratuvar testleri sonuçlarından elde edilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Ortalama basınç dayanımı 150 MPa olan,  $X=150 / y= 30-60-90-120-150$  mm numune boyutuna sahip kirişler üretmişlerdir. UHPC' deki yüksek duktiliteden dolayı, kirişteki boyut etkisi dayanımı çok düşük etkilemiştir, CDP model kullanılarak yapılan sayısal simülasyon ile yük ve deplasman eğrisi ve çatlak yayılma süreci deneysel verilerde oldukça uyumlu şekilde tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Ancak boyut etkisinin anlaşılması için daha çok sayıda kirişin daha büyük açıklıklar ve daha büyük boyutlarda denenmesi gerektiğini önermişlerdir.

Cifuentes vd. (2013), düşük, normal ve yüksek dayanımlı betonun duktilitesi ve kırılma mekanizması üzerinde polipropilen liflerin geometrik ve mekanik özelliklerinin etkisini deneysel olarak çalışmışlardır. Beton dayanımlarını düşük dayanımlıda 20-22 MPa, normal dayanımlıda 32-37 MPa ve yüksek dayanımlıda 105-111 MPa olarak elde etmiş, üç noktalı eğilme deneyine tabi tutmuşlardır. Abdalla ve Karihaloo' nun basitleştirilmiş sınır etkisi metodu kullanılarak test edilmişlerdir. Lifle güçlendirmenin etkisi özellikle yük – yer değiştirme eğrisinde incelenmiş ve betonun boyuttan bağımsız olarak karakteristik kırılma enerjisi analiz edilmiştir. Farklı karışımlarda lifle güçlendirmenin etkisi olarak duktilitede artış gözlenmiştir. En uygun lif kullanıldıkça en iyi kırılma davranışı elde edilebileceği belirtilmiştir.

Wille vd. (2014); ultra yüksek dayanımlı betonların tek eksenli çekme davranışını araştırmışlardır. Matris yoğunluğu ve lif-matris ara yüzey bağ özelliklerinin gelişimi ile lifli ultra yüksek dayanımlı betonların da dayanım, duktilite ve enerji yutma kapasitesi gibi çekme performansları gelişmektedir. Bu nedenle mevcut çalışmalarını yorumlamış ve

kategorize etmişlerdir. Deneysel çalışma olarak da 3 tip çelik lifi 3 farklı hacimde kullanılmışlardır. Basınç dayanımları 230-250 MPa aralığında olan numuneler üretmişlerdir. Elastik-pekleşme-yumuşama-parametrelerini karakterize etmişlerdir. İlk çatlak gerilmesi ve şekil değişimi, elastik ve şekil değiştirme modülü, enerji kaybı kapasitesi parametrelerini incelemişler ve çatlak numuneleri mikroskop ile gözlemişlerdir.

Kang vd. (2010), lif içeriği etkisine göre çekme çatlağı özelliklerini araştırmışlardır. 0-5% aralığında değişen lif içeriği ile üretilen elemanlara 3 noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Lif yüzdesi arttıkça eğilmede çekme dayanımı doğrusal olarak artmıştır. Çatlak modeline karar vermek için ters analiz uygulanmıştır ve 3 eksenli çekme gevşeme modeli önerilmiştir. Önerilen model, lif içeriğinin artması ile gerilme-sabit köprüleme bölgesinin artışı ve gerilme-direnç gösterme bölgesinin azalışını başarılı şekilde göstermiştir. Önerilen modelin farklı lif içerikleri için basit ve çok yönlü ve yapısal dizayn ya da numerik analize uygulanabileceği belirtilmiştir.

Bayard ve Plea (2003), çalışmalarını lineer davranış ile sınırlandırmışlardır ve RPB' de çatlak oluşumu ve yayılımına odaklanmışlardır. İlk olarak, mikro yapısal gerilme şekil değiştirmesini ve mikro düzlem metodunu temel alarak çatlak başlangıcı ve gelişimi için bir model tanımlamışlardır. İkinci analizde ise deneysel olarak özel RPB numuneleri üzerinde çalışmışlardır. RPB' de çekme testi verilen lif dağılımıyla ilişkili pseudo-pekleşme davranışının gelişimini göstermiştir. Deney sonucunda tüm parametreler aynı iken, anizotropi tarafından uyarılan hasar sürecinin başlangıcının, ilk çatlağı başlattığı görülmüştür.

UHPC'lerin eğilme davranışını, kırılma mekanizmasını, çelik liflerin dağılımı, farklı donatı içerikleriyle inceleyen yapısal boyutlu numuneler içeren çalışmalar ise çok sınırlıdır (Yang vd.,2010; Kamal vd., 2013; Menefy, 2007).

Yang vd. (2010), çalışmasında UHPC kirişlerinin eğilme davranışı ile ilgili deneysel çalışmalar yapmıştır. Deneysel değişkenler, donatı oranı ve yerleştirme metodudur. UHPC kirişlerdeki eğilme karakteristik davranışı donatı oranı 0.02 den az ve çelik lif oranı hacimce %2' den az kullanılarak incelenmiştir. Eleman boyutu 180x270x2900 mm, genişlik/yükseklik oranı 1.5 olarak seçilmiştir. 90 °C 'de 72 saat buhar kürüne tabi tutulmuştur. Basınç dayanımları 190-196 MPa aralığındadır. Kullanılan kesitler Şekil 2.5' de gösterilmiştir. Çelik lifle güçlendirme çatlakların kontrol edilmesinde etkili olmuş ve duktilite indeksi 1.60-3.75 aralığında değişmiştir. Ayrıca, UHPC karışımının kalıba yerleştirilme metodu, çelik liflerin dağılımını ve

bununla bağlantılı olarak eğilme davranışını etkilemektedir. Bu çalışmanın sonuçları, UHPC'nin deplasman ve eğilme davranışları üzerindeki gelecekteki çalışmalar için sayısal değerler sağlamaktadır.

Numuneler	NR-1,2	R12-1,2	R13-1,2	R13C-1,2	R14-1,2	R22-1,2	R23-1,2
Kesit							
Donatı	-	2-D13	3-D13	3-D13	4-D13	2-D13	3-D13
Donatı Alanı (mm <sup>2</sup> )	-	1 layer	1 layer	1 layer	1 layer	2 layer	2 layer
Donatı Oranı	-	253.4	380.1	380.1	506.8	506.8	760.2
Yerleştirme Yön.	Uç kısımdan	Uç kısımdan	Uç kısımdan	Orta açıklıktan	Uç kısımdan	Uç kısımdan	Uç kısımdan
Karışım No	4	1	2	2	3	1	3

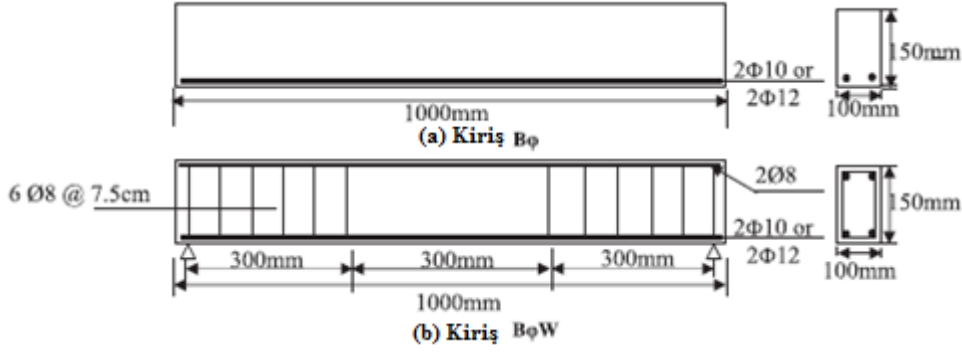
D13: Donatı çapının 13 mm olduğunu göstermektedir.

Şekil 2.5. Deneysel çalışmada kullanılan kiriş detayları (Yang vd., 2010)

Deney sonuçları incelendiğinde, çatlak ve kırılma bölgelerinde eğilmede çekme kuvvetlerine dik bir şekilde yoğun kırıklar meydana gelmiştir, bu da gerilmenin kesitte dağıldığını ve liflerin üzerine çekme kuvveti gelmeden önce elemanın birçok çatlakla maruz kaldığını göstermektedir. Deney elemanlarında benzer kesit alanı ve donatı oranı kullanılsa bile eğilme kapasitesi, yerleştirme methodundan etkilenmiştir. Taze halde kalıba uc kısımdan dökülerek yerleştirilen UHPC elemanlar, kalıba ortasından dökülerek yerleştirilen elemanlara göre daha iyi yapısal performans sergilemiştir. Bu sonuç, çelik liflerin döküm sırasındaki düzen ve dağılımının UHPC'nin yerleştirme methodundan etkilendiğini göstermektedir. UHPC kirişlerde düktilite indeksi 1.6' dan fazla elde edilmektedir. Çelik lifle güçlendirilmiş UHPC, yük- deplasman ilişkisi incelendiğinde, çatlak sonrası düktil davranış sergileyebilmektedir ve bu da çelik lif kullanımı ile çatlak kontrolünün mümkün olduğunu göstermektedir.

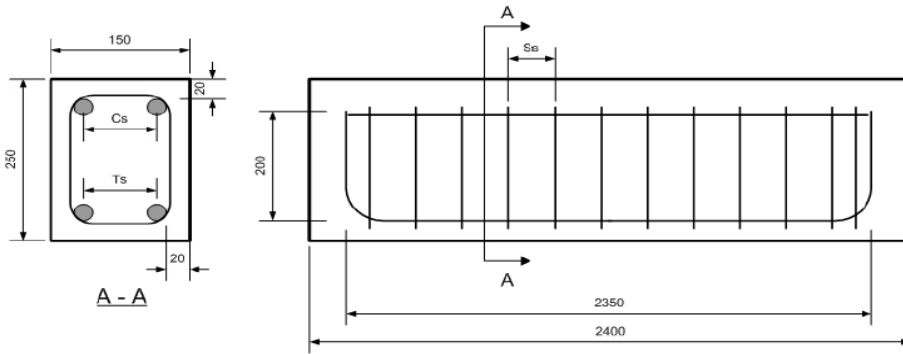
Kamal vd. (2013), çok yüksek dayanımlı beton kirişlerin davranışını değerlendirmişlerdir. Ayrıca, lif etkisini ve davranış ve dayanım üzerine etkisini araştırmışlardır. Toplamda 100x150x1000 mm 12 adet kesme donatılı ve donatısız kiriş eğilmede test edilmiştir (Şekil 2.6.). Başlıca değişkenler lif tipi, boyuna donatı oranı, etriye olup olmamasıdır. Çelik ve polipropilen lif olmak üzere iki tip lif kullanılmıştır. Bu çalışmada, deney örneklerinin farklı yüklemeler, başlangıç çatlakları, çatlak bölgeleri, maksimum yükler altında yer değiştirmeleri incelenmiştir. Deneylerin sonucunda çatlak sayısı arttığında lif kullanımı ile çatlak derinliğinin azaldığı gözlenmiş, bu da rijitliği ve maksimum yük değerlerini arttırmıştır. Çalışmada 127-135 MPa dayanımında işlenebilir bir karışım elde edilmiştir. Lifsiz örneklere göre polipropilen lif ve çelik lif basınç dayanımını sırasıyla 2.5% ve 6% arttırmıştır. Çelik lif,

boyuna donatı oranından bağımsız olarak hem ilk ve hem de nihai yükü arttırmıştır. Etriyesiz kirişlerde, kesme dayanımına lifin çok belirgin bir etkisi olmuştur.



Şekil 2.6. Deneysel çalışmada kullanılan kiriş detayları (Kamal vd., 2013)

Menefy (2007), doktora tez çalışmasında, RPB' nin malzeme davranışı ve sönümlenme karakteristiğinin anlaşılmasına ilişkin yeni bilgilere katkıda bulunmasını amaçlamıştır. Çalışmaları agresif çevre koşullarında RPB' nin durabilitesine paralel olarak üretimi ve malzeme davranışı ile kiriş eleman olarak üretildiğinde sönümlenme karakteristiği ve statik performansı kapsamaktadır. RPB kiriş eleman olarak üretildiğinde lifsiz RPB ve yüksek dayanımlı beton ile karşılaştırılınca yüksek yük kapasitesi görülmüştür, ilk çatlak oluşturan yükte artış, çatlak derinliğinde azalış, kesme davranışında genel olarak azalma gözlenmiştir. Malzeme deneylerinde çeşitli kür yöntemleri uygulanmıştır: 25 °C de suda, 75 °C suda 48 sa. ya da 70 °C 48 sa. buhar ardından 20 °C suda test gününe kadar bekletilmek üzere uygulanmıştır. Karışıma göre 110 - 150 MPa aralığında değişen betonlar üretilmiş ve deneylerde kullanılmıştır. Kiriş elemanlar 150x250x2400 mm kiriş eleman tasarlanmıştır. Tipik bir deney elemanı Şekil 2.7' de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Deneysel çalışmada kullanılan kiriş detayları (Menefy, 2007)

### 3. AKUSTİK EMİSYON (AE) YÖNTEMİ

Akustik Emisyon (AE), tahripsiz test etme yöntemlerinin (NDT) bir çeşididir. Bu bölümde, AE analizi tanıtılacak, çalışma prensibi, parametreleri ve AE sinyallerinin yorumlama çeşitleri açıklanacaktır. Ayrıca, AE' nin bir analiz yöntemi olan SIGMA yöntemi tanıtılacak, yıllar içindeki gelişmeler ve yapılan çalışmalar özetlenecektir.

#### 3.1. Giriş

Malzemelerin tahripsiz test yöntemlerinin (NDT) bilimsel ve teknolojik gelişimi, mühendislik metotlarının ve tamamlayıcı bilimin disiplinler arası birlikte çalışması ile mümkündür. Test sistemlerinin ilerlemesi, sayısal simülasyon için matematiksel algoritmalara ek olarak elektronik donanım, bilgisayar bilimi ve yazılımları da gerektirir. Alt disiplinlerdeki araştırmaların ve gelişmelerin mevcut durumu, mühendislik sistemlerinde hangi metotların üstün olarak kullanılacağını belirlemektedir (Maierhofer vd., 2010).

NDT metotları çeşitli endüstri alanlarında kullanılmaktadır. Birçok yönden avantajlı olan bu metotlar metal ve kompozit malzemelerde kullanımı mümkün olan yöntemlerdir. Buna rağmen, inşaat mühendisliğinde düzenli araştırmalar az sayıda yayınlanmış ve dünya çapında birkaç standartlaştırılmış prosedür mevcuttur. NDT için olan yönetmelik, hasar değerlendirmesi gibi sadece özel bir alana değinmektedir (Maierhofer vd., 2010).

Son zamanlarda data analizi, yeniden yapılandırma, otomasyon ve ölçüm stratejileri teknolojisinde hızlı ve yüksek seviyede gelişmeler kaydedilmiştir. Daha fazla bilgi ve deneyim giderek kazanılmış ve veri toplama basitleşmiştir (Maierhofer vd., 2010).

Tahripsiz test etmek için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler 6 ana kategoride toplanabilir (Zaki vd., 2015):

1. Gözle Muayene,

2. Elektrokimyasal Method {Açık devre potansiyel izleme (OCP), Özdirenç metodu, Polarizasyon dayanımı, Galvonostatik titreşim (puls) methodu (GPM), Elektrokimyasal ses (EN)}

3. Elastik Dalga Metodu {Ultrasonik titreşim hızı (UPV), Akustik emisyon (AE), Darbe echo (IE)}

4. Elektromanyetik Metot (Yer radarı )

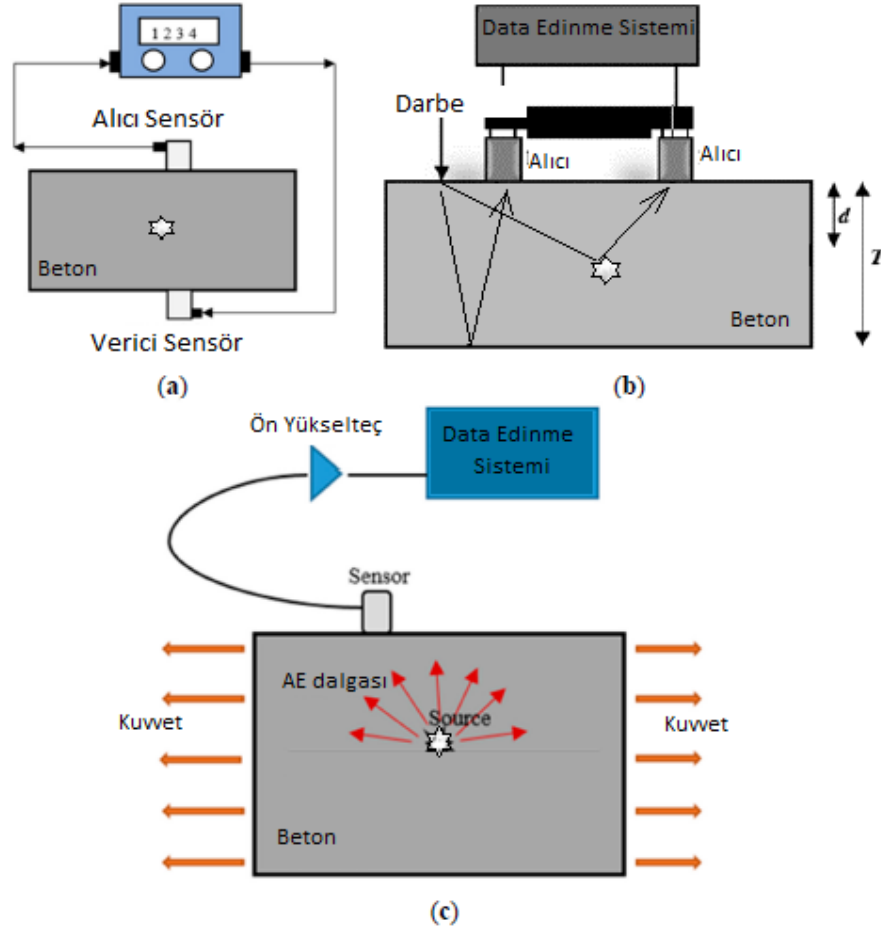
5. Optik Hissetme Metodu {Fiber bragg optik ağı (FBG), Kızılötesi termografi (IRT)}

Bu çalışmada ‘Elastik dalga metodu - AE yöntemi’ kullanılmıştır.

Dalga temelli hasar tespiti, geçici dalgaların beton yapının içinde ilerleyişinin sensörler kullanılarak algılanmasıyla yapılır. Dalgalar çatlak, boşluk ve korozyon ürünlerine tepki gösterir. Üç temel dalga metodu vardır: Ultrases, darbe-eko (IE) ve akustik emisyon (AE) (Zaki vd., 2015). Yöntemler şematik olarak Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.

Ultrases deney yöntemi, bir malzemedan geçen ultrasonik dalganın farklı bir malzeme tabakası ile karşılaştığında yansıması prensibine dayanır. Bu yöntemde çoğunlukla zaman tanım aralığında veri analizi yapılır ve küçük boyutlardaki malzeme kusurları rahatlıkla tespit edilebilir (Yaman, 2015).

Darbe-eko yöntemi de ses dalgalarını kullanarak çalışır. Betonun dış yüzeyine veya içerisindeki bir sorunlu bölgeye çarpıp geri dönen ses dalgalarının incelenmesiyle o kesit hakkında önemli bilgiler edinilebilir. Çelik kürelerin yarattığı her darbe beton içinde dalgalar oluşturur ve bu dalgalar farklı yoğunlukta bir yüzeyle çarpıştıkları zaman geri sekerler. Seken dalgalar alıcı tarafından algılanır (Yaman, 2015).

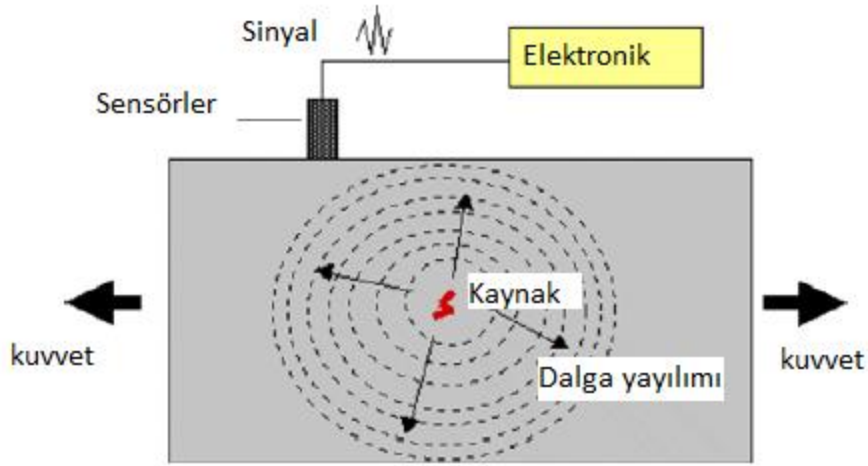


Şekil 3.1. Elastik dalga metodlarının şematik gösterimi; (a) ultrases yöntemi, (b) darbe-eko yöntemi, (c) akustik emisyon yöntemi (Zaki vd., 2015 modifiye edilmiştir.)

AE yöntemi ise bu iki yöntemin iyi bir tamamlayıcısıdır. AE tekniği farklı yapılarda hasarı ve hasarın gelişimini algılamak ve görüntülemek için sıklıkla kullanılan tahripsiz test yöntemlerindedir. ASTM E1316(2014)' te AE' nin tanımı şöyle yapılmaktadır: Akustik emisyon, gerilme altındaki malzemelerde bir ya da daha çok yerel kaynağın hızla enerji salarak geçici elastik dalgalar ürettiği olaylar ve bu şekilde oluşan geçici elastik dalgalardır. AE ya da gerilme dalgaları emisyonu, genellikle malzemelerin içinde meydana gelen mikro yapısal değişikliklerden dolayı hızla enerji açığa çıkmasının sonucunda oluşan akustik gerilme dalgaları olarak da tanımlanabilir (Zaki vd. ,2015; Gholizadeh vd., 2015, TEKPROM, 2015). AE mikrosismik bir olaydır. Malzemedeki kırılma ile açığa çıkan enerjinin elastik dalgalar vasıtasıyla yüzeye kadar gelmesi ve yüzeye yerleştirilen algılayıcılar tarafından algılanması prensibi ile çalışır.

### 3.2. AE Çalışma Prensibi

Akustik görüntüleme sisteminin 2 gerekli bileşeni vardır: (1) kaynakta (kırılmanın olduğu yer) meydana gelen malzeme deformasyon ve (2) kaynaktan gelen gerilme dalgalarını alan dönüştürücüler. Gelişen bir kusur, malzemenin içinde yüksek frekanslı ses dalgası formunda enerji açığa çıkarır ve sensörler tarafından algılanır (Nair ve Cai, 2010). Akustik izleme sisteminin genel çalışma prensibi şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

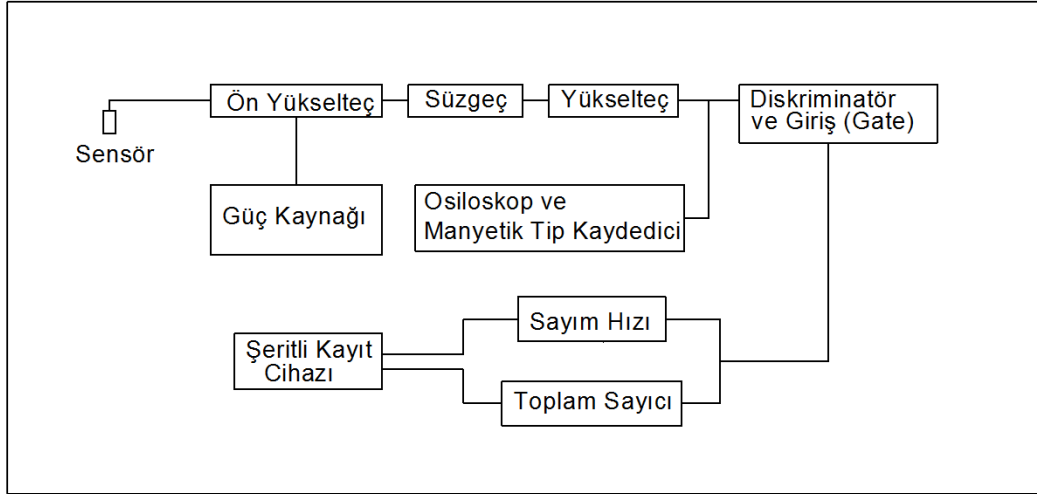


Şekil 3.2. Akustik izleme sistemi çalışma prensibi (Nair ve Cai, 2010)

AE, merkezinde geniş bir frekans bandına sahip bir elastik dalgadır. Bu nedenle bir sensör yardımıyla belirlenen tipik elastik AE dalgası, boyuna ve enine yansıyan dalganın birleşimidir. Sensörler tarafından alınan sinyaller toplanır, depo edilir ve data tedarik edici sistemde işlenir. Ticari sistemler, toplanan dataların gerçek zamanlı değerlendirilmesi için yazılım sağlamaktadırlar (Nair ve Cai, 2010).

Tipik bir AE izleme sisteminin şeması Şekil 3.3’ de gösterilmiştir:





Şekil 3.3. AE izleme sistemi (Hutton ve Ord, 1970)

En geleneksel AE sensörü, sürekli iletilen piyezoelektrik algılayıcılardan oluşur. Öncelikli fonksiyonu geçici elastik-mekanik dalgaları tespit etmek ve elektriksel AE sinyaline dönüştürmektir. Bugün geniş çapta kullanılan pek çok sensör tipi vardır. Uygun dönüştürücünün seçiminde araştırmacının kullanılma amacı ve araştırmanın gerektirdiği hassasiyet temel alınır. Birçok araştırmacı salınım yapan (resonant) sensörlerin kullanımını tipik AE sinyaline yüksek duyarlılığından dolayı önermektedir. Bunun yanı sıra, tek yönlü sensörler ve yüzey dalgasına daha duyarlı sensörler farklı köprü elemanlarında AE kaynaklarındaki farklılıklar için daha yararlı olabilir. Sensörler genellikle epoksi, sıcak eriyen tutkal ya da tutucularla yapının üzerine monte edilir. Sensörler AE' nin algılanmasında başlıca anahtar olmasına rağmen, destekleyici elektronik bir sistemin kullanılması algılanan bilgilerin kullanımı için çok yararlıdır (Nair ve Cai, 2010; Hutton ve Ord, 1970).

AE' de kullanılan genel araçlar, önyükselteç, yükselteç (amplifikatör), filtreler, sensörler, diğer bilgi toplayıcılar, analiz ve depolama ekipmanları bilgisayar, salınımölçerler (osiloskop), voltmetrelerdir (Gholizadeh vd., 2015).

Dönüştürücüden gelen sinyal önyükselticiden geçer. Birbirinden ayrı ya da sensörlerle bütünleşik olan önyükselticiler, sinyal/gürültü oranını ayarlayan ayrılmaz bir parçadır. Önyükselteç ile istenen voltaj düzeyine yükseltilir, elektronik süzgeçler sayesinde istenmeyen frekanstaki bilgiler elenir. Böylece, piezoelektrik sensörler mekanik AE dalgalarının dönüşümü için kullanılırken, önyükselteçler sinyal kaybının önlenmesi için kullanılır ve gürültünün karışmasını azaltır. Kalan datalar yükseltece gönderilerek istenen frekans aralığına getirilir ve ardından sistem ikiye ayrılır. Birinci yolda; manyetik şeritli kaydedici ham veriyi depolamak için ve bir osiloskop da düzenli

data gözetimi için kullanılır. İkinci yolda veriler diskriminatöre ve aralık çevrimine gider, orada eşik seviyesinin üzerindeki sinyaller şekillendirilmiş çıkış sinyali (kare dalga) olarak sayım hızı döngüsüne ve sayımların toplandığı döngüye gider. Bu iki parametre daha sonra şeritli kaydedici üzerinden zaman ve diğer bazı test parametreleriyle okunur (Hutton ve Ord, 1970; Tuncel, 2008; Nair ve Cai, 2010; Gholizadeh vd., 2015).

Genel olarak; AE birincil ve ikincil emisyon olarak sınıflandırılabilir. Birincil emisyon, ilgili malzemenin içinden kaynaklanan, ikincil emisyon ise dış kaynaklardan oluşan diğer tüm emisyonlardır. Akustik olay tespiti, gerilme dalgalarının karakteristikleriyle (örn; dalga modu, sönümlenme, çoklu kanalların etkisi, ve kaynak lokasyonu algoritması kriteri) yakından ilişkilidir. AE dalgalarının yayılma karakteristiğinin ve modlarının anlaşılması, istenmeyen bilgilerden anlamlı dataların ayırt edilmesi için, kaynak lokasyon algoritmasının tam olarak belirlenebilmesi için önemlidir (Nair ve Cai, 2010).

### 3.3. AE Sinyallerinin Parametreleri ve Yorumlanması

AE ölçümünün 3 temel bileşeni vardır (Nair ve Cai, 2010):

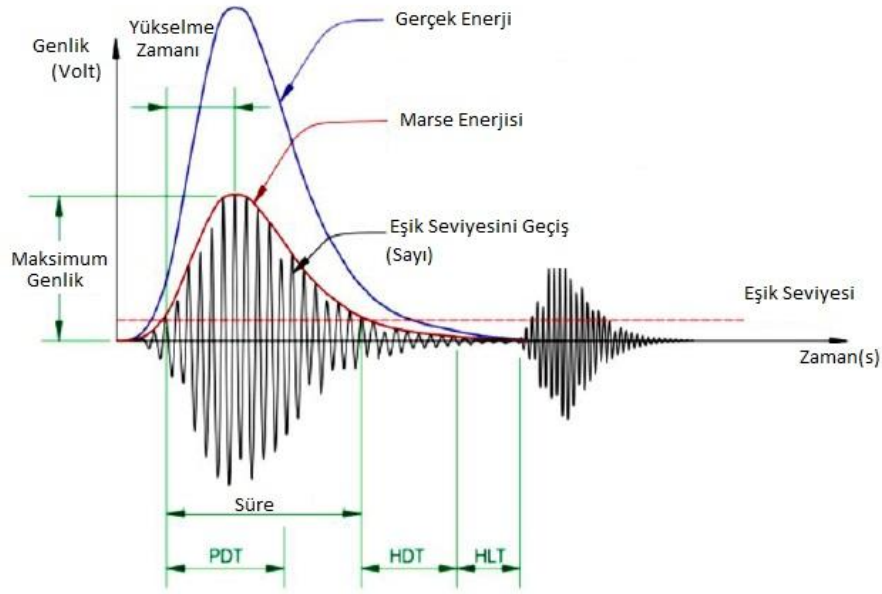
- 1-AE dalgasının meydana gelişi, algılayıcı ekipmanlarla AE sinyalinin elde edilmesi,
- 2-İşlenmesi,
- 3-Toplanan dataların yorumlanması.

AE' de 2 tip analiz yapılabilir: (1) zaman tanım alanı dalga formu, test sırasında süre kaydedilir, (2) frekans tanım alanı dalga formu, test sırasında sinyal parametreleri frekansla beraber kaydedilir (Gholizadeh vd., 2015).

AE tekniğinde kullanılan parametreler: genlik (amplitude), sayı (count), enerji, devam süresi (duration) ve yükselme zamanıdır (rise time) (Şekil 3.4).

**Genlik:** Sinyal voltajının en yüksek noktasını gösterir. AE sinyalinin genliği kaynaktaki olayın büyüklüğü ile doğrudan ilişkili olup ve mikro volttan volta kadar geniş bir aralığı kapsar. Birimi dB olarak ifade edilir.

**Sayı (Count,N):** Eşik seviyesini geçen puls sayısıdır.



Şekil 3.4. AE sinyal parametreleri (Gholizadeh vd., 2015)

**MARSE Enerjisi:** Doğrultulmuş sinyal zarfı altındaki ölçülen alandır. MARSE, genlik ve devam süresine hassas olup eşik seviyesine ve çalışma frekansına daha az bağımlıdır.

**Devam Süresi(D):** İlk ve son eşik değerini geçen sinyaller arasındaki zaman farkıdır.

**Yükselme Zamanı (R):** Eşik değerini geçen ilk pik ile en yüksek pik arasında geçen zamandır. Bu parametre AE kaynağı ile algılayıcı arasında dalga ilerleme prosesi ile yakın ilişkilidir ve çoğunlukla vibrasyon ya da dinamik yükleme gibi zamana bağlı işlemlerle kullanılır.

AE parametreleri hesaplanırken eşik seviyesi (threshold) kullanılır. AE sistemlerinin en önemli görevlerinden birisi arka alan gürültüsünü elimine ederek AE pulslarını data setlerine dönüştürmektir. Bu amaçla modern AE sistemleri deteksiyon eşik seviyeleri kullanır (Tuncel, 2008; Gholizadeh vd., 2015). Bazı ölçümlerde bu değer otomatik olarak belirlenebilirken bazı ölçümlerde ise manuel olarak eşik değeri atanır.

Kontrol parametreleri, tepe tanım zamanı (**PDT**, Peak Definition Time), vuruş tanım zamanı (**HDT**, Hit Definition Time) ve vuruş kilitli kalma süresi (**HLT**, Hit Lock

out Time), sinyal oluşma işleminin parametreleri ve malzemenin özel değerlerini içeren zaman parametreleridir. PDT; yükselme zamanının pik sinyali ile pik genlik arasındaki süredir. HDT; sinyalin bir vuruş olduğunu belirleyen zaman, eşik değeri kesen son zaman ile sönümlenme zamanı arasında geçen süredir. Uygun HLT seçimi istenmeyen ardçı sinyallerin ana sinyal ile karışmasını engellemek için kullanılır ve önemli bir parametredir (Gholizadeh vd., 2015).

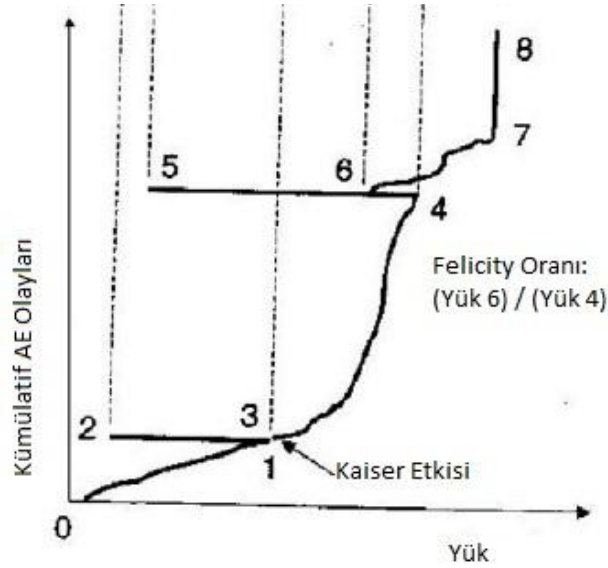
Sinyal parametrelerini ve dalga formlarını değerlendirmek için birçok niteliksel ve sayısal yol vardır. Örneğin; AE sinyallerinin parametrik analizi, değerlendirme kriterleri ile belirlenir:

-Beton kiriş bütünlük oranı (**CBI**) : Bir yükleme döngüsünde yeni AE' nin başlangıcındaki yükün, maksimum önceki yüke oranıdır (Nair ve Cai, 2010).

-Betonarme kirişlerin durgun ve yük oranları: Durgun oran:(**calm ratio**): Yükleme olmadığı durumdaki kümülatif AE aktivite oranının son yükleme döngüsünün maksimumuna oranıdır. Yük oranı ise; AE' nin başlangıç yükünün, önceki (prior load) yüke oranıdır (Nair ve Cai, 2010).

Bir malzemede yükleme ve yükü boşaltma uygulanıyor ise Kaiser ve Felicity etkilerinden bahsedilebilir. AE çalışmalarında malzeme önceden belirli bir düzeyde yüklenmiş ve yük kaldırılmış ise, ancak bu yük seviyesi tekrar aşıldığında malzeme yeniden AE enerjisi yaymaya başlayabilir. Bu özellik Kaiser etkisi olarak adlandırılır ve 1950'de ilk kez Joseph Kaiser tarafından bulunmuştur. Şekil 3.5'deki 1-2 ve 3. noktalardan Kaiser etkisi anlaşılabilir. Malzeme önceden 1 noktasına kadar yüklenmiş ve yük boşaltılmıştır, yükleme tekrar başladığında aynı yük seviyelerinde AE aktivitesi görülmez bu nedenle grafik sabit kalır (2-3. noktalar arası). Bu noktadan sonra önceki yük seviyesi aşıldığında malzeme yeniden AE yaymaya başlar (3-4. noktalar arası). Malzeme elastiklik sınırı geçilip yüklemeye devam edildiğinde 6.noktada olduğu gibi önceki yük seviyesine ulaşmadan AE enerjisi yayılmaya başlar, bu da Felicity etkisi olarak bilinir ve Felicity oranı ile ifade edilir (Felicity oranı:  $\text{yük}_6/\text{yük}_4$ ) (Nair ve Cai, 2010; Grosse ve Ohtsu, 2008; Tuncel, 2008).

AE sinyallerinin nicel çözümlemesi AE' nin dalga formlarıyla uygulanır. Toplanan dalga formlarının uygun şekilde yorumlanması, bu dalga formlarının tipik bir dalga formu işlem aracına benzetilmesiyle yapılır (Nair ve Cai, 2010).



Şekil 3.5. Kaiser ve Felicity etkisi (Nair ve Cai, 2010)

AE sinyallerinin "b değeri analizi" de Colombo vd. tarafından öne sürülen başka bir nicel çözümlerdir. Birçok sayısal AE data değerlendirme tekniği önerilmiş ve laboratuvar denemelerinde kullanılmış olmasına rağmen, pratikte yerinde uygulama olarak nadiren kullanılmaktadır (Nair ve Cai, 2010).

Bu çalışmada ise AE parametre analizleri yapılacak ve farklı parametrelerin yorumlanması ile sonuca ulaşılmaya çalışılacaktır.

### 3.4. AE'nin Tarihsel Gelişimi

AE olayı ile ilgili ilk temel çalışmalar, 1940' li yılların sonu, 1950' nin başında ABD ve Almanya'da yapılmıştır (Kaiser, 1950, Kaiser, 1953). AE' yi geliştirirken basınç sistemlerinde büyüyen kusurun tespiti araştırma konusu olmuştur. AE' nin ilk uygulamaları ABD' deki Havajet Genel Kurumu tarafından 1964' de yapılmıştır (Hutton ve Ord, 1970).

İlerleyen yıllarda özellikle AE için ekipman düzeni kurulmuş ve birçok kaynağın AE davranışı dikkate alınmıştır. 1970' lerde endüstriyel uygulamalarda artış olmuş, 1980 boyunca ise, bilgisayarların da gelişmeye başlaması ile yöntem daha da gelişmiş ve uygulanmıştır. Bugünse dalga formu esaslı AE incelemesi tipik bir yöntemdir ve uygulamalara yönelik kullanımı daha da önem kazanmıştır (Gholizadeh vd., 2015; Wadley ve Mehrabian, 1984).

### 3.5. AE-SIGMA Analizi

Gerilme artışları sadece çatlak varlığı ile tanımlanabilir, fakat çatlakların gerçek büyüklüklerine gerilme değerleri ile karar verilemez. AE- SIGMA (**S**implified **G**reen's functions for **M**oment Tensor **A**nalysis) metodu, kaynak lokasyonunu ve tipini belirlemenin yanında çatlakların tiplerini (kesme yada çekme çatlağı gibi) ve yönelimlerini de tanımlayabilmek için geliştirilmiş bir yöntemdir (Alver vd., 2014).

Genelleştirilmiş AE teorisine göre; saptanan AE sinyalleri cismin içindeki dinamik-çatlak hareketleriyle (dislokasyon) meydana gelir. SIGMA analizi genelleştirilmiş AE teorisini temel alır, AE kaynak lokasyonu ve moment tansörü analizinden oluşur. Bir çatlak, çatlak yüzeyi  $F$  olmak üzere, çatlak hareketi vektör  $\mathbf{b}$ , birim normal vektör  $\mathbf{n}$  ile modellenenir.  $\mathbf{b}(\mathbf{y})$  çatlak hareketinin büyüklüğü,  $\mathbf{l}$  çatlak hareketinin yön vektörü ve  $\mathbf{S}(\mathbf{t})$  çatlak hareketinin kaynak-zaman fonksiyonu iken çatlak hareketi  $\mathbf{b}(\mathbf{y})\mathbf{I}\mathbf{S}(\mathbf{t})$  ile tanımlanabilir (Ohtsu, 1991; Grosse ve Ohtsu, 2008). Yer değiştirme fonksiyonu  $u_i(x, t)$  aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$u_i(x, t) = \int C_{pqkl} G_{ip,q}(x, y, t) * [b(y)I_k S(t)n_l] dS = G_{ip,q}(x, y, t) m_{pq} S(t) \quad (1)$$

Burada,  $G_{ip,q}$  Green fonksiyonun 3 boyutlu türevidir. Aşağıdaki integrasyon çatlak yüzeyi  $F'$  de moment tansörü  $m_{pq}$  ye yol açar.

$$C_{pqkl} [b(y)l_k n_l] dS = [C_{pqkl} l_k n_l] [ \int b(y) dS ] = [C_{pqkl} l_k n_l] \Delta V = m_{pq} \quad (2)$$

İsotropik elastisite durumunda;

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

$\lambda$  ve  $\mu$  lame sabitleridir. (1) nolu denklem basitleştirilirse:

$$A(x) = C_s \frac{Ref(t,r)}{R} r_p m_{pq} r_q DA \quad (4)$$

$A(x)$  ilk hareketin genliği ve  $C_s$  sensör duyarlılığının kalibrasyon katsayısı ve malzeme sabitleridir.  $Ref$  yansıma katsayısıdır.  $R$  kaynak ile sensör arası uzaklık ve  $r$  yön vektörüdür.  $m_{pq}$  moment tansörü,  $DA$  çatlak yüzeyi alanıdır.

İzotropik bir malzemede moment tansörü simetriktir ve 2.derecedendir, bu nedenle bilinmeyen moment tansör bileşeni sayısı 6'dır. 4.denklemin çözümü için

kaydedilen AE dalgalarından 2 parametreye ihtiyaç duyulur: ilk hareketin genliği ve varış süresi. Ohno ve Ohtsu bu parametreleri otomatik belirleyen AIC (Akaike Information Criteria) metodunu geliştirmişlerdir. Farklı sensörlere varış sürelerinin farklılıklarından kaynak lokasyonuna karar verilebilir. Moment tansörü bileşenlerine karar verilebilmesi için ilk hareketlerin genlikleri en az 6 sensör tarafından kaydedilir (Alver vd., 2014).

Çatlak tipini sınıflayabilmek için, moment tansörünün özdeğer analizi Ohtsu, 1991 tarafından geliştirilmiştir. Moment tansörünün özdeğerleri çekme ve kesme çatlaklarından oluşur. Bileşenlerine ayrıldığında; kesme bileşeni (X), derivatik çekme bileşeni (Y), çekme çatlağının hidrostatik bileşeni (Z) (Ohtsu ve Kawasaki, 2010).

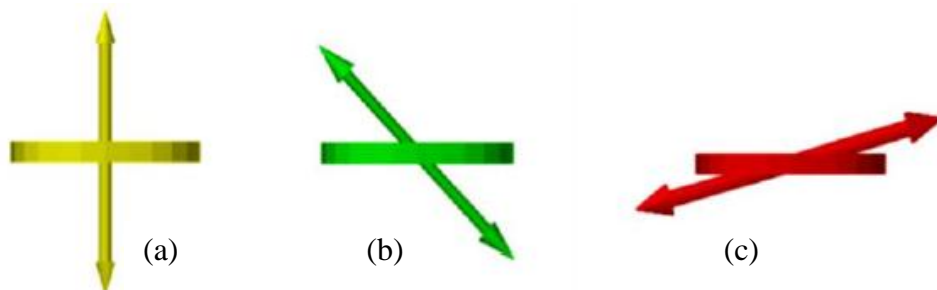
Aşağıda X,Y, Z relatif oranlarından oluşun ifade;

$$1.0 = X + Y + Z$$

$$\text{Orta özdeğer/ maksimum özdeğer} = 0 - Y/2 + Z \quad (5)$$

$$\text{Minumum özdeğer/ maksimum özdeğer} = -X - Y/2 + Z$$

SIGMA analizinde, çatlaklar  $X < \%40$  için çekme çatlağı,  $\%40 \leq X \leq \%60$  için karışık mod çatlağı,  $X > \%60$  kesme çatlağı olarak sınıflandırılır. Sonuçlar grafik yazılımları kullanılarak görselleştirilebilir (Light-Wave 3D, NewTek, gibi). Bu çatlakların 3 modeli 'de Şekil 3.6' da gösterilmiştir. Onların çatlak yüzey normali çemberlerle ve çatlak hareketinin yönü okla gösterilir (Ohtsu ve Kawasaki, 2010; Alver vd., 2014).



Şekil 3.6. Çatlak sınıflandırılması: (a) çekme çatlağı, (b) karışık mod-çatlağı, (c) Kesme çatlağı (Ohtsu ve Kawasaki, 2010)

### 3.6. AE Uygulama Alanları ve Yapılan Çalışmalar

Tahripsiz bir test yöntemi olan AE elektrik üretimi, rafineriler, vinç, köprü gibi yapılarda, boru hatları, uçak sanayi gibi birçok endüstride üretim esnasında kalite kontrol olarak ve araştırma uygulamalarında kullanılmaktadır. 1950'lerde Almanya'da önem kazanmasından beri, üretim işleri, ilerleyişin izlenmesi için geniş çapta kullanılmaya başlanmıştır (Gholizadeh vd., 2015).

Akustik Emisyonun potansiyel uygulama alanları (Hutton ve Ord, 1970):

- 1- Nükleer reaktörlerin sürekli gözetiminde aktif kusurları belirlemek ve yerini saptamakta,
- 2- Hava taşıtlarında yorulma kusurlarında,
- 3- Kaynağın soğuması sırasında kaynaklı parçanın çatlamaya karşı izlenmesinde,
- 4- Hassas yapılarda gerilme korozyonu çatlaklarının başlangıcının tespit edilmesinde,
- 5- Kırılma mekanizması ve malzeme davranışının araştırılmasında çalışma yöntemi olarak kullanılmaktadır.

Mühendislik uygulamalarında ise yapısal sağlık görüntülenmesi (Structural Health Monitoring, SMH) alanında kullanılır. AE tekniği yapıdaki erken çatlakları belirlemede etkili bir yöntemdir. AE tekniği gerçek zamanlı olarak yapıyı izlemeyi sağlar. AE hareketlerinin görüntülenmesinde stratejiler temelde lokal ve global izleme olarak 2 tiptir. Global izleme yapının tüm sağlamlığını değerlendirmeyi amaçlar. Lokal izleme ise hasarlı bölge ile ilgilidir (Gholizadeh vd., 2015).

Metal borulu sistemlerin değerlendirilmesinde ve plastikte güçlendirilmiş cam yününde, betonarme köprülerde, zamanından önce çatlak oluşumunda, yorulmada çatlak gelişimi gözlenmesinde, çelik parçalarda AE aktivitesiyle birlikte çatlak gelişiminin ilişkisinde geniş çapta kullanılır (Gholizadeh vd., 2015). Detaylı çalışmalar metallerde (Ono, 2011), beton çatlakları ve betonarme kırış kırılma mekanizmaları için birçok çalışmada tartışılmıştır ( Kishi vd., 2000; Ohno vd., 2014; Alver vd., 2014; Selman vd., 2015; Gholizadeh vd., 2015).

En yaygın uzun süreli araştırılan konular, betonarme köprülerde hasarlı duruma yol açtığından dolayı donatı korozyonu ve bununla ilişkili çatlaklardır (Muravin ve



Muravin, 2012; Nair ve Cair, 2010; Watson vd., 2005; Zaki vd., 2015, Kawasaki vd., 2013; Ohtsu ve Kawasaki, 2010; Ohtsu ve Uddin, 2008; Uddin vd.,2006; Uddin vd., 2004; Gholizadeh vd., 2015).

Öngermeli beton köprüler ve kirişler üzerine araştırmalar da yapılmıştır. AE' nin betonarme yapılarda yeni çatlakların gözlenmesinde çok etkili olduğu çalışmalarda belirtilmiştir (Vogel vd., 2006 ; ElBatanouny vd., 2014; Gholizadeh vd., 2015).

Ohno ve Ohtsu (2010)' da betondaki çatlakların sınıflandırılması 2 tip çatlak metodu, AE yöntemi kullanılarak, RA value ve ortalama frekans parametreleri yardımıyla yapılmıştır. Ohtsu ve Tomada (2008)'in test sonuçları metal donatı korozyonundan dolayı betondaki çatlakların çok güçlü olduğunu göstermiştir. Ohtsu ve Uddin (2008) ve Uddin vd. (2006) 'da sınır elemanı yöntemi (BEM) ve AE ölçümleri, betonda korozyon nedeniyle oluşan çatlaklarla ilişkili mekanizma üzerine deneysel ve sayısal araştırmaların yürütülmesi için kullanılmıştır. Lifli betonun ve matris çatlaklarının eğilme sırasında oluşan çekmeler arasındaki farklılıklar gözlenmiştir. Mclaskey ve Glase (2007)'de mikro çatlakların sonucundaki AE oluşumunun kaynağı, AE sensörüne ulaşan dalga formları arasındaki zaman farkından hesaplanmış, Ohtsu (2006)' da betonarme yapılarda hasar seviyesinin tahmini maksimum AE sinyali derinliğine ve toplam AE vuruş sayısına göre kolaylıkla belirlenebilmiştir, Aggelis (2001)' de farklı tipteki betonların eğilme sırasında AE görüntülemesi çalışılmıştır (Gholizadeh vd., 2015).

Yapısal hasar ve çatlakların AE-SiGMA yöntemi ile sınıflandırılması da geliştirilen bir çalışma alanıdır ( Sengupta vd., 2015; Karcılı vd.,2015; Sagar ve Prasad, 2012; Panjsetooni ve Muhamad, 2013; Behnia vd., 2014; Shigeishi ve Ohtsu,2001; Ohno ve Ohtsu, 2010).

İlgili çalışmalardan görüldüğü gibi normal dayanımlı betonlarda kırılma ve çatlak mekanizmalarının AE kullanılarak incelenmesi ile ilgili çalışmalar yakın zamanda hız kazanmıştır. Bu konuda yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda ilgili çalışmalar ise çok sınırlıdır.

Granger vd. (2007) çalışmalarında, çok yüksek dayanımlı betonlarda çatlakların kendi kendini onarmasını araştırmışlardır. Önceki deneysel çalışmalarda bu durumu belirleyebilmek için permeabilite testi kullanılırken bu çalışmada 3 eksenli eğilme deneyi kullanılmıştır. Çalışmada kendi kendine iyileşen betonun mekanik davranışı ve çatlak mekanizmasının AE analizi rapor edilmiştir. Deneylerde numune boyutu

50x100x500 mm olarak kullanılmıştır. Mekanik testler ile, iyileşme zamanına bağlı olarak global rijitliğin tekrar kazanılması ve yapının dayanımının yavaşça iyileşmesi araştırılmıştır. AE analizi ile çatlaklarda oluşan yeni kristallerden meydana gelen mekanik tepki izlenmiştir. Üç eksenli deney sırasında bu ürünlerde mikro çatlak oluşumu kaydedilmiş ve enerji analizi iyileşen betonun çatlak mekanizmasının anlaşılmasını sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, yeni oluşan kristalleri ve onlarda meydana gelen çatlak ilerlemesini de içermektedir. Numunelerde 3 eksenli deney için çentik bırakıldıktan sonra havada ya da suda kürlenmiştir. Suda kürlenmiş numunelerin hasar verildikten sonra ilk rijitliğine dönme eğilimi gösterdiği ve yavaş yavaş eğilme dayanımı kazandığı açıkça görülmüştür. Çalışılan bu özel beton mikro yapısında önemli miktarda hidrate olmamış çimento içermektedir ve hidrasyonun devam etmesi mevcut çatlağın iyileşmesini sağlamaktadır. Rijitliğin yeniden kazanılması yeni formdaki kristallerin çatlakları doldurmasıyla ilişkili olduğu görülmüştür. Elemanın dayanımını yavaş yavaş kazanması yeni form kristallerin aşamalı olarak gelişmesiyle ya da yeni oluşan kristaller ile ilk oluşan C-S-H kristalleri arasındaki zayıf bölge ile açıklanmıştır. AE analizi, numunelerin mevcut çatlaklarında iyileşme gerçekleştiğini desteklemek için kullanılmıştır. İyileşen numunenin çatlama sürecinin 2 aşaması olduğu görülüyor: Mevcut çatlağın içindeki hasar ve çatlak ilerleyişinin devamlılığı. Tüm bu araştırmaların gelecek çalışmalarda kendi kendine iyileşme mekanizmasının kimyasal ve fiziksel yapısını netleştirmek için mikroskobik gözlemlerle desteklenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Dai vd. (2012), çalışmalarında istatistiksel analiz ve AE tekniği kullanılarak tek kenarlı çentikli normal ve ultra yüksek performanslı beton örneklerinde hasar sürecini araştırmışlardır. 76.2x76.2x406.4 mm - 50.8x50.8x203.2 mm - 76.2 x76.2x330.2 mm olmak üzere çeşitli numune boyları kullanılmıştır. Ultra yüksek dayanımlı beton olarak Kuzey Amerika'da üretilen Lafarge *Ductal<sup>TM</sup>* kullanılmıştır. Çatlak ucu kayması ile ilgili olan kümülatif AE olaylarının numunenin mekanik yüklenmesiyle elde edilip, bir Weibull kırılma olasılığı dağılımı ve tek kenarlı çentik deneyi ile mekanik hasar davranışını açıklamışlardır. bi-logaritmik regresyon analiz ve Weibull hasar dağılımı, AE' den elde edilen sinyaller ile kalibre edilmiş ve hasar durumu, çatlak ağzı kaymasının bir fonksiyonu olarak öngörülebilmektedir. Kalibre edilen Weibull hasar fonksiyonu farklı derinlikli ve farklı yerde çentikleri olan normal ve yüksek dayanımlı betonlar arasında karşılaştırılmıştır. Daha derin çentiklere sahip örneklerde daha yüksek başlangıç gerilmesinden dolayı daha fazla AE hasarları görülmüştür. Sapmış çentikli örneklerde de kayma hasar etkisinden dolayı daha fazla AE sinyali ve karışık mod kırılma davranışı kaydedilmiştir. Lifli betonlarda lif sıyrılmasından dolayı lifsize göre daha fazla AE hitleri elde edilmiştir. Sonuçlar, Weibull kırılma olasılığı fonksiyonun

AE dataları ile kalibre edilmesi sayesinde beton gibi kırılğan malzemelerin mekanik yükleme altında hasar durumlarının açıklanabileceğini göstermiştir. AE ve istatistiksel analizlerin beraber kullanımı geliştirilerek gelecekte diğer kırılğan malzemelerde de kullanılabilceğini önermişlerdir.

Ozawa vd. (2012), yüksek dayanımlı betonda patlama etkisiyle oluşan boşluk mekanizmasını AE yöntemi ile araştırmışlardır. Çalışmada, beton farklı süre ve enerjilerde ısıya maruz bırakılarak ölçümler yapılmıştır. İç sıcaklık derecesi, buhar basıncı ve mikro çatlakların oluşumuyla ortaya çıkan AE olayının arasındaki ilişki araştırılmıştır. İnceleme sonucunda AE oluşumunun patlama sırasında oluşan hasarlarla ilişkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca, b-değeri analizi numunelerin nem içerikleri dikkate alınmadan kırılma mekanizmasını açıklamak için başarıyla uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda buhar basıncının etkisiyle AE olayının başladığı ve AE tekniği ile patlamalı boşluk oluşumu izlenebilmiştir. Genel olarak, AE tekniği değişik nem içeriklerindeki numunelerde, ısınma sırasında maksimum buhar basıncının öncesi ve sonrasında numunelerin incelenmesinde kullanılabilmiştir. Islak ve kuru numunelerde b değeri birbiri ile neredeyse aynı çıkmıştır, bu nedenler nem içeriği dikkate alınmaksızın betonun kırılma mekanizmasının tahmininde kullanılabilceği belirtilmiştir.

Yapılan literatür taramasından görülebileceği gibi kırılma ve çatlak mekanizmasının AE ile incelenmesinde yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda ilgili çalışmalar ise çok sınırlıdır, yapısal boyutta bir çalışmaya ise rastlanılmamıştır.

Ancak, hızla gelişen yüzyılda, az bakım gerektiren, uzun ömürlü ürünlerle birlikte yapım ve işletme verimliliği sağlamak gibi hedefler düşünüldüğünde RPB' nin yapı malzemesi olarak kullanımı ön plana gelmiştir. Yakın zamandaki, büyük açıklıklı köprü ve çok katlı yüksek yapı inşaatı eğilimi çok yüksek dayanımlı betonların kullanımını güvenliliği, elverişliliği, durabilitesi ve ekonomik avantajlarından dolayı zorunlu hale getirmiştir (Yi vd.,2012). Bu nedenle RPB ile üretilen yapısal elemanların da AE ile kırılma ve çatlak mekanizmalarının araştırılması literatüre katkı sağlayacaktır.



## 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada öncelikle ön dökümler gerçekleştirilerek uygun bir RPB karışımı araştırılmıştır. Daha sonra seçilen optimum RPB karışımı ile laboratuvar koşullarında kiriş elemanlar üretilmiş, ardından mekanik deneyler ve akustik emisyon yöntemiyle RPB kirişlerinin kırılma mekanizmaları incelenmiştir.

### 4.1. Materyal

#### 4.1.1. Bağlayıcı malzemeler

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak çimento, silis dumanı ve uçucu kül kullanılmıştır. Özelliklerine göre kısaltmalarla adlandırılmış ve aşağıda açıklanmıştır:

**C-1:** CEM I 42,5 R tipi çimento Afyon Set Çimento'dan temin edilmiştir. Buna ait kimyasal analiz sonuçları ve mekanik özellikler Tablo 4.1' de verilmektedir.

**C-2:** CEM I 52,5 N tipi çimento Afyon Çimento Fabrikasından temin edilmiştir. Buna ait kimyasal analiz sonuçları ve mekanik özellikler Tablo 4.1' de verilmektedir.

**SD:** Etibank Antalya Elektrometalurji Sanayii işletmesinden temin edilen çalışmada kullanılan silis dumanı ferrosilisyum üretimi sırasında yan ürün olarak çıkan çok ince taneli tozdur. Silis dumanına ait bazı kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 4.1' de verilmektedir.

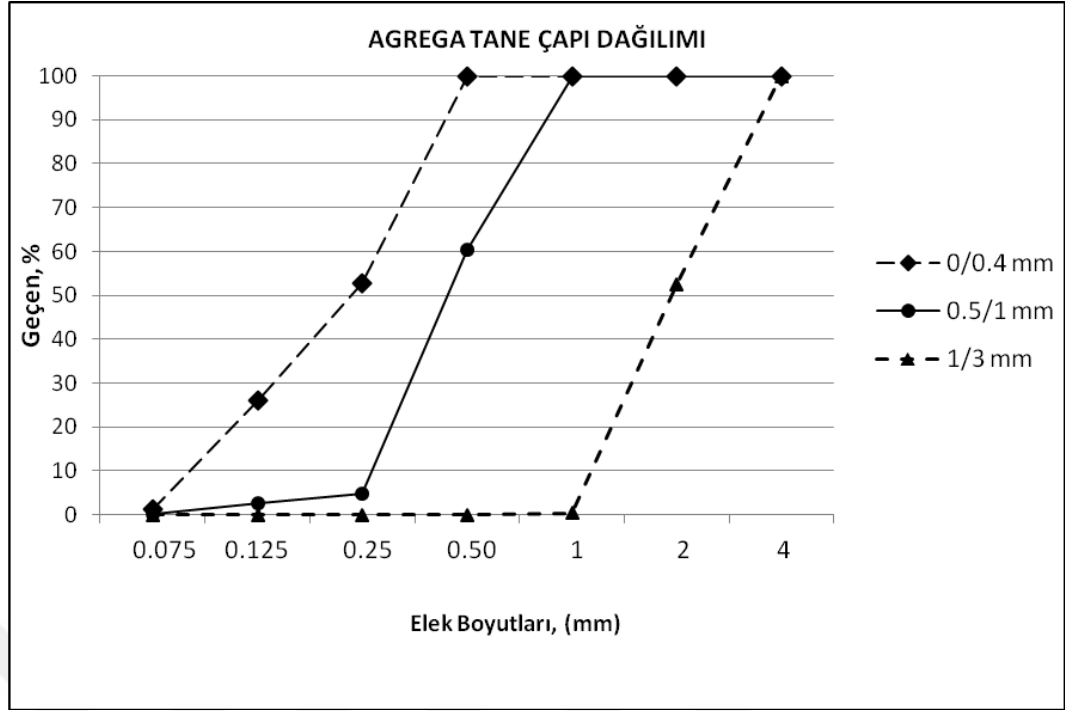
**UK:** Çayırhan termik santralinden temin edilen C sınıfı uçucu küle ait kimyasal analiz sonuçları ve mekanik özellikler Tablo 4.1' de verilmektedir.

Tablo 4.1. Çimento, silis duman ve uçucu külün kimyasal ve mekanik özellikleri

Özellik	Ç-1	Ç-2	SD	UK
	CEM I 42.5 R	CEM I 52.5 N	Silis Dumanı	Uçucu Kül
SiO <sub>2</sub> , (%)	19,72	19,64	87,29	47,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (%)	5,31	4,89	0,47	11,56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (%)	3,37	3,38	0,62	7,22
CaO, (%)	62,33	63,04	0,81	15,94
MgO, (%)	2,33	1,87	4,47	7,77
Na <sub>2</sub> O, (%)	0,53	0,59	1,25	1,59
K <sub>2</sub> O, (%)	0,77	0,38	1,28	3,04
SO <sub>3</sub> , (%)	3,33	2,79	0,22	2,78
Kızdırma Kaybı, (%)	2,09	1,95	3,08	0,42
Cl, (%)	0,0136	-	0,1351	-
Çözünmeyen Kalıntı, (%)	0,48	-	78,72	-
Ö. Ağırlık	3,08	3,10	2,22	-
45 µm Üstü (%)	-	-	-	32,5

#### 4.1.2. Agregta

Çalışmada, Aydınlar Madencilik Ltd. Şti.' den temin edilen 0/0,4 mm, 0,5/1 mm ve 1/3 mm tane boyutuna sahip kırma kireç taşı esaslı kırma ince agregta kullanılmıştır. Deneyler sırasında 0/0,4 mm olan agregta mevcut haliyle, 1/3 mm olan agregta elenerek, 0,5/1 mm olan agregta ise deney türüne göre elenerek veya elenmeden kullanılmıştır. Karışım dizaynları sırasında agregalar fırın kurusu durumunda kullanılmıştır. Agregalara ait elek analizi grafiği Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1. Agregat elek analizi

#### 4.1.3. Çelik lif

Çalışmada, küçük numunelerde (50x50x50mm, 40x40x160mm) 6 mm uzunluğundaki kısa lif (SF-1), büyük numunelerde (125x250x1500mm) ise kısa lif (SF-1) ve uzun kancalı lif (SF-2) birlikte kullanılmıştır. Özelliklerine göre kısaltmalarla adlandırılmış ve aşağıda açıklanmıştır:

**SF-1:** Pirinç kaplı olarak Draco Yapı Kimyasalları'ndan 6 mm uzunluğunda, 0.16 mm çapında tel çekme dayanımı  $>2000 \text{ N/mm}^2$ , elastisite modülü de yaklaşık  $190000 \text{ N/mm}^2$  olacak şekilde temin edilmiştir (Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b).

**SF-2:** 60 mm uzunluğunda 0.75 mm kalınlığında çekme dayanımı  $1225 \text{ N/mm}^2$ , elastisite modülü yaklaşık  $200000 \text{ N/mm}^2$  olan Dramix RC 80 60 BN kancalı lif kullanılmıştır (Şekil 4.2c ve Şekil 4.2d).



Şekil 4.2. Çelik lifler: (a)SF-1 çelik lif yığı, (b) tanesi, (c) SF-2 çelik lif yığı, (d) tanesi

#### 4.1.4. Akışkanlaştırıcı

Çalışmada ön dökümlere iki farklı kimyasal katkı ile başlanmış, diğer deneylere ise seçilen biri ile devam edilmiştir. Özelliklerine göre kısaltmalarla adlandırılmış ve aşağıda açıklanmıştır:

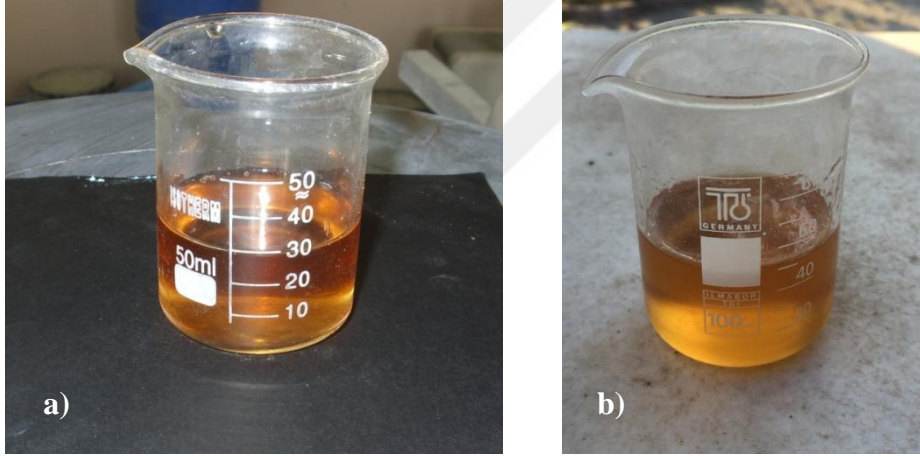
**SP:** INKA BSC-PB polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi INKA Yapı Kimyasalları'ndan temin edilmiş ve teknik özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir (Şekil 4.3a).

**HP:** Draco Levelcon FX10 polikarboksilat esaslı hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi Draco Yapı kimyasalları Ltd. Şti.' den temin edilmiş ve teknik özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir (Şekil 4.3b).



Tablo 4.2. Kimyasal katkıların özellikleri

Kısaltma	SP	HP
Özellik	INKA BSC-PB	LEVELCON FX10
Görünüm	Açık kahve renkli kahverengi sıvı	Açık kahve renkli kahverengi sıvı
Yoğunluk	1,10 kg/lt $\pm$ 0,03 (20°C'de)	1,098 kg/lt
pH	5,0 - 8,0	5,97
Klorür	Eser	0,012
Kullanım Aralığı, %	0.2 – 2.0	0.6 - 2.0



Şekil 4.3. Akışkanlaştırıcılar: (a) “SP” – BCS PB süperakışkanlaştırıcı, (b) “HP”- Levelcon FX10 hiperakışkanlaştırıcı

#### 4.1.5. Su

Çalışmada Bornova (İzmir) şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

## 4.2. Metot

Deneysel çalışmada öncelikle optimum bir karışım elde edebilmek için ön dökümler gerçekleştirilmiştir. Karışım seçildikten sonra 3 farklı donatı detayına sahip RPB kiriş elemanlar üretilmiş ve daha sonra bu kirişler üzerinde mekanik ve akustik deneyler gerçekleştirilmiştir. Alt başlıklarda ön dökümler, kiriş eleman üretimi, mekanik ve akustik deneyler sırasında kullanılan metotlar açıklanacaktır.

### 4.2.1. Karışım Dizaynları

Ön dökümler sırasında laboratuvar koşullarında 5 grup deney gerçekleştirilmiştir. Her grupta bir öncekine göre daha iyi basınç dayanımı ve işlenebilirlik elde edebilmek için karışım oranlarında değişiklik yapılmış ve optimum karışım elde edilmeye çalışılmıştır. Bu bölümde her grup karışım ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Grup-1 deneylerinde; literatür araştırılarak 3 farklı reçete seçilmiş, mevcut laboratuvar koşullarına uyarlanarak 7 adet ön döküm gerçekleştirilmiştir. Taze halde iken yayılması ölçülmüş, sertleşmiş halde de 50x50x50 mm numuneler üzerinde basınç dayanımı ölçülmüştür. Numunelere 20°C standart su kürü ve 60°C sıcak su kürü uygulanmıştır. 1.gruba ait karışım dizaynı Tablo 4.3' de verilmiştir.

Tablo 4.3. Grup-1 dökümlerinin karışım dizaynları

Karışım Dizaynları, kg/m <sup>3</sup>								
Başlangıç Reçeteleri*		R-1			R-2		R-3	
Malzemeler	Karışımın Adı	Z	Y	X	W	V	U	T
	Çimento	C1 (42,5)	785	785	-	-	-	-
C2 (52,5)		-	-	785	830	830	680	680
Silis Dumanı		196	196	196	291	291	408	408
Uçucu kül		-	-	-	-	-	-	-
Çelik Lif	SF-1	143,4	143,4	143,4	234	234	156	156
	SF-2	-	-	-	-	-	-	-
Agrega	0.0/0.4 mm	434	434	434	244	244	974	974
	0.5/1.0 mm#	652	652	652	244	244	-	-
	1.0/3.0 mm	-	-	-	489	489	-	-
Akışkanlaştırıcı	SP	35	35	35	55	55	44	55,8
	HP	-	-	-	-	-	-	-
Su		212,4	200,7	200,7	165,4	174,7	221	150
Oranlar								
s/ç (ağırlıkça)		0,270	0,255	0,255	0,199	0,210	0,325	0,220
s/b (ağırlıkça)		0,216	0,204	0,204	0,147	0,155	0,203	0,137
Çelik lif,% (tüm hacime oranla)		1,8	1,8	1,8	3	3	2	2
a/b, % (ağırlıkça)		3,50	3,50	3,50	4,90	4,90	4,04	5,12
Yayıma, cm		20	17	16	10,5	<16	<16	<16

\*R-1, R-2, R-3 kodlarıyla belirtilen başlangıç reçeteleri sırasıyla Beglarigale vd. (2014), Yazıcı vd. (2009), Menefy (2007)'in çalışmalarından alınmıştır. Ancak makalelerdeki deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve kür yöntemleri birebir laboratuvar koşullarında sağlanamayacağından, reçeteler üzerinde mevcut koşullara uygun olacak şekilde değişiklikler yapılarak 7 farklı karışım elde edilmiştir.

#0.5/1.0 mm isimli agregaya elenerek kullanılmıştır.

Grup-2 deneylerinde; Y ve X karışımları üzerinden bir miktar daha su kesilmeye çalışılmış, bunun için katkı değiştirilerek deneylere Draco Levelcon FX10 hiper akışkanlaştırıcı (HP) ile 50x50x50 mm örnekler üretilerek devam edilmiştir. 20°C

standart su kürü, ve 70°C buhar kürü olmak üzere 2 adet kür yönteminin RPB' nin basınç dayanımındaki etkisi karşılaştırılmıştır. Ayrıca, buhar kürü görececek olan numuneler ya 6 saat sonra kalıpla birlikte ya da 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış şekilde 3 gün süre ile buhara tabi tutulmuştur. 2.gruba ait karışım dizaynı Tablo 4.4' de verilmiştir.

Tablo 4.4. Grup-2 dökümlerinin karışım dizaynları

Başlangıç Karışımı*		Y	X
Malzemeler	Karışımın Adı	A	B
		Çimento	C1 (42,5)
	C2 (52,5)	-	785
Silis Dumanı		196	196
Uçucu kül		-	-
Çelik Lif	SF-1	143,4	143,4
	SF-2	-	-
Agrega	0.0/0.4 mm	434	434
	0.5/1.0 mm#	652	652
	1.0/3.0 mm	-	-
Akışkanlaştırıcı	SP	-	-
	HP	31	31
Su		174	174
Oranlar			
s/ç (ağırlıkça)		0,221	0,221
s/b (ağırlıkça)		0,177	0,177
Çelik lif,%		1,8	1,8
a/b, % (ağırlıkça)		3,16	3,16
Yayıma, cm		<15,5	<15,5

\*Grup-1 deneylerinden elde edilen Y ve X karışımlarının su ve akışkanlaştırıcı oranları değiştirilerek sırasıyla A ve B olmak üzere 2 farklı karışım daha elde edilmiştir. # 0.5/1.0 mm isimli agrega elenerek kullanılmıştır.

Grup-3 deneylerine geçildiğinde, ilerleyen zamanda üretilecek yapısal boyuttaki kirişler laboratuvar koşullarında üretileceğinden deneylerdeki kür uygulamasının sıcak su kürü olarak devam etmesi öngörülmüştür. Bu nedenle Tablo 4.4 'de belirtilen 'A' karışımı aynen kullanılmış, sadece kalıp alma süresi, kür sıcaklığı, kür sürelerinin basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Diğer gruplarda olduğu gibi 50x50x50 mm numuneler üretilmiştir.

Yukarıda anlatılan 3 grup deney süresince uygun basınç dayanımları elde edildiğinden 4.grup deneylerde; laboratuvar ortamında uygulama kolaylığı sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla, RPB' nin akışkanlığının artırılması ve agreganın elenmeden kullanılması öngörülmüştür. Bu nedenle, 4.grup deneylerde RPB' nin akışkanlığının artırılması katkı miktarı artırılarak ve uçucu kül kullanılarak incelenmiş ve agreganın da elenmeden kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. 4.gruba ait karışım dizaynı Tablo 4.5' de verilmiştir. Diğer gruplarda olduğu gibi 50x50x50 mm numuneler üretilmiştir.

Tablo 4.5. Grup-4 dökümlerinin karışım dizaynları

Karışımın Adı		A	C	D	E	F	G
<b>Malzemeler</b>	<b>Çimento</b>						
	C1 (42,5)	785	785	785	785	635	585
	C2 (52,5)	-	-	-	-	-	-
	<b>Silis Dumanı</b>	196	196	196	196	196	196
	<b>Uçucu kül</b>	-	-	-	100	150	200
<b>Çelik Lif</b>	SF-1	143,4	143,4	143,4	143,4	143,4	143,4
	SF-2	-	-	-	-	-	-
<b>Agrega</b>	0.0/0.4 mm	434	434	1086*	434	434	434
	0.5/1.0 mm	652	652		652	652	652
	1.0/3.0 mm	-	-	-	-	-	-
<b>Akışkanlaştırıcı</b>	SP	-	-	-	-	-	-
	HP	31	43,6	31	31	31	31
<b>Su</b>		174	174	174	174	174	174
<b>Oranlar</b>							
<b>s/ç (ağırlıkça)</b>		0,221	0,221	0,221	0,221	0,274	0,297
<b>s/b (ağırlıkça)</b>		0,177	0,177	0,177	0,161	0,177	0,177
<b>Çelik lif, %</b>		1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
<b>a/b, % (ağırlıkça)</b>		3,16	4,44	3,16	2,86	3,16	3,16
<b>Yayıma, cm</b>		15,5	<15	<15	<13	<17	16

\*0.5/1.0 mm isimli agregası, bu dizayn için elenmeden kullanılmıştır.

Yukarıdaki karışımlarda, uçucu külün çimento ile yer değiştirilmesinin karışımın akışkanlığı üzerinde olumlu etkisi görüldüğünden, agreganın elenmeden kullanılmasının basınç dayanımlarını belirgin şekilde düşürmediği görüldüğünden 5. grup deneylerde D karışımı ve uçucu küllü F ve G karışımlarından yola çıkılarak akışkanlaştırıcı bir miktar daha arttırılmış ve 40x40x160 mm beton örnekler dökülerek eğilme dayanımları incelenmiştir, ardından eğilme deneyinden kalan parçalar üzerinden de basınç dayanımları araştırılmıştır. Ayrıca, yapılan deneyler sonucunda beton dayanımları

istenen mertebelere çıktığından bu son grupta dayanımı bir miktar daha arttırabilmek açısından deneyin genelinde kullanılan külden farklı bir yöntem de seçilen bazı karışımlarda denenmiştir. Deneysel çalışma boyunca kullanılan kür yöntemlerinin tamamı 4.2.5 bölümünde belirtilmiştir. Grup-5 deneylerinde kullanılan karışımların dizaynları Tablo 4.6' da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Grup-5 dökümlerinin karışım dizaynları

Başlangıç Karışımı*		D	D	D-F	D-G
Malzemeler	Karışımın Adı	H	I	J	K
Çimento	C1 (42,5)	785	685	635	585
	C2 (52,5)	-	-	-	-
Silis Dumanı		196	196	196	196
Uçucu kül		-	100	150	200
Çelik Lif	SF-1	143,4	143,4	143,4	143,4
	SF-2	-	-	-	-
Agrega	0.0/1.0 mm#	1086	1086	1086	1086
Akışkanlaştırıcı	SP	-	-	-	-
	HP	40	40	40	40
Su		174	174	174	174
<b>Oranlar</b>					
s/ç (ağırlıkça)		0,221	0,254	0,274	0,297
s/b (ağırlıkça)		0,177	0,177	0,177	0,177
Çelik lif,%		1,8	1,8	1,8	1,8
a/b, % (ağırlıkça)		4	4	4	4
Yayılma, cm		<15	<15	<15	<15

\*Grup-4 deneylerinden elde edilen D, F, G karışımları ve kombinasyonlarında agrega ve akışkanlaştırıcı miktarları değiştirilerek H, I, J, K olarak adlandırılan yeni karışımlar elde edilmiştir.

#Agregalar elenmeden kullanılmıştır.

RPB kiriş üretimi için ön dökümlerden elde edilen I karışımının; yayılma değeri, eğilme ve basınç dayanımı bakımından yeterli mertebelerde olduğuna karar verilmiş, ve deneylere bu karışım ile devam edilmiştir. 125x250x1500 mm boyutlarında 3 farklı donatı detayına sahip betonarme kirişler üretilmiştir. Numune boyutları büyütüldüğünden I karışımının dizaynında birkaç değişiklik yapılarak kısa düz çelik lif SF-1 ve kancalı SF-2 lifleri (Bkz. Bölüm 4.1) birlikte kullanılmış ve yeni bir L karışımı elde edilmiştir. Karışım taze halde iken çökme deneyi yapılmış ve ardından kalıba daldırma tipi vibratör yardımı ile yerleştirilmiştir. Laboratuvar koşullarında kirişin boyutlarına özel kür havuzu oluşturulmuş ve kiriş elemanlar 90°C de sıcak suda 3 gün ısı işlem görmüştür. RPB kirişlerin hepsinde Tablo 4.7' de belirtilen karışım dizaynı kullanılmıştır.

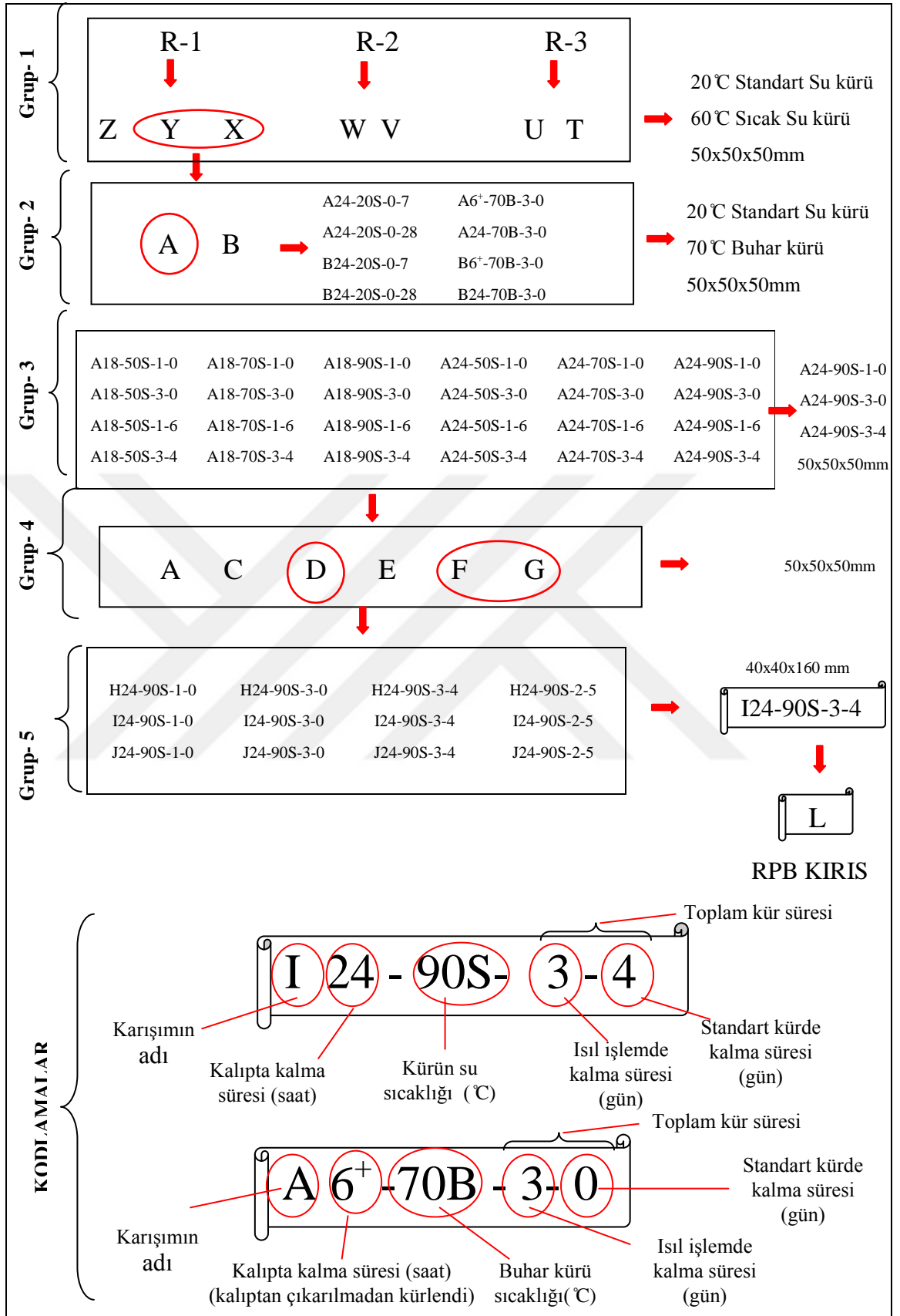
Tablo 4.7. RPB kirişlerin karışım dizaynı, kg/m<sup>3</sup>

Başlangıç Karışımı	Karışımın Adı	C1 (42,5)	SD	UK	SF-1	SF-2	Agrega (0.0-1.0 mm)	HP	Su	Yayılma, cm
I*	L	685	196	100	71,7	71,7	1086	40	174	>45

\*Ön dökümlerden elde edilen I karışımının lif tipi ve miktarı değiştirilerek yeni bir L karışımı elde edilmiştir.

Bu çalışmada, basınç dayanımı ve yayılma değeri açısından uygun olan bir RPB karışımı elde edebilmek için 5 grup deney gerçekleştirilmiştir, her bir grup deneyden elde edilen sonuçlara göre çalışmalara yön verilmiş ve yeni karışımlar tasarlanmıştır. Ardından bu çalışma için yeterli olan bir karışımla RPB kirişler üretilmiştir. Aşağıda Şekil 4.4' de uygun karışım elde edilene kadar geçen süreç şematik olarak gösterilmiştir.





Şekil 4.4. RPB karışımlarının hazırlanma süreci

#### 4.2.2. Karışımın hazırlanması

Deneme dökümlerinde; TS EN 196-1 standardına uygun olan standart harç mikserinde önce toz malzemeler 1,5 dk. karıştırılmış, ardından kimyasal katkının bir kısmı su ile karıştırılarak karışıma eklenmiş ve 1,5 dk. daha karıştırılmıştır. Toz ve sıvı malzemelerin homojen karışımı sağlandıktan sonra kalan katı malzemeler (agrega+lif) ilave edilmiş ve 1,5 dk daha düşük devirde karıştırılmıştır. Son olarak kalan kimyasal katkı ilave edilerek 3 dk. hızlı devirde karıştırılmaya devam edilmiş ve homojen bir karışım elde edilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Standart harç mikseri ve toz malzemeler

RPB kiriş dökümlerinde 50 lt. kapasiteli beton mikserinde önce toz malzemeler karıştırılmış ardından kimyasal katkının bir kısmı su ile karıştırılarak karışıma eklenmiştir. Toz ve sıvı malzemelerin homojen karışımı sağlandıktan sonra kalan katı malzemeler (agrega+lif) ilave edilerek karıştırmaya devam edilmiş, daha sonra kalan kimyasal katkı da ilave edilip karıştırılarak karışım homojen bir hale getirilmiştir.

### 4.2.3. Kıvamın belirlenmesi

Ön dökümler sırasında, 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm kalıplara yerleştirilen karışımların kıvamları yayılma tablası kullanılarak ASTM C1437-07' ye uygun olarak belirlenmiştir. Yayılma tablası 262 mm paslanmaz çelik tabla ve paslanmaz çelik kalıptan oluşmaktadır. Karışımların kıvamları 10 - 20 cm arasında değişmekte olup, karışım dizaynlarındaki Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5, Tablo 4.6' da belirtilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Ön dökümler için kıvam deneyi

RPB kiriş dökümleri sırasında, 125x250x1500 mm kalıplara yerleştirilen karışımların kıvamını ölçmek için slump (Abrams) konisi kullanılmıştır. Ancak karışımların yüksek işlenebilirliğinden ötürü çökme değeri yerine yayılma çapı kaydedilmiştir. Karışımların yayılma çapı Tablo 4.7'de belirtilmiştir.

### 4.2.4. Harcın kalıba yerleştirilmesi

Ön dökümlerde tüm karışımlar 50x50x50 mm ya da 40x40x160 mm kalıplara masa tipi sarsma tablası kullanılarak TS EN 196-1 standardına uygun olarak yerleştirilmiştir.

RPB kiriş için yapılan dökümlerde karışımlar 125x250x1500 mm kalıba daldırma tipi vibratör yardımıyla iki katman halinde ard arda dökülmüştür.

#### 4.2.5. Krleme

Bu çalışmada n dökümlerde farklı birçok kr yöntemi denenmiştir. Grup numarasına göre aşağıda Tablo 4.8' de gösterilmiştir.

Laboratuvar koşullarında RPB kirişlerin boyutlarına özel kr havuzu oluşturulmuştur (şekil 4.7). Boyutları 125x250x1500 mm olan kiriş numuneler 45 saat sonra kalıptan çıkarılıp başlangıçta oda sıcaklığında olan kr havuzuna yerleştirilmiştir. Havuz 24 saat içerinde 90°C ısıya ulaşmıştır. Termostatlı elektronik sistem sayesinde kiriş elemanlar 3 gün 90°C sıcaklıktaki suda kürlenmiştir. Ardından 1 gün boyunca havuzun içinde soğumaya bırakılmıştır. 7 günlük dayanım kazanan numune üzerinde daha sonra mekanik ve akustik deneyler gerçekleştirilmiştir.



Tablo 4.8 . Çalışmada kullanılan kür yöntemleri

	20 °C Standart Su Kürü	50 °C Sıcak Su Kürü	60 °C Sıcak Su Kürü	70 °C Sıcak Su Kürü	70 °C Buhar Kürü	90°C Sıcak Su Kürü
Grup-1	Z24-20S-0-7; Z24-20S-0-28 Y24-20S-0-7; Y24-20S-0-28 X24-20S-0-7; X24-20S-0-28 W24-20S-0-7; W24-20S-0-28 V24-20S-0-7; V24-20S-0-28 U24-20S-0-7; U24-20S-0-28 T24-20S-0-7; T24-20S-0-28	-	X24-60S-7-0 X24-60S-28-0 W24-60S-7-0 W24-60S-28-0 V24-60S-7-0 V24-60S-28-0	-	-	-
Grup-2	A24-20S-0-7 A24-20S-0-28 A24-20S-0-7 B24-20S-0-28	-	-	-	A6 <sup>+</sup> -70B-3-0 A24-70B-3-0 B6 <sup>+</sup> -70B-3-0 B24-70B-3-0	-
Grup-3	-	A18-50S-1-0, A24-50S-1-0 A18-50S-3-0, A24-50S-3-0 A18-50S-1-6, A24-50S-1-6 A18-50S-3-4, A24-50S-3-4	-	A18-70S-1-0, A24-70S-1-0 A18-70S-3-0, A24-70S-3-0 A18-70S-1-6, A24-70S-1-6 A18-70S-3-4, A24-70S-3-4	-	A18-90S-1-0, A24-90S-1-0 A18-90S-3-0, A24-90S-3-0 A18-90S-1-6, A24-90S-1-6 A18-90S-3-4, A24-90S-3-4
Grup-4	-	-	-	-	-	A24-90S-1-0; C24-90S-1-0; D24-90S-1-0 E24-90S-1-0; F24-90S-1-0; G24-90S-1-0
Grup-5	-			-	-	H24-90S-1-0, I24-90S-1-0, J24-90S-1-0, H24-90S-3-0, I24-90S-3-0, J24-90S-3-0, H24-90S-3-4, I24-90S-3-4, J24-90S-3-4, H24-90S-2-5#, I24-90S-2-5#

Kodlamaların açıklamaları için sayfa 47' de Şekil 4.4' e bakınız.



Şekil 4.7. Kiriş numuneler (125x250x1500mm) için 90 °C sıcak su kürü havuzu

#### 4.2.6. Basınç dayanımlarının belirlenmesi

Ön dökümler sırasında basınç dayanımları, basınç dayanımı deney metodu standardı TS EN 196-1'e uygun olarak 50x50x50 mm küp örnekler üzerinde doğrudan, 40x40x160 mm kirişlerde ise eğilmede çekme deneyinden çıkan 2 parça halindeki numuneler üzerinden 40x40 mm yükleme aparatına sahip beton presi yardımıyla belirlenmiştir.

RPB kirişler üretimine geçildiğinde, kirişlerle aynı koşullarda kürlenmiş 150x150x150 mm küp numuneler İstanbul Teknik Üniversitesi'nde (İTU) yapı laboratuvarında Instron 1000RD 500 ton kapasiteli basınç cihazında yüklenerek basınç dayanımları elde edilmiştir.

#### 4.2.7. Eğilme dayanımlarının belirlenmesi

Ön dökümler sırasında eğilme dayanımları, 40x40x160 mm numuneler üzerinde tek noktadan yüklenerek elde edilmiştir. Mesnet açıklığı 100 mm'dir.

RPB kiriş üretimi sırasında, kirişlerle aynı koşullarda kürlenmiş 100x100x600 mm numuneler üzerinden TS EN 12390-5 Ek A'ya uygun olarak ve orta noktadan yük uygulanarak kırılmıştır. Mesnet açıklığı 450 mm'dir.

#### 4.2.8. RPB kiriş deney elemanlarında donatıların hazırlanması

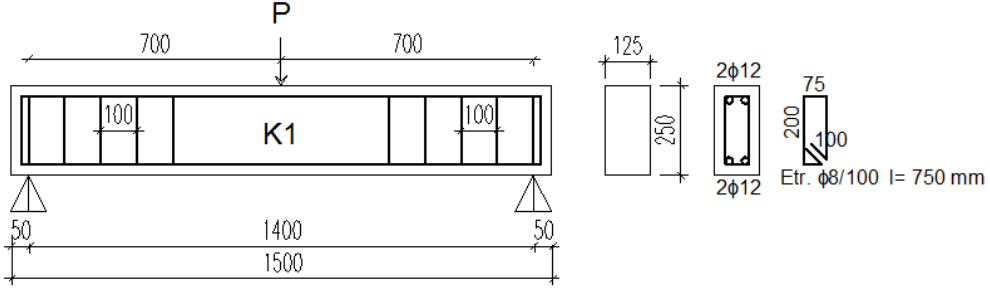
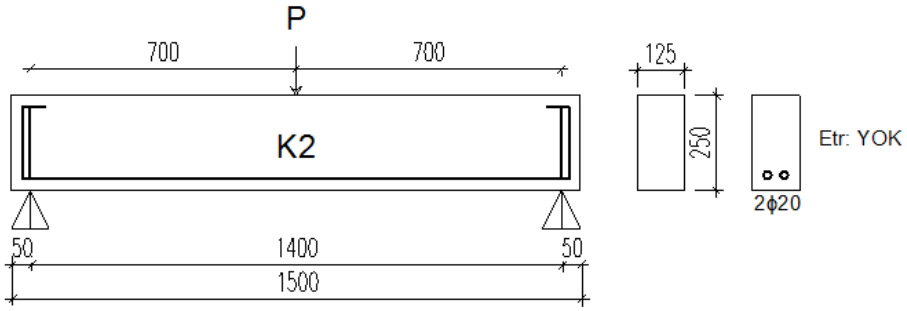
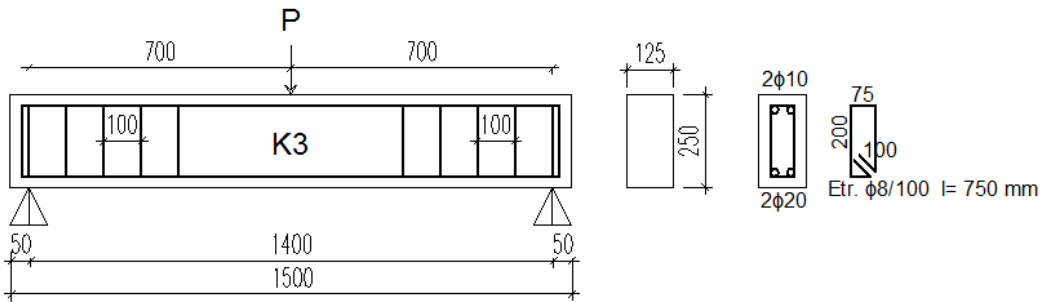
RPB kiriş üretimi sırasında 3 farklı donatı detayına sahip K1, K2 ve K3 kiriş elemanları hazırlanmıştır.

K1 numunesi  $2\phi 12$  montaj ve alt donatıya sahip olup  $\phi 8/10$  etriye ile sarılmıştır. Bu elemanda etriye, elemanın kesme yerine özellikle eğilmeden kırılmasını sağlamak amacıyla daha sık olarak kullanılmıştır. Donatı detayları Tablo 4.9’ da gösterilmiştir.

K2 numunesi sadece  $2\phi 20$  alt donatıya sahiptir. Etriye ve montaj donatısı kullanılmamıştır. Bu elemanda alt donatı elemanın eğilme yerine özellikle kesmeden kırılmasını sağlamak amacıyla daha çok kullanılmış, etriye ise bu amaçla hiç kullanılmamıştır. Donatı detayları Tablo 4.9’ da gösterilmiştir.

K3 numunesi  $2\phi 10$  montaj ve  $2\phi 20$  alt donatıya sahip olup  $\phi 8/10$  etriye ile sarılmıştır. Bu elemanda etriye ve alt donatı Tablo 4.9’da belirtildiği gibi kullanılarak, hem kesme hem eğilme durumunda RPB kirişin davranışı gözlenmiştir.

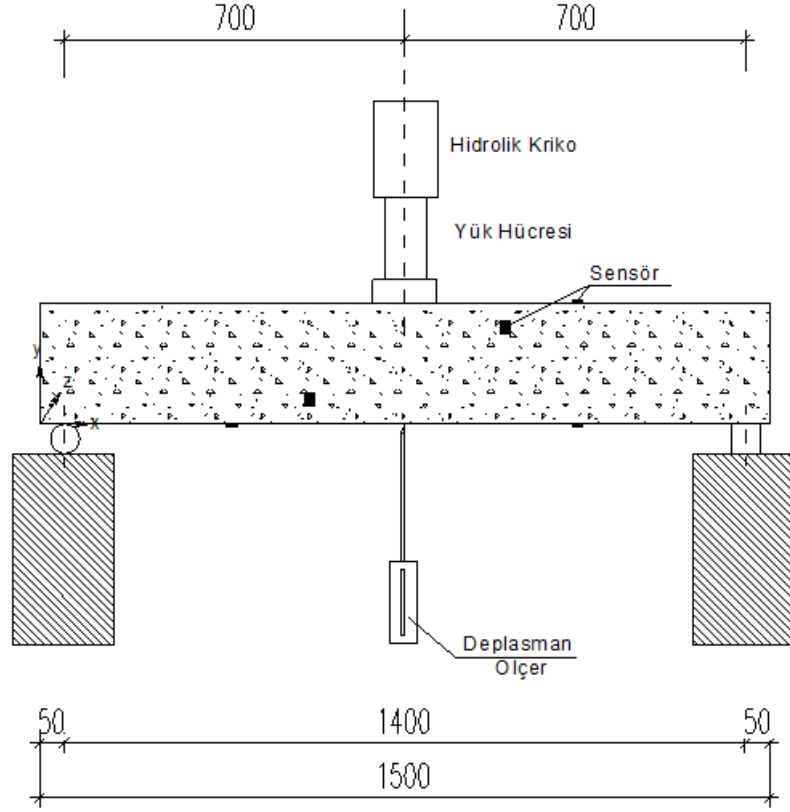
Tablo 4.9. RPB kiriş elemanlar K1 - K2 ve K3 için donatı detayları

**Donatı Bilgileri:****K1 Elemanı****K2 Elemanı****K3 Elemanı**



#### 4.2.9. Kiriş yükleme düzeneği

RPB kiriş elemanlar 3 noktalı yükleme düzeneği ile test edilmiştir (Şekil 4.8) ve deplasman ölçer aracılığı ile yük-deplasman grafiği çizilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.8. Kiriş yükleme düzeneği

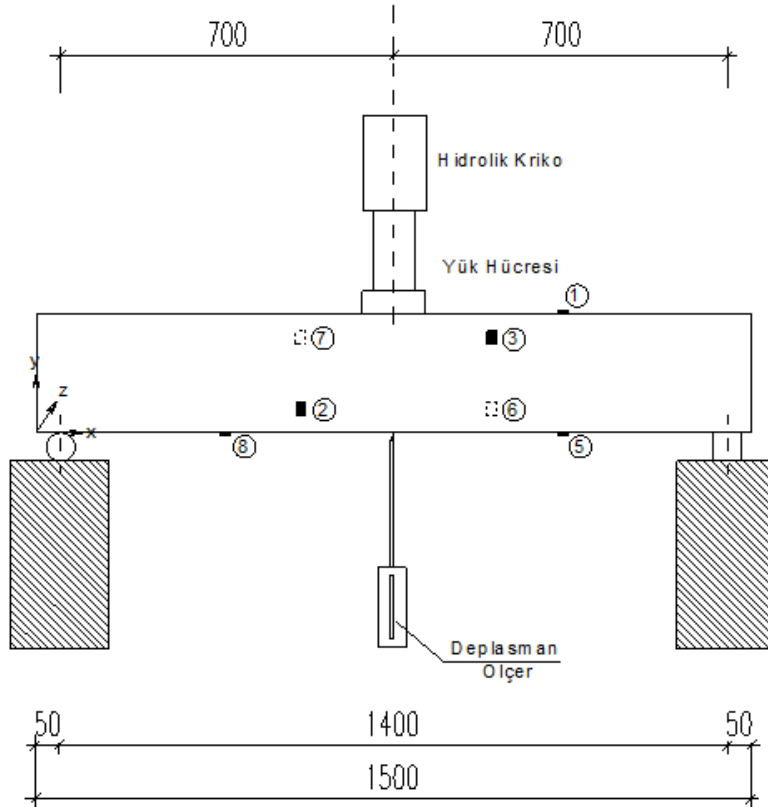


Şekil 4.9. Deplasman ölçer

#### 4.2.10. AE düzeneği

AE'de kullanılan genel araçlar, önyükselteç, yükselteç (amplifikatör), filtreler, sensörler, analiz ve depolama ekipmanları olarak da bilgisayarlı sistemler kullanılmaktadır (Gholizadeh vd., 2015).

Bu çalışmada 7 adet 150 kHz (R15, PAC) sensör kırımların yüzeylerine yapıştırılarak, yük uygulanmasıyla oluşan çatlakların yüksek frekanslı ses dalgası formunda çıkardığı enerjiler algılanmıştır. AE verileri Mistras 8 kanallı DİSP AE sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Sistemden ve önyükselteçlerden kazanılan 40 dB ile AE dalgaları yükseltilmiştir. Eşik seviyesi 42 dB olarak ayarlanmıştır. AE sensörleri kırımların yüzeylerine silikon gres yağı ile yapıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan deney ekipmanı ve sensörlerin yerleşim yerleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir, sensör yerleşim koordinatları ise Tablo 4.10'da belirtilmiştir.



- Arka yüze yerleştirilen sensörler (6, 7 no)
- Ön yüze yerleştirilen sensörler (2, 3 no)
- Üst ve alt yüze yerleştirilen sensörler (1 ve 5, 8)

Şekil 4.10. Sensör yerleşim şeması (mm)



Şekil 4.11. AE düzeneği elemanları: (a) bilgisayarlı veri toplama sistemi, (b) ana toplayıcı, (c) önyükselteç, (d) sensör

Tablo 4.10. Sensör koordinatları (cm)

Sensör No	K1 12.5x25x150 cm	K2 12.5x25x150 cm	K3 12.5x25x150 cm
1	(110.5; 25; 6.5)	(110.5;25; 6.5)	(110.5;25; 6.5)
2	(55.5 ; 5; 0)	(55.5 ; 5; 0)	(55.5 ; 5; 0)
3	(95.5; 20; 0)	(95.5; 20; 0)	(95.5; 20; 0)
8	(50.5; 0; 6.5)	(50.5; 0; 6.5)	(50.5; 0; 6.5)
5	(95.5; 0; 6.5)	(100.5; 0; 6.5)	(100.5; 0; 6.5)
6	(95.5; 5; 13)	(95.5; 5; 13)	(95.5; 5; 13)
7	(55.5; 20; 13)	(55.5; 20; 13)	(55.5; 20; 13)

#### 4.2.11. Çalışmada kullanılan AE parametreleri

AE sinyallerini yorumlanırken aşağıdaki parametreler kullanılmıştır:

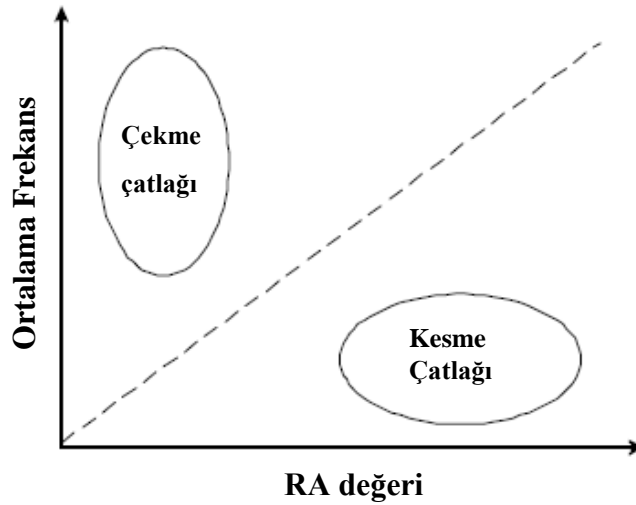
**AE Enerjisi:** Genellikle düzeltilmiş sinyal zarfının altında kalan alan ile ifade edilir. Enerji, AE kaynağının büyüklüğünü yorumlamak için 'sayı' dan daha çok tercih edilir, çünkü devam süresi ve genliğe karşı hassas iken, çalışma frekansı ve eşik voltajına daha az bağlıdır.

**Ortalama Frekans (Sayı/Süre):** Ortalama Frekans, sayının süreye bölünmesi ile elde edilir (count/duration). Sinyal dalga formunun kaydedilmesinin zor olduğu zamanlarda ortalama frekans sıklıkla kullanılır.

**Süre:** İlk ve son eşik değerini geçen sinyaller arasındaki zaman farkıdır.

**Genlik:** Sinyal voltajının en yüksek noktasını gösterir. AE sinyalinin genliği kaynaktaki olayın büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir.

**RA değeri (Yükselme zamanı/Maksimum Genlik) :** Eşik değerini geçen ilk pik ile en yüksek pik arasında geçen zaman yükselme zamanı olarak adlandırılır. Yükselme zamanının maksimum genliğe bölünmesi ile RA değeri elde edilir. Çatlak tipini sınıflamak için Şekil 4.12'deki grafikteki gibi kullanılır. Birimi, ms/V olarak ifade edilir.



Şekil 4.12. AE düzeneği elemanları

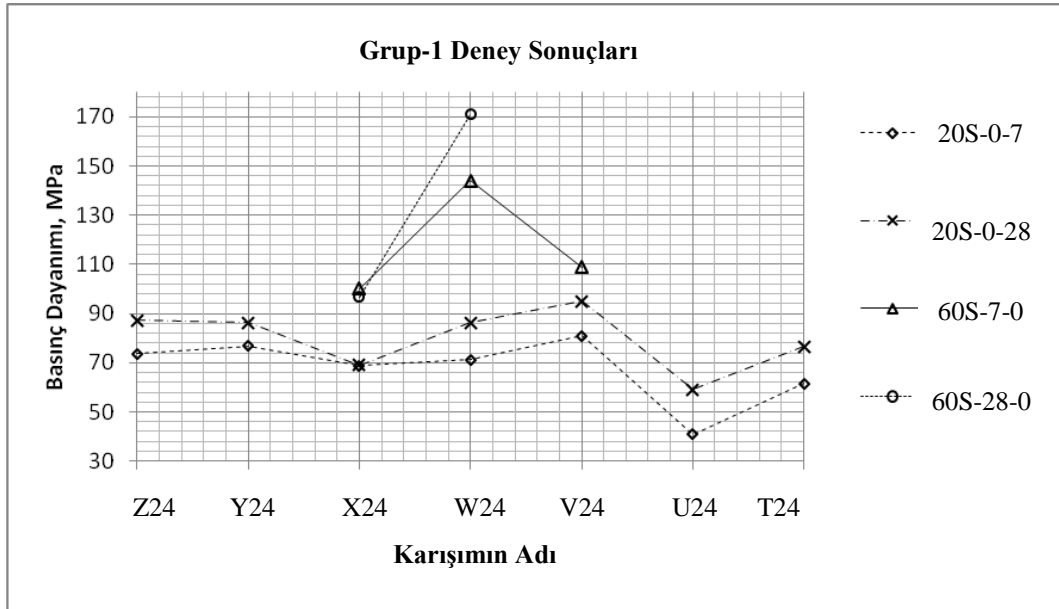
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma deneysel olarak, ön dökümler gerçekleştirilerek basınç dayanımı ve yayılma değeri bakımından optimum karışımın elde edilmesi, seçilen optimum RPB karışımı ile kiriş üretimi ve üretilen kirişlerin mekanik ve akustik emisyon deneyleri ile kırılma mekanizmalarının incelenmesi olarak üç aşamadan oluşmaktadır.

### 5.1. Optimum RPB karışımının seçilmesi

Ön dökümlerde kullanılacak karışımlar elde edilirken 5 grup deney yapılmıştır. Her yeni grup deneysel çalışmaya, önceki grupta elde edilen sonuçlara göre yön verilmiştir. Aşağıda her bir grubun deney sonuçları açıklanmaktadır.

Grup-1 deneylerinde; literatür araştırılarak 3 farklı reçete üzerinden 7 adet ön döküm gerçekleştirilmiştir. Taze halde iken yayılması ölçülmüş, sertleşmiş halde de 50x50x50 mm numuneler üzerinde basınç dayanımı ölçülmüştür. Her bir dökümün 20°C standart su küründe basınç dayanımları belirlenmiş, ayrıca bazı karışımların sıcak sudaki performanslarına da bakılarak ilerleyen zamanda bu kür yönteminin kullanılmasıyla daha yüksek basınç dayanımları elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Grup-1 deney sonuçları Şekil 5.1’ de gösterilmiştir (Bkz. Ek-1).

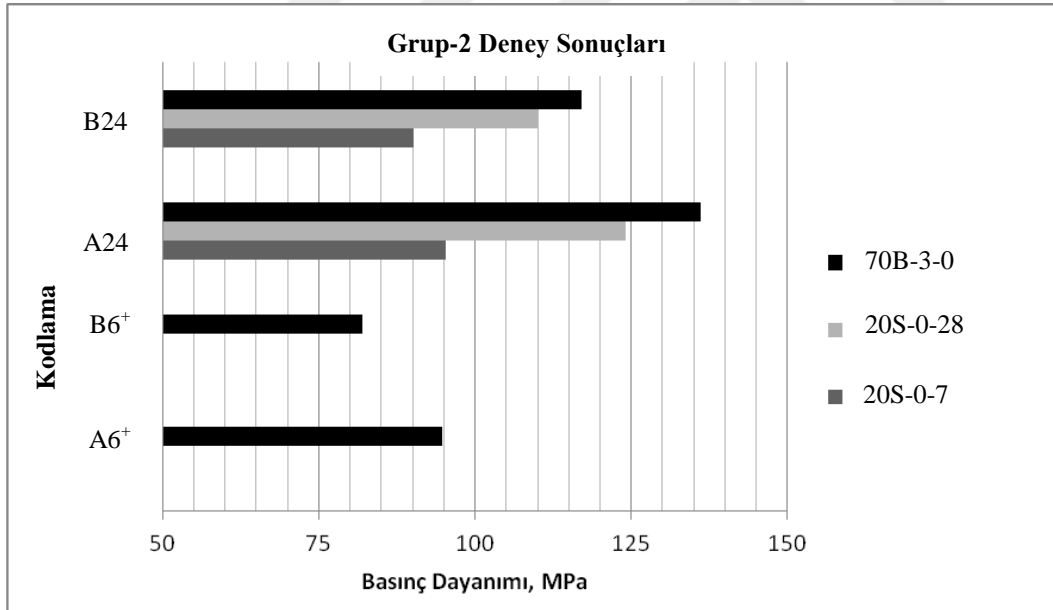


Not: Z, Y, X, W, V karışımların yayılma değerleri sırasıyla 20 cm, 17 cm, 17 cm, 10.5 cm ve <10,5 cm’ dir. U ve T karışımlarında ise priz sorunu yaşanmıştır.

Şekil 5.1. Grup-1 deney sonuçları

Şekil 5.1' den görülebileceği gibi, standart su kürü uygulamasında V karışımı en yüksek basınç dayanımı olan 95 MPa değerine ulaşmıştır. Sıcak su kürü uygulamasında da W karışımı en yüksek basınç dayanımı olan **170 MPa** değerine kadar çıkabilmiştir. Ancak her iki karışımın da yayılma değerleri düşük olduğundan deneylere bu karışımlarla devam edilememiştir. Erken yaş dayanımı ve yayılma değeri dikkate alınarak Y karışımı ve yine yayılması benzer olduğundan X karışımı uygun olarak seçilip deneylere devam edilmiştir. Ayrıca karışım dizaynlarına bağlı olarak sıcak su kürü uygulandığı takdirde dayanımlarda %40 -%100 aralığında artış olabileceği görülmüştür.

Grup-2 deneylerinde; Y ve X karışımlarından daha fazla su kesebilmek için akışkanlaştırıcı katkı malzemesi değiştirilerek deneylere Draco Levelcon FX10 hiper akışkanlaştırıcı (HP) ile devam edilmiş, yeni karışımlar A ve B olarak adlandırılmıştır. Elde edilen karışım oranları üzerinden kür yöntemi (20°C standart su kürü, 70°C buhar kürü), kalıp alma süresi (buhar kürü gören numunelerde; 6 sa, 24 sa) ve çimento tipi (C1-42,5; C2-52,5) etkisi 50x50x50 mm numuneler üretilerek incelenmiştir. Grup-2 deney sonuçları Şekil 5.2' de gösterilmiştir (Bkz. Ek-2).



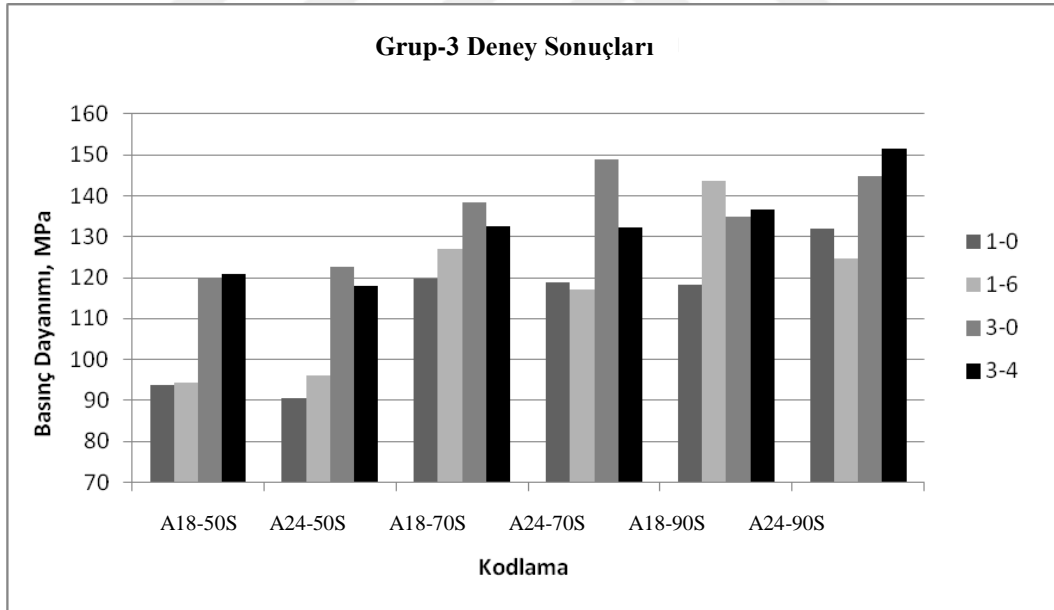
Not: A ve B karışımlarının yayılma değerleri sırasıyla >15 cm ve <15 cm'dir.

Şekil 5.2. Grup-2 deney sonuçları

Şekil 5.2' den görüleceği gibi, A karışımının basınç dayanımları mevcut malzemelerle B karışımına göre daha yüksektir. A6<sup>+</sup> ve B6<sup>+</sup> kodlu sonuçlar sırasıyla A24 ve B24 kodlu sonuçlarla karşılaştırıldığında beton döküldükten hemen sonra kalıpla birlikte ısıtılma tabii tutulması bu koşullarda dayanımda artış meydana

getirmemiştir. Özellikle 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin ısıtılma işlemi sonrasında **136 MPa** gibi yüksek bir basınç dayanımına ulaşılabildiği görülmüştür. Sadece 3 günlük ısıtılma uygulaması ile 28 günlük basınç dayanımlarından %6-%10 aralığında daha fazla basınç dayanımına ulaşılmıştır. Bu nedenle sonraki aşamada A karışımının kullanılmasına, kalıpta 24 saat tutulmasına ve ısıtılma uygulamasına karar verilmiştir.

Grup-3 deneylerinde; ilerleyen zamanda üretilecek yapısal boyuttaki kirişler laboratuvar koşullarında üretileceğinden deneylerdeki kür uygulamasının sıcak su kürü olarak devam etmesi öngörülmüştür. Bu nedenle Tablo 4.4 'te belirtilen 'A' karışımı aynen kullanılmış, sadece kalıp alma süresi (6,18,24 sa), sıcak suda kür sıcaklığı (50,70,90°C), kür süreleri (sıcak suda 1 ve 3 gün, toplamda 1, 3 ve 7 günlük dayanımlar olmak üzere) değiştirilmiştir. Diğer gruplarda olduğu gibi 50x50x50 mm numuneler üretilmiştir. A6 serisi 6 saatin sonunda kalıptan çıkarılan numunelerde priz sorunu yaşandığı için deney programından çıkarılmıştır. Grup-3 deney sonuçları Şekil 5.3' de gösterilmiştir (Bkz. Ek 3).



Şekil 5.3. Grup-3 deney sonuçları

Kalıp alma süreleri karşılaştırıldığında; kür yöntemine göre (1-6)/(70 ve 90°C) kürlenmesine tabi tutulan numunelerde 18 sa. sonra kalıptan alınmış olması basınç dayanımlarını %8-%15 aralığında arttırmıştır. Yine de erken kalıptan çıkarma işlemi diğer numunelerin basınç dayanımlarında belirgin bir artışa neden olmamıştır. Numunelerin 24 sa. kalıpta kalması da kür yönteminin türüne göre %7-%11 aralığında

basınç dayanımlarını arttırmıştır. Ancak genel olarak 24 saat kalıptan çıkarılıp yüksek sıcaklıkta kürlenene numunelerde daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı A24-90S-3-4 numunesinden **151,61 MPa** olarak elde edilmiştir (Şekil 5.3).

Kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanımları genel olarak artmıştır. 18 sa. sonra kalıptan alınıp 70 ve 90 °C de ısıtılma tabii tutulan numunelerin dayanımlarında (1-6) daki bir istisna dışında belirgin farklar görülmemiştir. 24 sa sonra ısıtılma tabii tutulan numunelerde ise (3-0)' daki bir istisna dışında %6-14 aralığında artış görülmüştür. Genel olarak kür sıcaklığının 50 °C'den 90 °C ye artırılmasıyla basınç dayanımlarında %12-%52 aralığında artış elde edilmiştir (Şekil 5.3).

Isıl işlem ardından normal suda kalma süresi dayanımlarda belirgin bir artış yaratmazken ısıtılma süresinin 1 günden 3 güne çıkması basınç dayanımlarını %5-%35 oranında arttırmıştır (Şekil 5.3) .

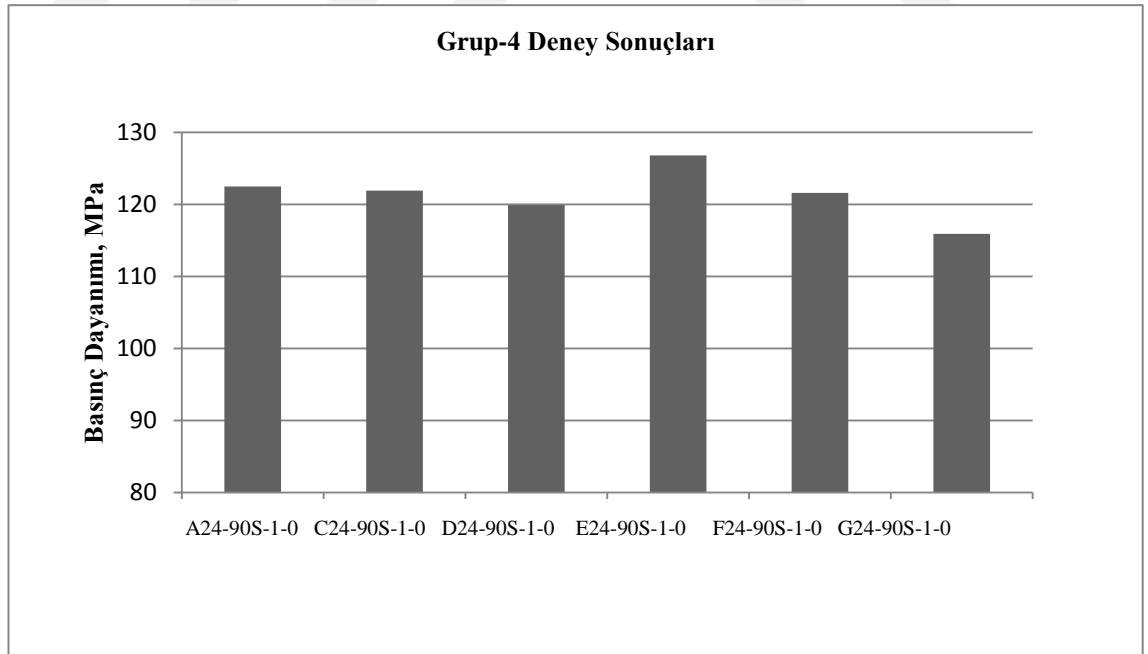
Grup-3 deneysel çalışmanın sonucu olarak, dayanımı yüksek olduğundan A24-90S-3-4 (151,61 MPa), daha kısa sürede sonuç alınabileceğinden A24-90S-3-0 (144,92 MPa), hem süre hem de enerji tasarrufu açısından A24-90S-1-0 (131,10 MPa) karışımları uygulanabilir olarak seçilmiştir (Şekil 5.3) .

Grup-4 deneylerinde; A karışımı üzerinden bazı değişkenler kullanılarak C, D, E, F ve G karışımları dökülmüştür. Uygulama kolaylığı açısından agreganın elemeden kullanılması, akışkanlığı bir miktar arttırabilmek açısından da katkı miktarında değişiklik ve uçucu kül kullanımı denenmiştir. Hızlı sonuç alabilmek için 90 °C sıcak suda 1 gün süreyle kür uygulanmıştır. İlgili değişkenler ve sonuçları Tablo 5.1 ve Şekil 5.4' de gösterilmiştir.



Tablo 5.1. Grup-4 deney sonuçları

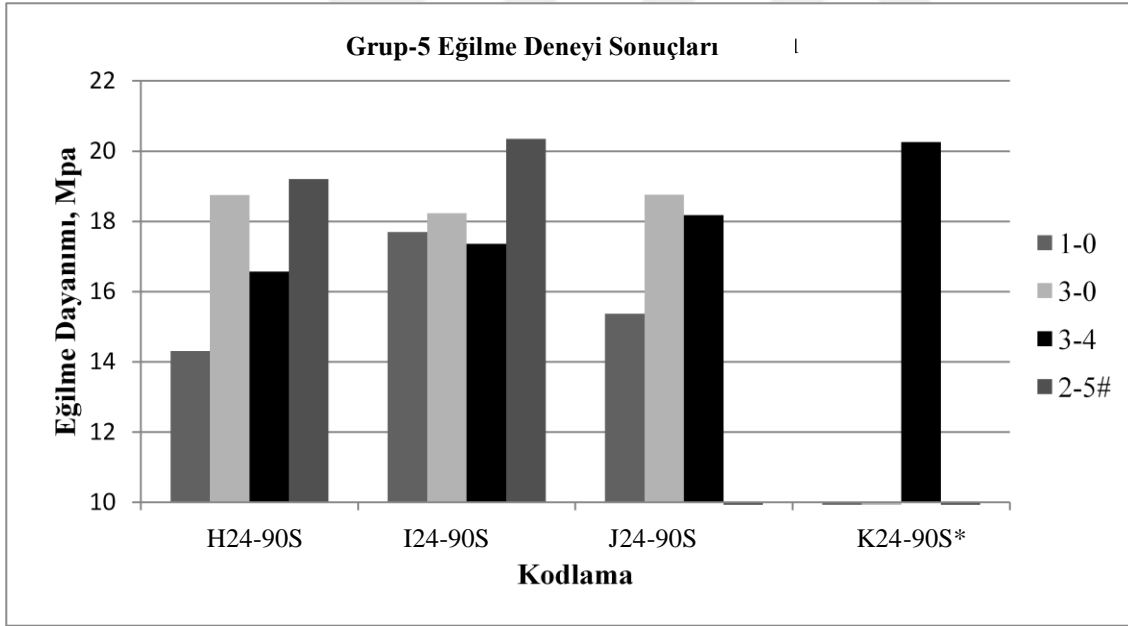
Karışım	Kod	Değişken	Basınç Dayanımı, MPa	Yayılma, cm
A	A24-90S-1-0	Kontrol	122,48	15,5
C	C24-90S-1-0	Katkı ve su miktarı artırıldı.	121,92	14,5 (sadece katkı ile 12,5)
D	D24-90S-1-0	Agrega elenmeden kullanıldı.	119,93	14,5-15
E	E24-90S-1-0	Çimento miktarı sabitken uçucu kül 100 kg/m <sup>3</sup> kullanıldı	126,81	12,5
F	F24-90S-1-0	Uçucu kül 150 kg/m <sup>3</sup> çimento ile yer değiştirildi.	121,62	16,5-17
G	G24-90S-1-0	Uçucu kül 200 kg/m <sup>3</sup> çimento ile yer değiştirildi.	115,92	16



Şekil 5.4. Grup-4 deney sonuçları

Tablo 5.1 ve Şekil 5.4' den görüleceği gibi 90 °C sıcak su kürüne tabi tutulan karışımların bir günlük dayanımları birbirine yakın çıkmıştır. Yine de akışkanlığı bir miktar arttırabilmek açısından uçucu külün optimum miktarda kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca, basınç dayanımını belirgin şekilde düşürmediğinden agreganın da elenmeden kullanılarak deneylere devam edilmesi uygun görülmüştür.

Uçucu külün akışkanlığı arttırmakta olumlu etkisi olabileceği görüldüğünden Grup-5 deneyleri boyunca Grup-3 deneylerinden seçilen 3 yöntem üzerinde uçucu kül kullanımı araştırılmış, eğilme ve basınç dayanımları elde edilmiştir. Bu amaçla 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler, kontrol numunesinin dışında 100, 150, 200 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül çimento ile yer değiştirilerek kullanılmış, ayrıca katkı bir miktar daha arttırılarak akışkanlık iyileştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bunlara ek olarak 2 karışım üzerinde kür yöntemindeki sıralama değiştirilerek (tüm gruplarda önce sıcak su sonra normal su kürü denenmişti, birkaç numune üzerinde önce normal su sonra sıcak su kürü denendi) basınç dayanımında bir artış olup olmayacağı araştırılmıştır. İlgili sonuçlar; Şekil 5.5, Şekil 5.6' da gösterilmiştir (Bkz. Ek 4)



\*K kodlu numunelerde 26-27 saat kalıptan çıkarma süresi gerekli oldu. 24 saat sonunda kalıptan çıkarılıp suya konulan numuneler suda dağıldı.

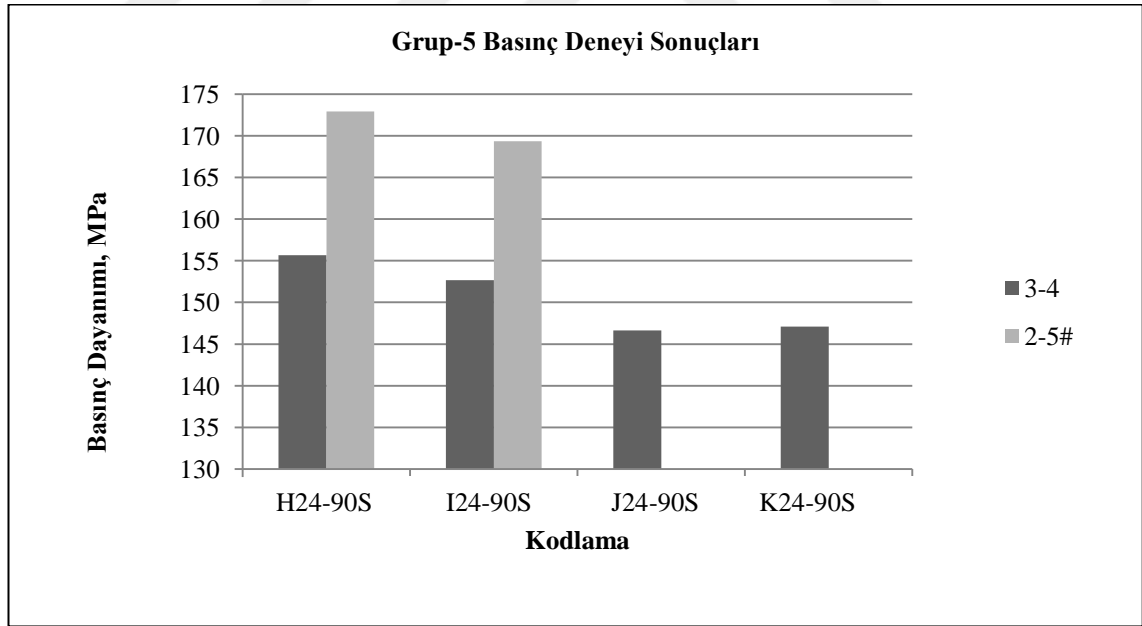
#Önce 2 gün normal su kürü, ardından 4 gün ısıtma işlemi uygulanmış, 5. gün içinde kırılmıştır.

Şekil 5.5. Grup-5 eğilme deneyi sonuçları

Şekil 5.5'den de görüleceği gibi eğilme dayanımları 14-20 MPa aralığındadır. Lifsiz RPB'nin eğilme dayanımının 5 MPa (Beglarigale vd.,2014) civarında olduğu düşünülürse olduğu düşünülürse bu çalışmadaki lifli özel beton dizaynı sayesinde 3-4

kat daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmektedir. (3-4) kürlemesine bakıldığında uçucu külün artmasıyla eğilme dayanımları iyileşmiştir, bu etkinin beton karışımının kalıba daha iyi yerleşmesinden kaynaklandığı ya da bağ kuvvetini arttığından kaynaklandığı düşünülmektedir (Yazıcı vd., 2009; Baradan vd.,2012; Erdoğan, 2010). Numunelerin sıcak suda kalma süresi 1 günden 3 güne çıktığında eğilme dayanımlarında I karışımında belirgin bir artış olmasa da genel olarak %20-%30 artış görülmüştür. Karışımların kalıptan çıkarıldıktan sonra önce normal su sonra sıcak su kürüne tabi tutulmasıyla ise eğilme dayanımları %15-17 oranında artmıştır. Bunun da ısı işlem uygulanmadan önce normal kürlemede bekletilerek yüksek miktarda toz malzeme içeren karışımlarda oluşan hidratasyon ürünlerinin daha iyi yayılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Baradan vd., 2012; Erdoğan, 2010).

Grup-5 deney sonuçları da incelendiğinde, hem yayılma değerleri hem eğilme dayanımı değerleri bu çalışma için yeterli aralıklarda bulunduğundan optimum karışım hazırlama süreci tamamlanmıştır ve laboratuvar koşullarımızda üretilebilecek uygun ve yeterli karışımın I24-90S-3-4 olduğuna karar verilmiştir. Bu nedenle eğilme deneyinden kalan parça numuneler üzerinde basınç dayanımı elde edilirken sadece (3-4) kür kodlarına sahip numunelerle çalışılmıştır (Şekil 5.6 ve Ek 4).



Not: Numunelerin basınç dayanımları (3-4) kodlularda 14 günlük dayanım, (2-5) için 13 günlük dayanımdır.

#Önce 2 gün normal su kürü, ardından 4 gün ısı işlem uygulanmış, 5.gün içinde eğilme deneyi için kırılmıştır.

Şekil 5.6.Grup-5 basınç deneyi sonuçları

Şekil 5.6' dan görüleceği gibi önce sıcak su kürüne tabi tutulan numunelerde basınç dayanımları 147-155 MPa aralığında, önce standart kür, ardından ısıtılma tabi tutulan numunelerde ise yaklaşık 170 MPa dayanımlar elde edilmiş ve yaklaşık %11 oranında artış olduğu görülmüştür. Bu, yüksek toz malzeme içeren karışımlarda hidrasyon ürünlerinin dağılmasına bir miktar izin vererek ısıtılma tabi tutmanın basınç dayanımlarını arttırabileceğini göstermektedir (Baradan vd.,2012; Erdoğan, 2010). Karışımda çimento ile uçucu kül yer değiştirildiğinde dayanımda bir miktar düşüş görülsede ilgili kür yönteminde, kontrol numunesi H karışımı ve I karışımında basınç dayanımları 150 MPa' nın üzerinde ve birbiri ile benzer çıkmıştır. Kür havuzunun ısınma süresi de dikkate alındığından ilerleyen deneylerde I24-90S-3-4 yöntemiyle devam edilmesine karar verilmiştir.

## 5.2. RPB Kiriş Numunelerinin Mekanik Deney Sonuçları

Boyutları 125x250x1500 mm olan RPB kirişler üretildikten sonra 3 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuş, deplasman ölçerler yardımı ile yük-deplasman grafikleri elde edilmiş ve ardından grafikler üzerinden MATLAB programı ile enerji yutma kapasiteleri hesaplanmıştır. İlgili deney sonuçları K1, K2 ve K3 kiriş elemanlar için sırasıyla aşağıda açıklanmıştır.

Basınç ve eğilme dayanımlarını belirlemek için 150x150x150 mm numuneler ve 100x100x600 mm numuneler RPB kirişlerle aynı koşullarda kürlenmiş, sırasıyla 125 MPa ve 14,30 MPa dayanımlar elde edilmiştir.

### 5.2.1. K1 numunesi

Donatı detayları Tablo 4.9' da verilen K1 numunesi 2 $\phi$ 12 montaj ve alt donatıya sahip olup  $\phi$ 8/10 etriye ile sarılmıştır. Bu elemanda etriye, elemanın kesme yerine özellikle eğilmeden kırılmasını sağlamak amacıyla daha sık olarak kullanılmıştır. Üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmadan önce ve sonraki durumları Şekil 5.7' de ve kırılma detayı Şekil 5.8' de gösterilmiştir.

Yük-deplasman grafiği (Şekil 5.9) incelendiğinde K1 numunesi 3 noktalı eğilme düzeneğinde maksimum 110.46 kN (11 ton) yük taşıyarak 12 mm deplasman yapmıştır. Daha sonra donatının akması ile yük 106.86 kN'a (10,6 ton) düşmüş ve 22.42 mm deplasmanda ölçüm cihazlarının zarar görmemesi için deney sonlandırılmıştır. K1 elemanı sünek bir eğilme davranışı göstermiştir.

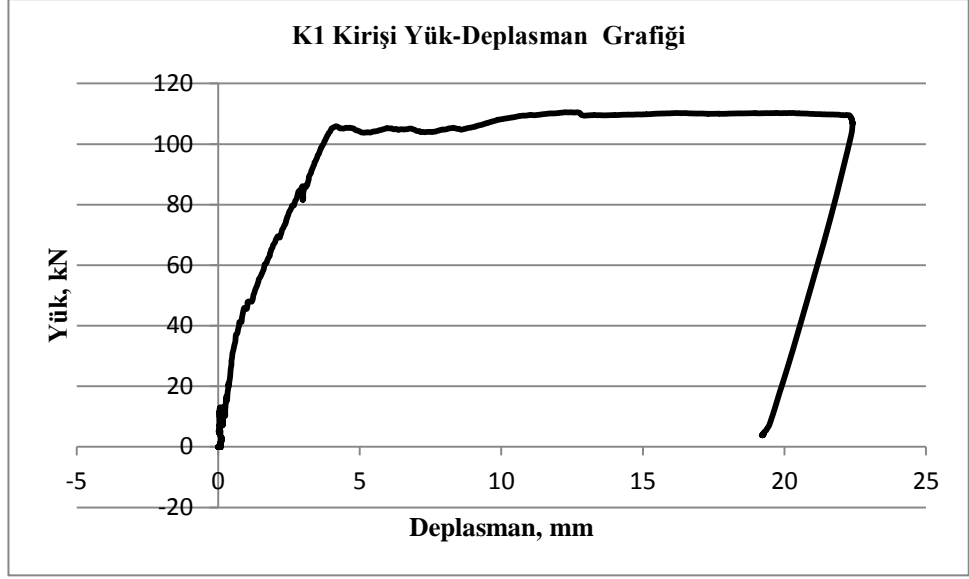
Betonun etkisi göz ardı edildiğinde çekmeye çalışan  $2\phi 12$  alt donatının yaklaşık  $54 \text{ kN}$ ' larda akacağı hesaplanmaktadır. Bu yüke karşılık sadece  $1 \text{ mm}$  deplasmandan sonra akmaya başlayacağı Şekil 5.9' daki deplasman grafiğinden tahmin edilebilir. Dolayısıyla lifli RPB kullanımı ile çekmede karşılanacak kuvvete %51 oranında destek sağlanmıştır.



Şekil 5.7. Eğilme deneyinden (a) önce, (b) sonra K1 elemanı



Şekil 5.8. K1 elemanı kırılma detayı



Şekil 5.9. K1 numunesinin yük - deplasman grafiği

### 5.2.2. K2 numunesi

Donatı detayları Tablo 4.9' da verilen K2 numunesi sadece 2 $\phi$ 20 alt donatıya sahiptir. Etriye ve montaj donatısı kullanılmamıştır. Bu elemanda alt donatı elemanın eğilme yerine özellikle kesmeden kırılmasını sağlamak amacıyla daha çok kullanılmış, etriye ise bu amaçla hiç kullanılmamıştır. Üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmadan önce ve sonraki durumları Şekil 5.10' da ve kırılma detayı Şekil 5.11' de gösterilmiştir.

Yük-deplasman grafiği (Şekil 5.12) incelendiğinde K2 numunesi 3 noktalı eğilme düzeneğinde maksimum 207.26 kN (20,7 ton) yük taşıyarak 5.5 mm deplasman yapmıştır. Daha sonra yük 76.68 kN'a (7,6 ton) düşerken ancak maksimum 11.5 mm maksimum deplasmana ulaşabilmiştir. K2 numunesi bu noktada ani bir şekilde kesmeden kırılmıştır.

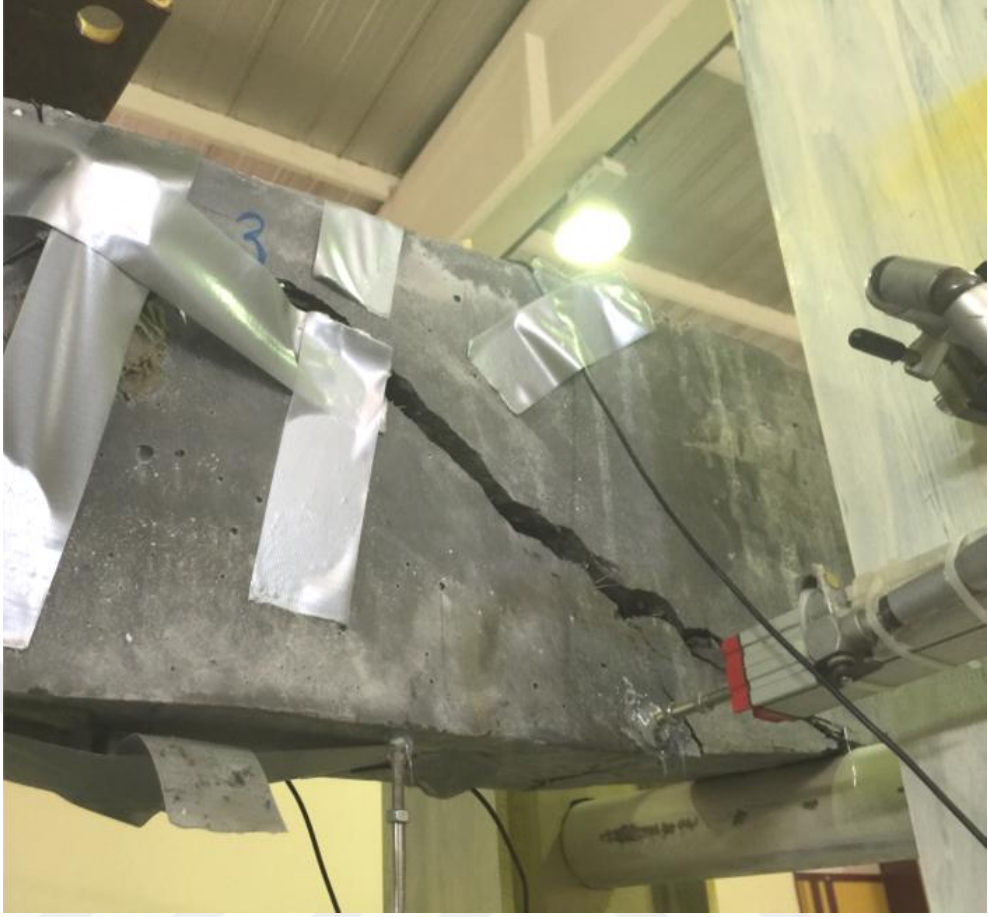
Betonun etkisi göz ardı edildiğinde çekmeye çalışan 2 $\phi$ 20 alt donatının yaklaşık 150 kN.'larda akacağı hesaplanmaktadır. Bu yüke karşılık sadece 4 mm deplasmandan sonra akmaya başlayacağı Şekil 5.12' deki deplasman grafiğinden tahmin edilebilir. Dolayısıyla lifli RPB kullanımı ile çekmede karşılanacak kuvvete %27 oranında destek sağlanmıştır.



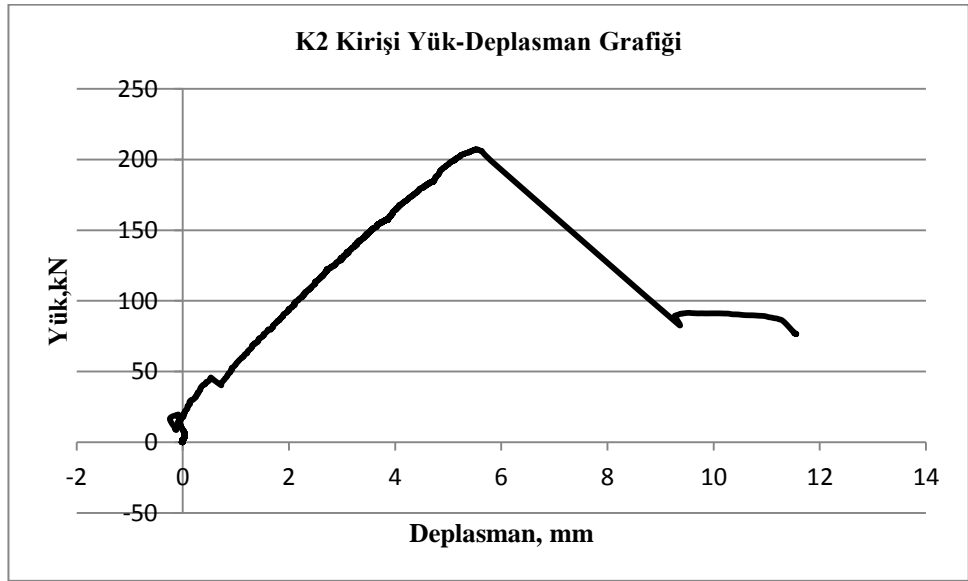


Şekil 5.10 Eğilme deneyinden (a) önce, (b) sonra K2 elemanı





Şekil 5.11. K2 elemanı kırılma detayı



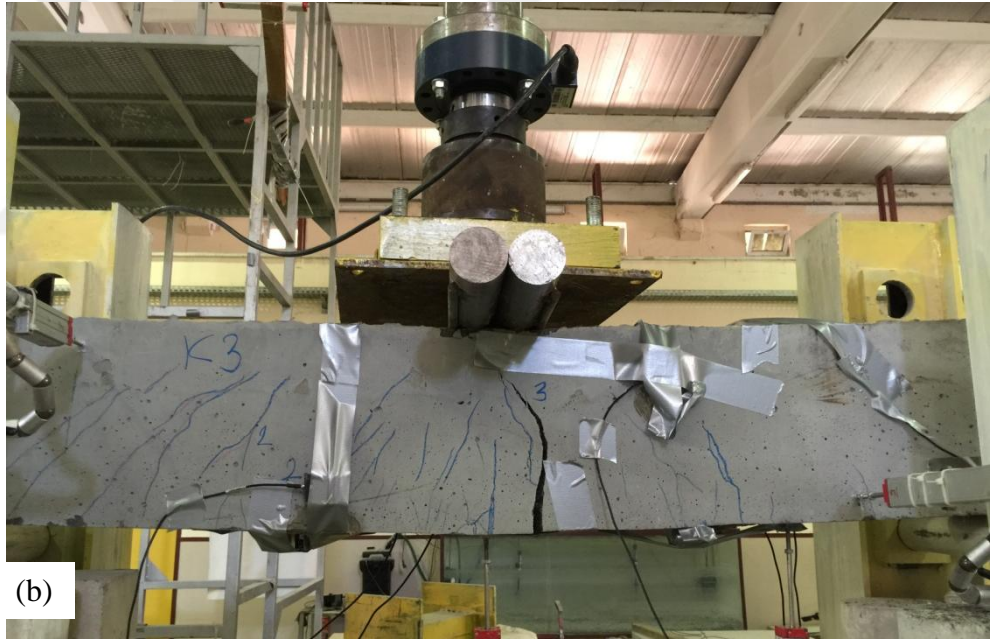
Şekil 5.12. K2 numunesinin yük - deplasman grafiği

### 5.2.3. K3 numunesi

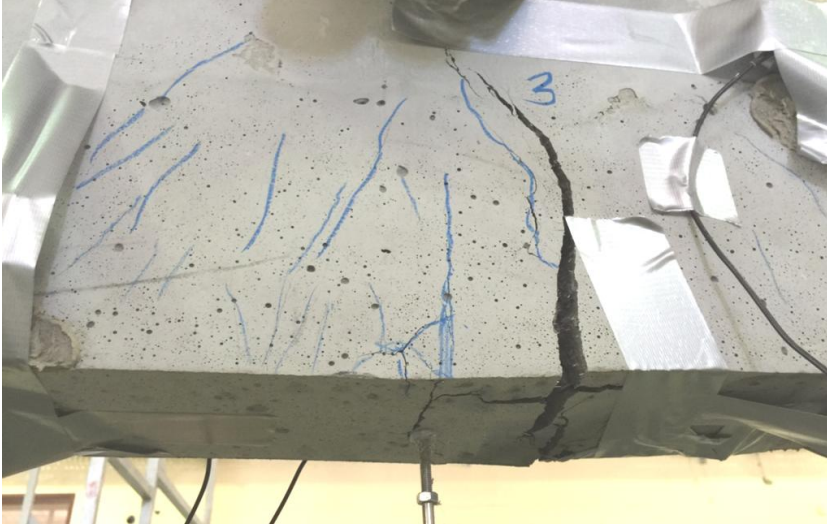
Donatı detayları Tablo 4.9’ da verilen K3 numunesi 2 $\phi$ 10 montaj ve 2 $\phi$ 20 alt donatıya sahip olup  $\phi$ 8/10 etriye ile sarılmıştır. Bu elemanda etriye ve alt donatı yeterli oranda kullanılarak, hem kesme hem eğilme durumunda reaktif pudra betonla üretilmiş kirişin davranışı gözlenmiştir. Üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmadan önce ve sonraki durumları Şekil 5.13’ de ve kırılma detayı Şekil 5.14’ de, kırılma gerçekleşikten sonra deneye bir süre daha devam edildiğindeki durum ise Şekil 5.15’ de gösterilmiştir.

Yük-deplasman grafiği (Şekil 5.16) incelendiğinde K3 numunesi 3 noktalı eğilme düzeneğinde maksimum 258.71 kN (25,8 ton) yük taşıyarak 23 mm deplasman yapmıştır. Daha sonra yük 252.07 kN’ a (25,2 ton) düşerken 24 mm deplasmanda deney sonlandırılmıştır. K3 elemanı sünek bir eğilme davranışı sergilemiştir.

Betonun etkisi göz ardı edildiğinde çekmeye çalışan 2 $\phi$ 20 alt donatının yaklaşık 150 kN.’larda akacağı hesaplanmaktadır. Bu yüke karşılık sadece 4 mm deplasmandan sonra akmaya başlayacağı Şekil 5.16’ daki deplasman grafiğinden tahmin edilebilir. Dolayısıyla lifli RPB kullanımı ile çekmede karşılanacak kuvvete %42 oranında destek sağlanmıştır.



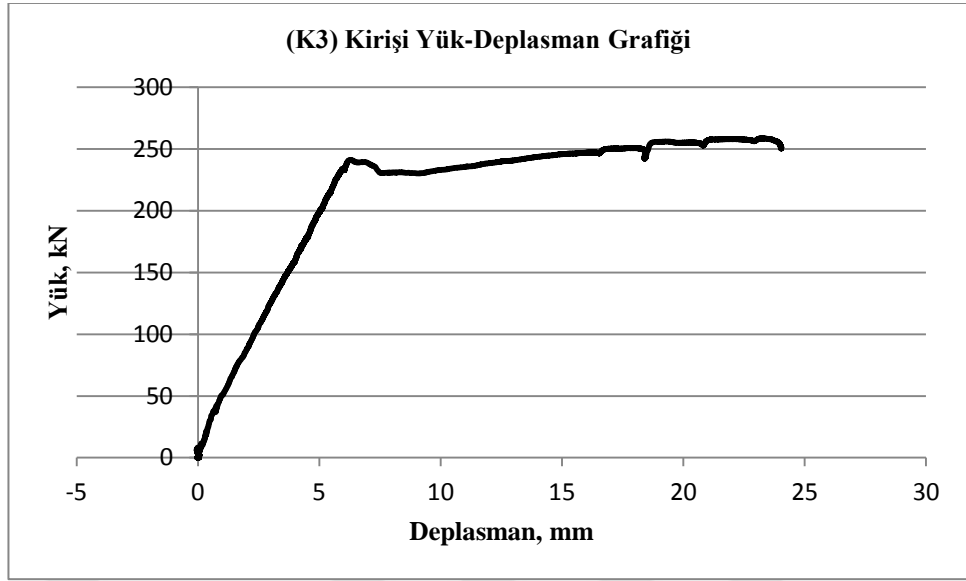
Şekil 5.13. Eğilme deneyinden (a) önce, (b) sonra K3 elemanı



Şekil 5.14. K3 elemanı kırılma detayı



Şekil 5.15. Kırılmadan sonra yüklemeye devam edildiğinde (a) K3 elemanı ve (b) kırılma detayı



Şekil 5.16. K3 numunesinin yük - deplasman grafiği

#### 5.2.4. Enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesi

Yük-deplasman grafiği altında kalan alan elemanların enerji yutma kapasitelerini vermektedir. 3 noktalı eğilme deneyi sırasında elde edilen veriler kullanılarak MATLAB programı yardımıyla yük-deplasman grafiği altında kalan alanlar hesaplanmış ve Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Enerji yutma kapasiteleri

Numune	Enerji Yutma Kapasitesi , kN.mm ( joule)
K1	2089, 2
K2	1414,7
K3	5169, 0

Deneyler, elemanlar tam parçalanmadan sonlandırıldığından deplasman grafikleri belli noktada kesilmiştir. Bu nedenle enerji yutma kapasiteleri elemanın tam olarak kapasitesini yansıtmamaktadır. Ancak birbirileri ile karşılaştırdıklarında, elemanların davranışları hakkında fikir vermektedir.

Tablo 5.2’ den görüleceği gibi hem etriyesi sık hem de donatı miktarı daha fazla olan K3 numunesi en yüksek enerji yutma kapasitesine sahiptir. Şekil 5.16’ daki yük-



deplasman grafiği ile karşılaştırıldığında sünek bir davranış sergilediği görölmektedir. Hiç etriye içermeyen K2 numunesi ise açıklık donatısı alanı diğer numunelerden daha fazla olmasına rağmen daha az enerji absorbe ederek kırılmıştır. K1 numunesi de K2'ye göre daha sünek davranış sergilediği halde eğilme donatısı alanı daha az olduğundan K3 kadar enerji sönmüleyememiştir.

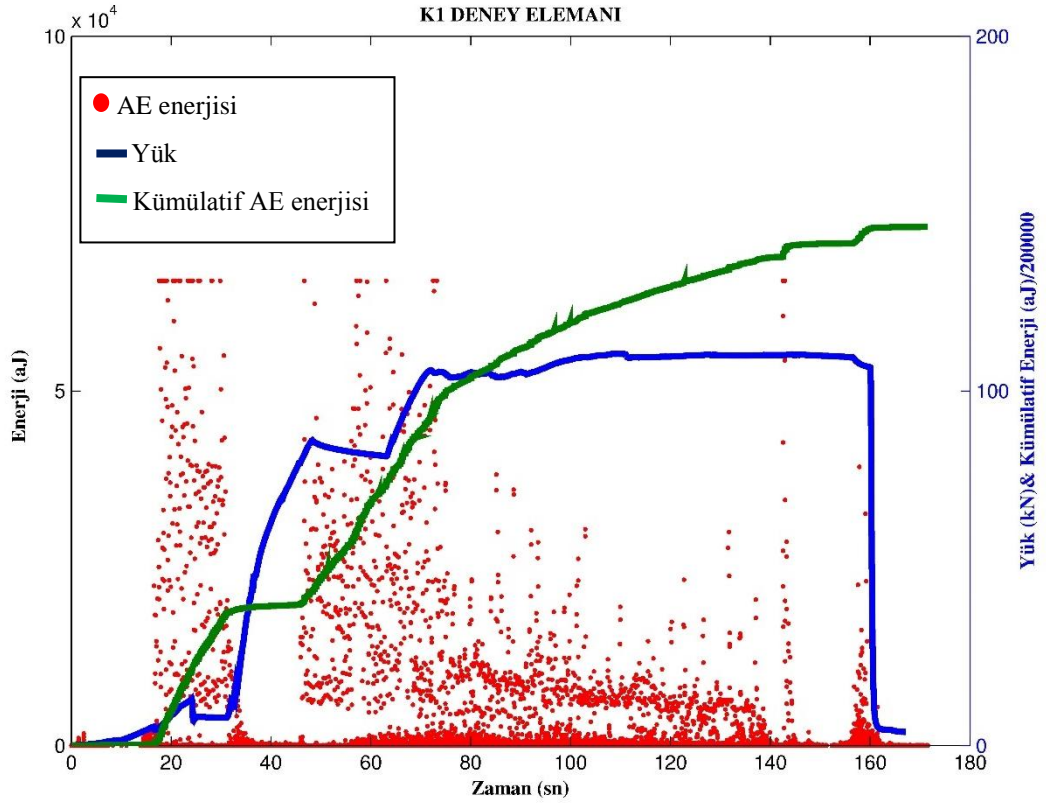
### 5.3. RPB Kiriş Numunelerinin AE Deney Sonuçları

Her 3 numunede de deneysel ekipmanın zarar görmesinden çekinilerek elemanda belirgin hasar oluştuktan sonra kirişin tam kırılmasına müsaade edilmeden deney sonlandırılmıştır.

#### 5.3.1. K1 numunesi

Donatı detayları şematik olarak Tablo 4.9'da verilen K1 numunesi 2 $\phi$ 12 montaj ve açıklık donatısına sahip olup,  $\phi$ 8/10 etriye ile sarılmıştır. Elemanın özellikle etriyesi sıklaştırılarak kesme etkisinden kırılmasının önlenmesi ve açıklık donatısının yetersiz bırakılarak eğilme etkisinden göçmesi tasarlanmıştır. Tek noktadan yüklenecek eğilme deneyine tabi tutulan eleman, deney süresince maksimum 11 ton yük taşımış ve maksimum 22 mm deplasman yapmıştır. Gözlemsel olarak K1 numunesi incelendiğinde beklendiği gibi elemanın çekmeye çalışan alt bölgesinde eğilme etkisinden dolayı derin ve büyük bir çatlak oluşmuştur. Buna karşılık, büyük eğilme kırığı oluşmadan önce betonda herhangi bir ezilme gözlenmemiştir.

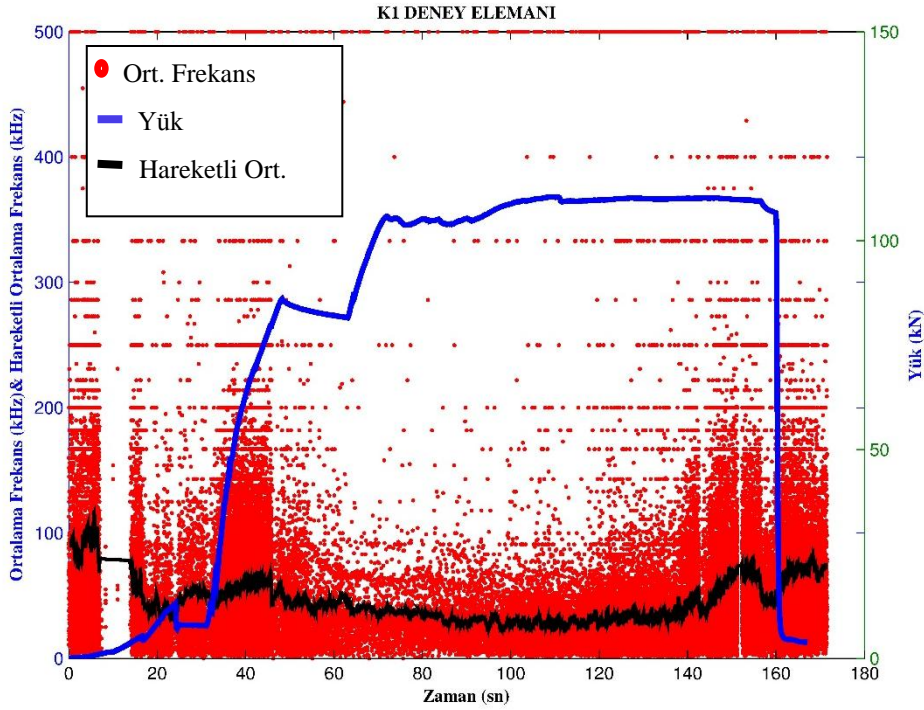
Şekil 5.17' de K1 elemanının AE enerji grafiği görölmektedir. Grafiğin sol ekseni AE enerjisini, sağ ekseni yük ve kümülatif enerjiyi, ortak x ekseni ise deney zamanını temsil etmektedir. Yük ve kümülatif enerji değerlerinin aynı eksende gösterilebilmesi için kümülatif enerji değerleri 200000' e bölünerek ölçeği değiştirilmiştir. Grafikte mavi çizgi ile zamana karşı uygulanan yük (kN) , kırmızı dağılım ile zamana karşı çıkan AE enerjisi (aJ), yeşil çizgi ile de kümülatif AE enerjisi (aJ) temsil edilmiştir.



Şekil 5.17. K1 elemanının AE enerji grafiği

Yükleme ile beraber yük seviyesinin artırılması ile deney elemanında oluşan çatlaklar kümülatif AE enerjisinin de artmasına sebep olmuştur. Şekil 5.17'deki grafikte AE enerjisinin arttığı noktalar çatlak oluştuğu zaman ve yük seviyesi hakkında bilgi vermektedir. Grafikte görülmektedir ki, AE enerjisi bazı zamanlarda keskin şekilde bazı zamanlarda da kademeli şekilde artmıştır. AE enerji / zaman grafiğinden ani artışların gevrek kırılmaları, kademeli artışların da sünek kırılmaları oluşturduğu söylenebilir. Buna göre Şekil 5.17 incelendiğinde; K1 deney elemanı, yükün artırılmasıyla 45. saniyelerde yaklaşık 90 kN'a kadar yük seviyesinde AE enerjisi açığa çıkmadan yani çok sayıda çatlak oluşmadan yükü taşıyabilmiş, daha sonra ise gerilmeler belirli bir seviyeye ulaşmış çatlak oluşumu özellikle mikro çatlaklar arttıktan sonra bir süre yükü taşıyamamıştır. 75. saniyelere gelindiğinde deney elemanı pekleşme etkisiyle 110 kN'a kadar yük taşımakta ve bu süre içinde çatlaklar oluşmaya devam etmektedir. Bu durum kümülatif enerjideki artışın devam etmesi ile de fark edilmektedir. Kümülatif enerjideki kademeli artış elemanın genel olarak sünek bir davranış içinde olduğunu göstermektedir. Elemanın betonun içerisinde yer alan çelik liflerin etkisiyle sünek davrandığı düşünülmektedir.

Aynı numunenin AE ortalama frekans grafiği Şekil 5.18’ de gösterilmiştir. Grafikteki sol eksen ortalama frekansı (kHz), ve hareketli ortalama frekansı, sağ eksen yükü (kN), ortak x eksenini ise deney zamanını temsil etmektedir. Frekans değerlerinin anlaşılır olabilmesi için 42 dB eşik olarak kabul edilmiş, aynı zamanda 500 kHz üzeri frekans değerleri anlamsız veriler olduğundan grafikten çıkarılmıştır. Grafikteki mavi çizgi yükü (kN), kırmızı dağılım AE ortalama frekans değerlerini, siyah çizgi ise ortalama frekansın hareketli ortalamasını temsil etmektedir. Hareketli ortalama değerleri, her ortalama frekans değeri için 250 adet veri kullanılarak hesaplanmıştır.

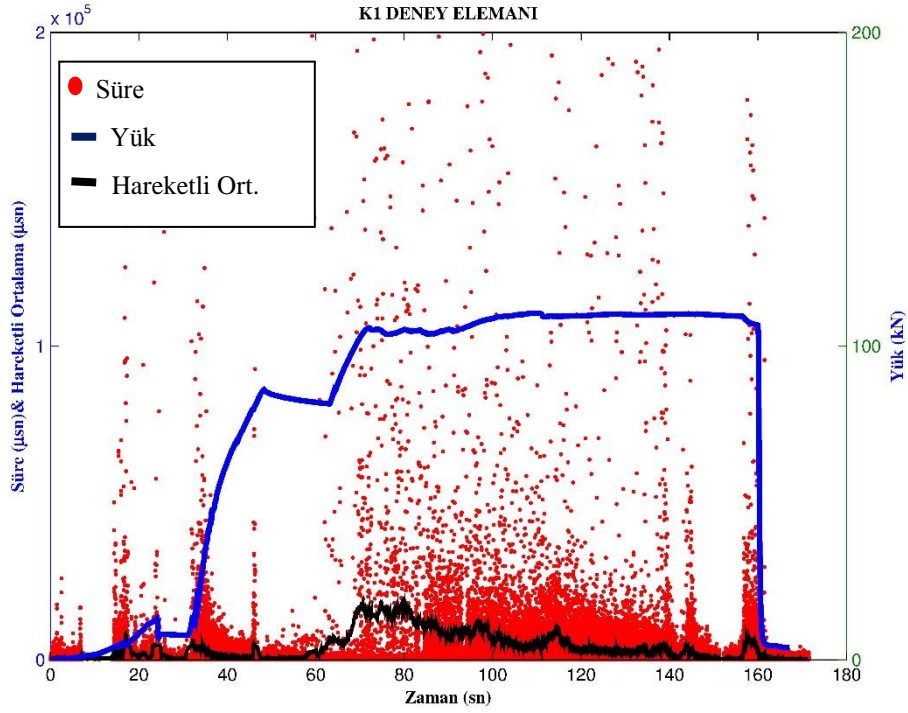


Şekil 5.18. K1 elemanının AE ortalama frekans grafiği

Şekil 5.17’deki enerji grafiğinin tersine Şekil 5.18’deki ortalama frekanstaki düşme noktaları deney elemanında hasar oluşumunu göstermektedir. 45. sn’lerden sonra hareketli ortalamadaki düşüşler enerji grafiği ile uyum içindedir ve deney elemanı bir süre daha fazla yük taşıyamamaktadır. Bu süre içerisinde çatlak sayısında bir artış olmaktadır. Aynı şekilde 140 ve 160.sn’lerdeki düşüşler de enerji grafiğindeki artış noktaları ile uyumludur. Buradaki ani düşüşler kesme çatlak sayısında bir artış olduğuna işaret etmektedir. Bu durum lifli betonlarda liflerin sıyrılmasına da işaret ediyor olabilir. Deney neticesinde deney elemanı açıklık bölgesinde oluşan büyük bir eğilme çatlak ile sünek olarak eğilmeden hasar görmüştür.



Şekil 5.19’ da süre grafiği görülmektedir. Grafiğin sol eksen süreyi ( $\mu\text{sn}$ ) ve hareketli ortalamasını, sağ eksen yükü (kN), ortak x eksen de deney zamanını (sn) göstermektedir. Grafikteki mavi çizgi yükü, kırmızı dağınım AE süresini, siyah çizgi ise AE süresinin hareketli ortalamasını temsil etmektedir. Hareketli ortalama değerleri, her süre değeri için 250 adet veri kullanılarak hesaplanmıştır.

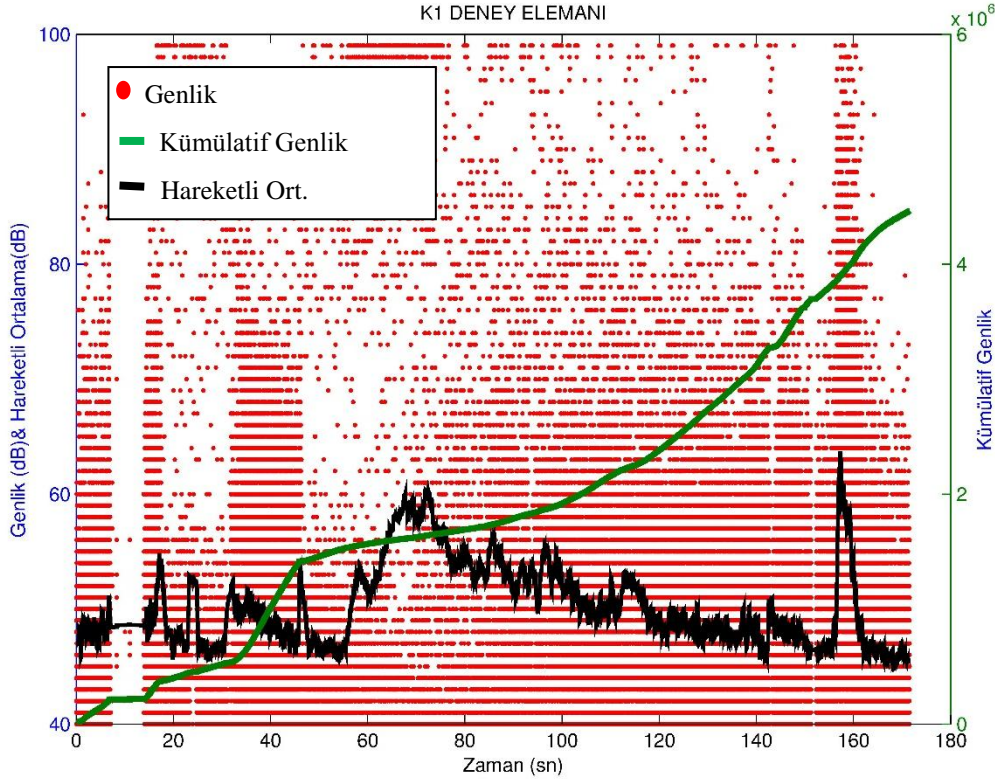


Şekil 5.19. K1 elemanının AE süre grafiği

Süre, enerji grafiği gibi ortalama frekans grafiğinin tersidir. Süredeki artışlar çatlak mekanizmasının oluştuğunu göstermektedir. Enerji ve ortalama frekans grafikleriyle uyumlu olarak, 45. sn’lerde bir artış, 75. sn’lerde tekrar bir artış görülmektedir. Bu artışlarla beraber eleman daha fazla yük taşıyamamıştır. Özellikle 75. sn’lerde uzun süreli aktiviteler oluşmuştur. Daha sonra yük sabit bir seviyedeysen daha kısa süreli çatlaklar oluşarak eleman hasar görmeye devam etmiştir. Ancak deney sonlandırıldığı için grafik kesilmiştir (Şekil 5.19).

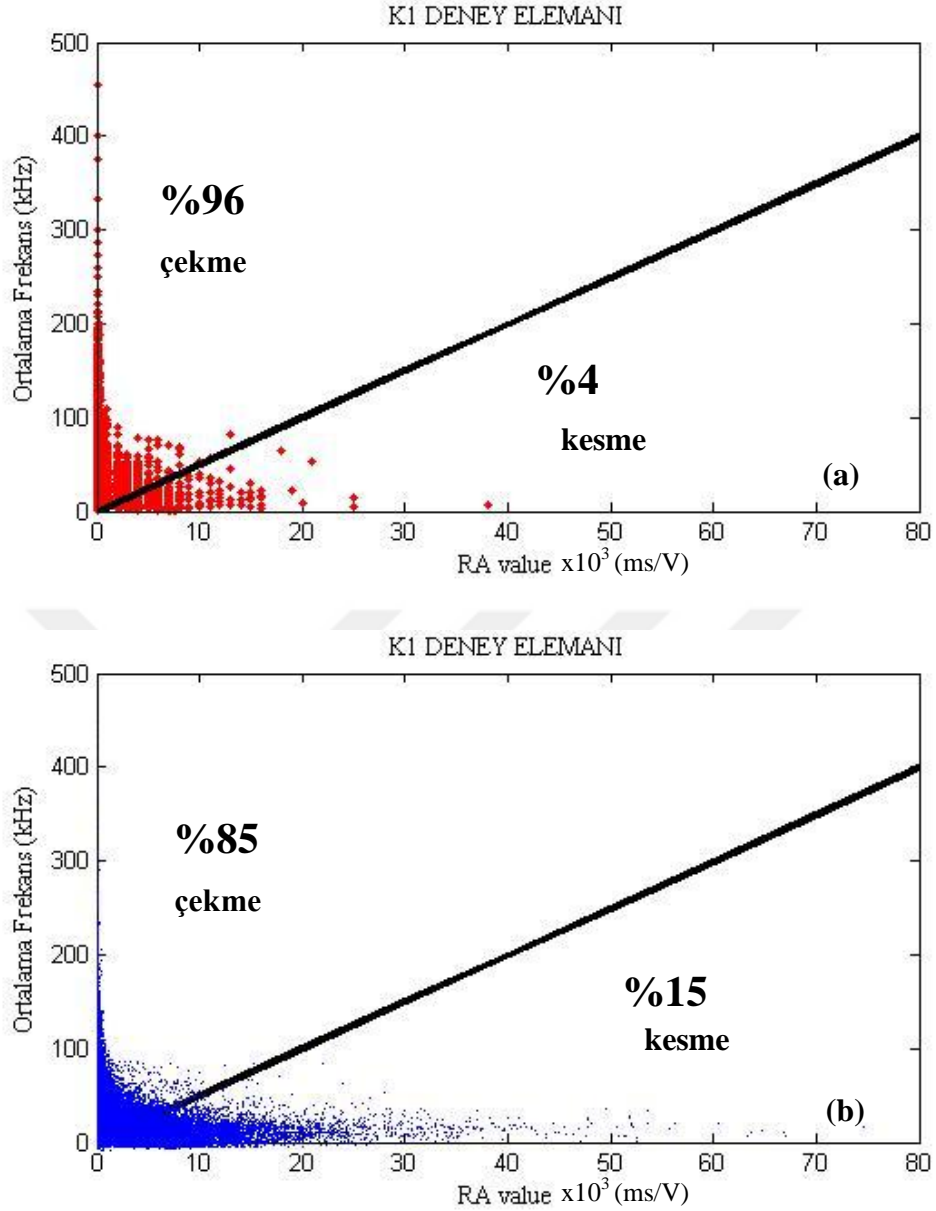
Şekil 5.20’ de K1 deney elemanının genlik grafiği görülmektedir. Genlik değerlerinde istenmeyen gürültüleri elimine edebilmek için betonlar için amprik bir değer olan 42 dB eşik seviyesi olarak tercih edilmiştir. Grafiğin sol eksen genlik ve genliğin hareketli ortalama değerlerini (dB), sağ eksen kümülatif genlik değerlerini,

ortak x eksenini de deney zamanını (sn) göstermektedir. Ayrıca veriler işaretlenirken kullanılan kırmızı dağılım genliği, yeşil çizgi kümülatif genlik değerlerini ve siyah çizgi de genliğin hareketli ortalamasını temsil etmektedir.



Şekil 5.20. K1 elemanının AE genlik grafiği

AE sinyalinin genliği deney elemanında oluşan çatlak mekanizmasının büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Diğer grafiklerle uyumlu olarak, 45., 75. ve 160. saniyelerdeki genlikler incelendiğinde pik noktaları görülmektedir. Bu saniyelerde daha belirgin hasarlar oluştuğu söylenebilir ve deneysel gözlemlerle uyum içindedir. Özellikle 160. sn'de hareketli ortalama değerlerinde görülen ani artış, çatlakların makro seviyesine çıkmasına veya liflerin kopmasına işaret ediyor olabilir (Şekil 5.20).



Şekil 5.21. K1 elemanın (a) 20. sn' den önceki ve (b) 20. sn'den sonraki RA değeri grafiği

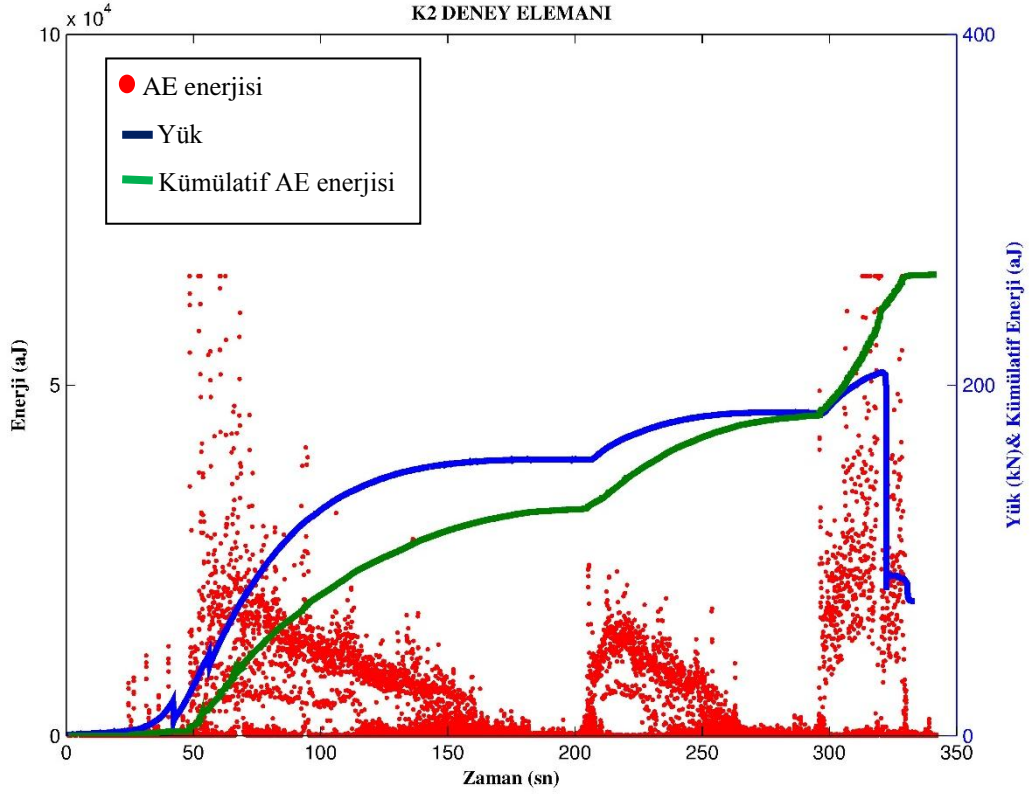
Şekil 5.21'de K1 numunesinin RA değerine karşılık ortalama frekans değerleri görülmektedir. Bu grafik kullanılarak çatlak çeşidine karar verilebilmektedir. Bu değerlendirme sistemine göre bir doğru seçilir ve seçilen doğrunun üzerinde kalan değerler çekme çatlak, altında kalan değerler ise kesme ya da karışık mod çatlak olarak adlandırılmaktadır. Bu ilişkinin kullanıldığı farklı çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda çatlak tipi ayırımı yapacak olan doğrunun eğimi hakkında net bir bilgi elde edilememiştir ve çalışmalarda farklı doğruların kullanıldığı görülmüştür (Ohno ve Ohtsu, 2010; Ohno vd., 2007; Aggelis, 2011; Gholizadeh vd., 2015). Bu nedenle, bu çalışmada da literatürden bazı doğrular denenmiş ancak daha sonra  $y=5x$  doğrusunun kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu nedenle Şekil 5.21'deki grafikte çatlak

tipine net olarak karar verilememektedir ancak deney ilerlerken doğrunun üzerinde ve altında kalan değerlerin yüzdeleri oluşan çatlak mekanizması ile ilgili fikir vermektedir. Şekil 5.21’de K1 numunesinin RA değerleri ile ortalama frekans değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. İlk çatlakların oluştuğu zamanın tayini lifli RPB olan deney numuneleri için çok zordur bu nedenle AE grafikleri incelendiğinde ilk çatlakların 20. sn’lerde oluştuğu söylenebilir. 20. sn’den önceki ve sonraki değerleri karşılaştırıldığında, çatlak başlangıcında çekme çatlak sayısı fazla iken deney ilerledikçe kesme çatlaklarının arttığı söylenebilir (Aggelis, 2011).

### 5.3.2. K2 numunesi

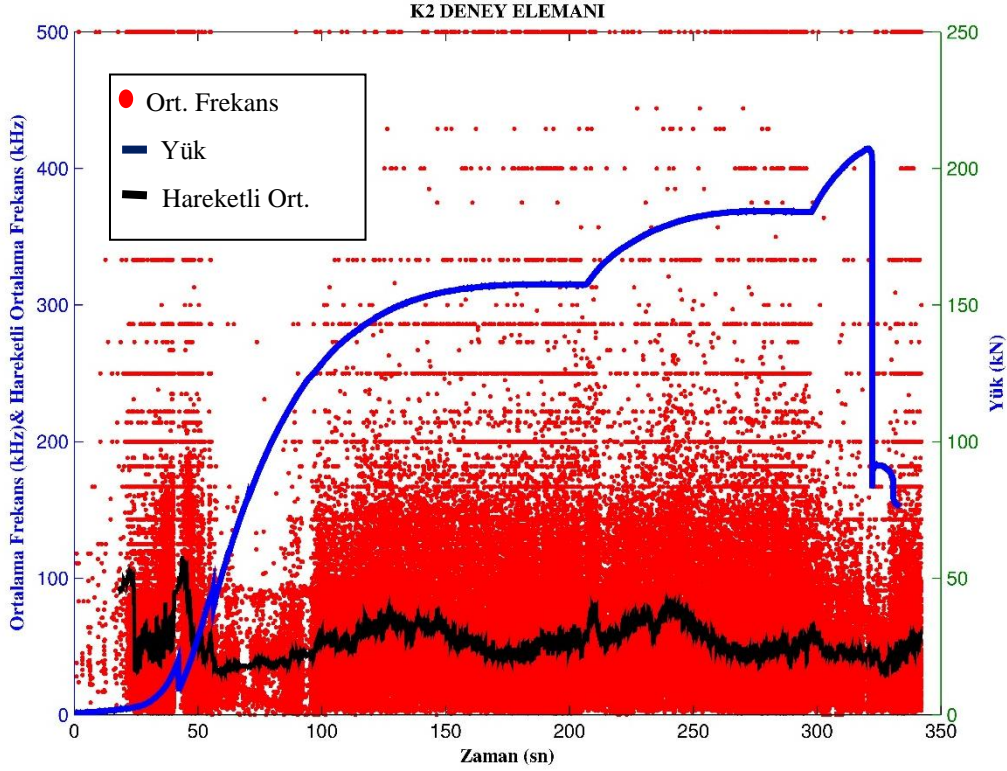
Donatı detayları şematik olarak Tablo 4.9’ da verilen K2 numunesi etriyesiz olup sadece 2 $\phi$ 20 açıklık donatısına sahiptir. Elemanın özellikle açıklık donatısı artırılarak eğilme etkisinden kırılmasının önlenmesi ve etriye kullanılmayarak da kesme kuvvetlerine karşı yetersiz bırakılıp kesme etkisinden göçmesi tasarlanmıştır. Tek noktadan yüklenerek eğilme deneyine tabi tutulan eleman, deney süresince maksimum 20.7 ton yük taşımış ve maksimum 11.5 mm deplasman yapmıştır. Gözlemsel olarak K2 numunesi incelendiğinde beklendiği gibi mesnet bölgesinden yükleme noktasına doğru ani, belirgin ve büyük bir çatlak oluşmuştur. Buna karşılık, büyük kesme kırılması oluşmadan önce eleman yüzeyinde çatlak oluşumları ve betonda herhangi bir ezilme gözlenmemiştir.

Şekil 5.22’ de K2 numunesinin AE enerji grafiği görülmektedir. Yük ve kümülatif enerji değerlerinin aynı ekseninde gösterilebilmesi için kümülatif enerji değerleri 200000 e bölünerek ölçeği değiştirilmiştir.



Şekil 5.22. K2 elemanının AE enerji grafiği

Çatlaklar yükleme sonucunda oluşmaktadır. Şekil 5.22 incelendiğinde, yük arttıkça kümülatif enerji değerleri artmıştır. Enerji-zaman grafiğinin kademeli olarak artması elemanın genel olarak liflerin de etkisiyle sünek davrandığını göstermektedir. Deney elemanı yük taşımaya devam ederken çatlak mekanizmaları da oluşmaya devam etmektedir. 210. sn'de 150 kN seviyesinde küçük bir sıçrama görülürken, 300. sn'de 170 kN seviyesine gelindiğinde ani enerji artışı olmuştur ve deney elemanında aniden büyük bir kesme çatlağı oluşmuş ve deney elemanı ani bir kesme çatlağı ile kırılmıştır.

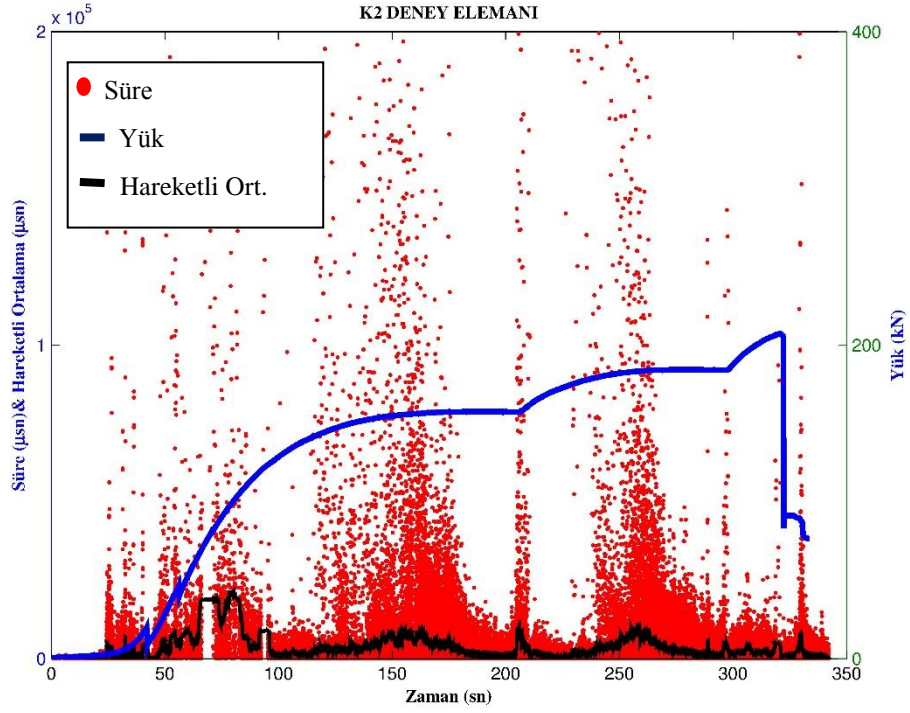


Şekil 5.23. K2 elemanının ortalama frekans grafiği

Şekil 5.23' de ortalama frekans grafiği görülmektedir. Ortalama frekans AE enerji grafiğinin tersi olduğundan frekanstaki azalan noktalar dikkate değerdir. Bunlar da enerji grafiği ile uyum içindedir. Özellikle 210 ve 300. sn'lerde ortalama frekans değerlerinde düşüşler görülmüştür. Bu düşüşler çok belirgin olmasa da elemanda oluşan çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.24' de K2 elemanının süre grafiği görülmektedir. Hareketli ortalama değerleri, her süre değeri için 250 adet veri kullanılarak hesaplanmıştır. Verilerin anlaşılır olabilmesi için 200000  $\mu$ sn üzerindeki veriler elimine edilmiştir.

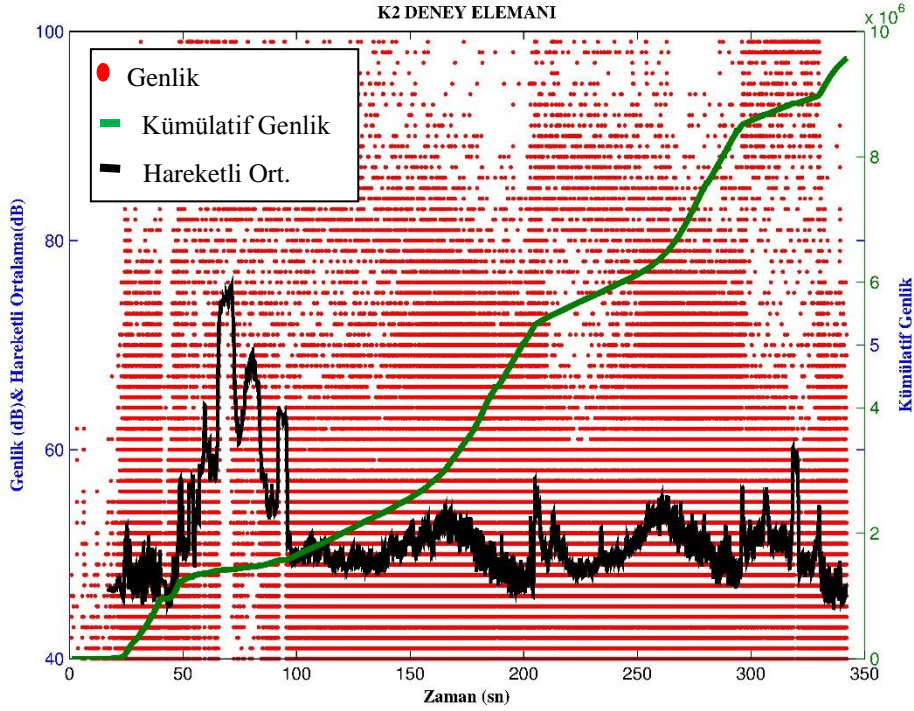




Şekil 5.24. K2 elemanının süre grafiği

Süre verilerinin hareketli ortalamaları incelendiğinde, grafikteki değişim noktaları, ortalama frekans ve enerji grafikleriyle örtüşmektedir. Yükleme devam ederken yaklaşık 100. sn'den sonra yük grafiği azalarak artmaya devam ederken azalışa geçtiği noktalarda süresi daha uzun çatlak mekanizmaları oluşmuştur. Grafikteki kademeler, betonda çatlaklar olduğunda liflerin de aktif görev yaptığını göstermektedir (Şekil 5.24).

Şekil 5.25' de K2 deney elemanının genlik grafiği görülmektedir. 42 dB eşik seviyesi istenmeyen gürültüleri elimine edebilmek için kullanılmıştır.

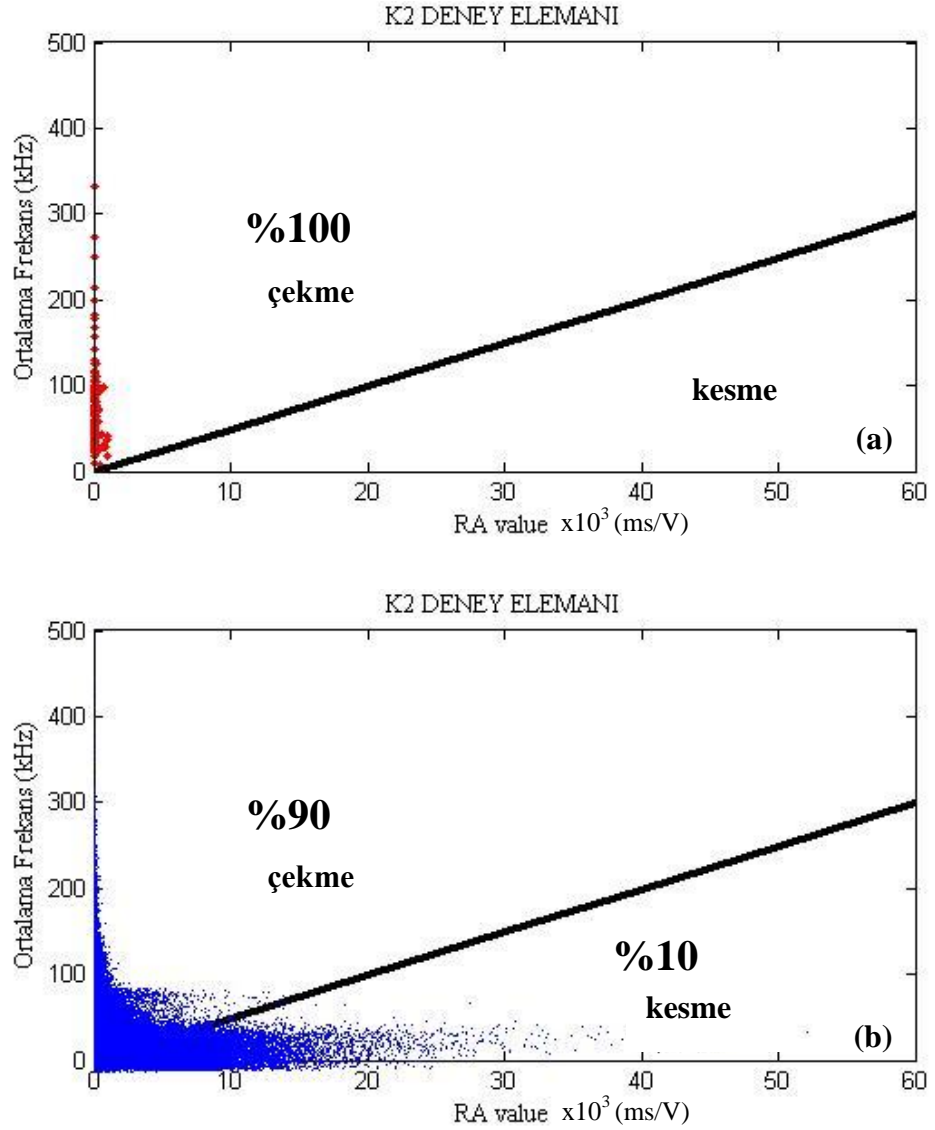


Şekil 5.25. K2 elemanın genlik grafiği

Genlik, elemanda oluşan hasarın büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Diğer grafiklerdeki 100., 210. ve 300. sn'lerdeki değişim noktaları bu grafikte de aynıdır. Genlik kümülatif toplamı gösteren grafik, 210. sn'ye artan bir eğimle ulaşırken, bu noktada eğim değişmiş ve sonra tekrar artmaya başlamıştır. Özellikle bu noktadaki belirgin değişiklikler daha büyük çatlaklara veya liflerin kopmasına işaret ettiği düşünülmektedir.

Şekil.5.26' da grafiğinde doğrunun üzerinde ve altında kalan değerlerin yüzdeleri oluşan çatlak mekanizması ile ilgili fikir vermektedir. Şekil 5.26' da K2 numunesinin RA değerleri ile ortalama frekans değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. İlk çatlakların oluştuğu 20. sn'den öncesi ve sonrası değerleri karşılaştırıldığında, çatlak oluşmadan önce sadece çekme çatlaklarının olduğu deney ilerledikçe ise kesme çatlaklarının da oluştuğu görülmektedir (Aggelis, 2011).



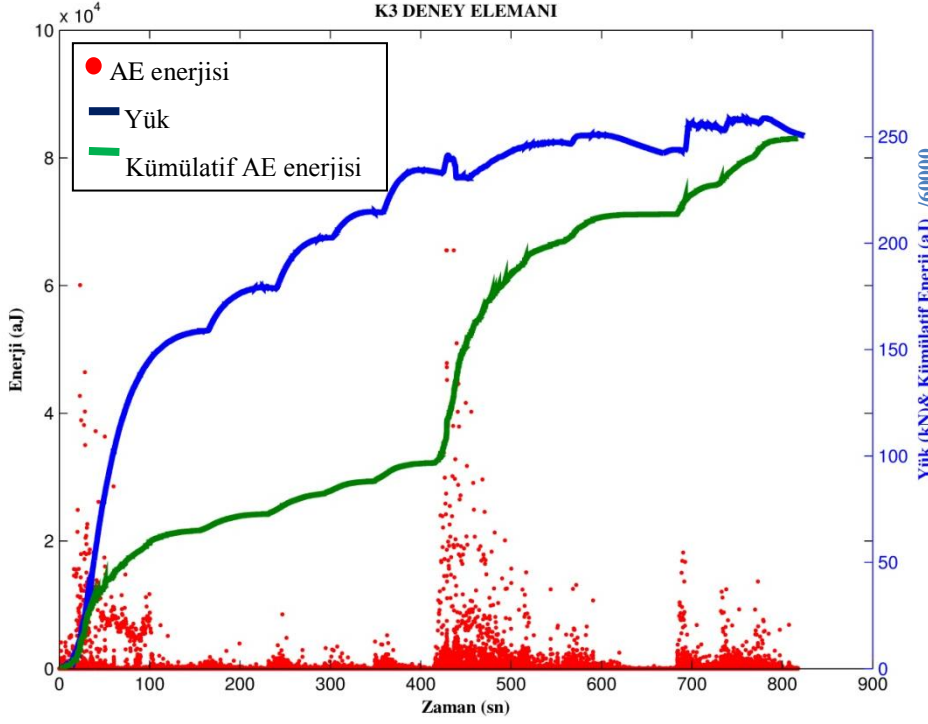


Şekil 5.26. K2 elemanının (a) 20. sn'den önceki ve (b) 20. sn'den sonraki RA değeri grafiği

### 5.3.3. K3 numunesi

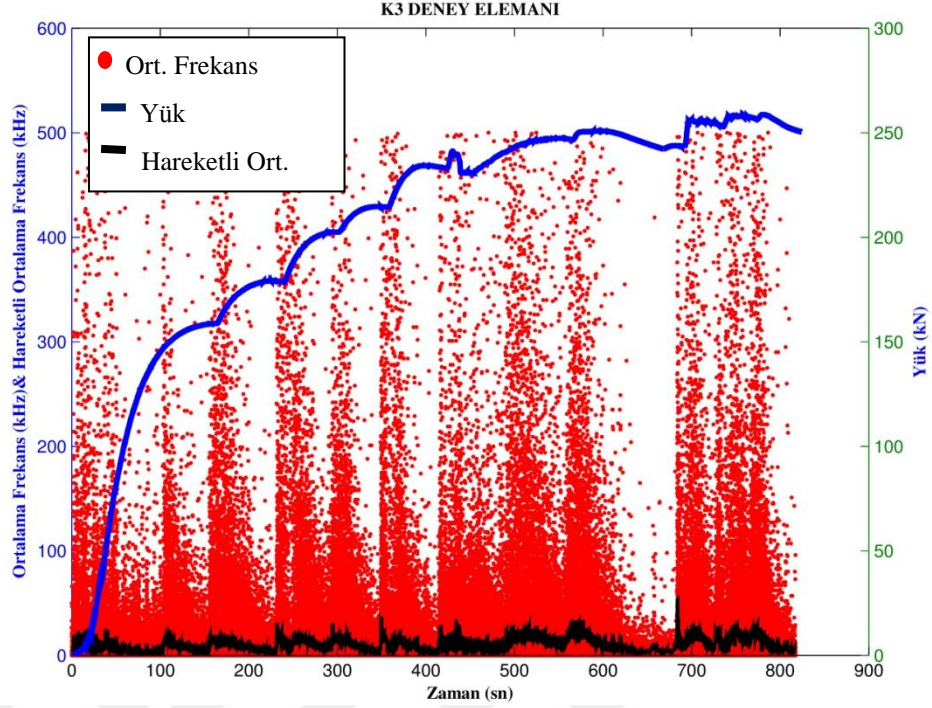
Donatı detayları şematik olarak Tablo 4.9' da verilen K3 numunesi  $2\phi 10$  montaj ve  $2\phi 20$  açıklık donatısına sahip olup,  $\phi 8/10$  etriye ile sarılmıştır. Bu eleman K1 ve K2 elemanlarının donatı detaylarının birleşimi şeklinde tasarlanmıştır. Elemanın hem etriyesi sıklaştırılarak hem de açıklık donatısı artırılarak mekanik davranışı gözlemlenmiştir. K3 elemanı deney süresince maksimum 25.8 ton yük taşımış ve maksimum 24 mm deplasman yapmıştır. Gözlemsel olarak K3 numunesi incelendiğinde elemanın çekmeye çalışan alt bölgesinde eğilme etkisinden dolayı betonun yüzeyinde kılcal çatlaklar meydana gelmiş ve yükleme devam ettirildiğinde derin ve büyük çatlaklar oluşmuştur. Buna karşılık, betonda yine de herhangi bir ezilme gözlenmemiştir.

Şekil 5.27’ de K3 numunesinin AE enerji grafiği görülmektedir. Yük ve kümülatif enerji değerlerinin aynı eksende gösterilebilmesi için kümülatif enerji değerleri 60000 e bölünerek ölçeği değiştirilmiştir.



Şekil 5.27. K3 elemanının AE enerji grafiği

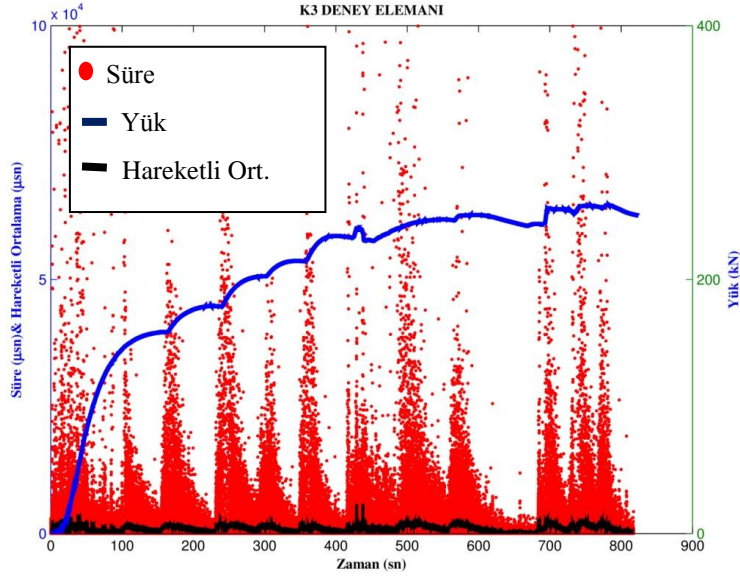
Şekil 5.27’deki AE enerjisi grafiğinden görüleceği gibi, K3 numunesi 100. sn’ye kadar 150 kN yük seviyesine kadar lineer bir şekilde yükü taşıyabilmiştir. Bu yük seviyesinden sonra ise 410. sn’lere kadar kademeli artışlar göstermiştir. Grafikte görülen küçük pik noktaları yükün beton matrisi tarafından taşınırken çatladığı noktalarda lifin etkisini göstermektedir. Life çekme kuvvetinin etki etmesi ile beton yüzeyi arasındaki sürtünmeler oluşmakta ve bu sürtünme etkisinin grafikteki pikleri meydana getirdiği söylenebilmektedir. 410. sn’lerde yaklaşık 240 kN yük seviyesinden sonra ise kümülatif enerji grafiğinden görüleceği gibi ani bir enerji açığı çıkmıştır. Bu elemandaki daha büyük bir kırılmanın meydana gelmesi ile ilgilidir. Deney sırasında 410. saniyelerden sonra elemanda eğilme çatlak oluşmaya başlamış ve giderek çatlak açılmıştır. Bu ani enerji çıkışının ardından 690. sn’lerde 210 kN yük seviyesine kadar kademeli olarak çatlaklar oluşmaya devam etmiş ve bu yük seviyesinde yine ani bir sıçrama meydana gelmiş ve maksimum yük seviyesine kadar kademeli şekilde devam etmiştir.



Şekil 5.28. K3 elemanın ortalama frekans grafiği

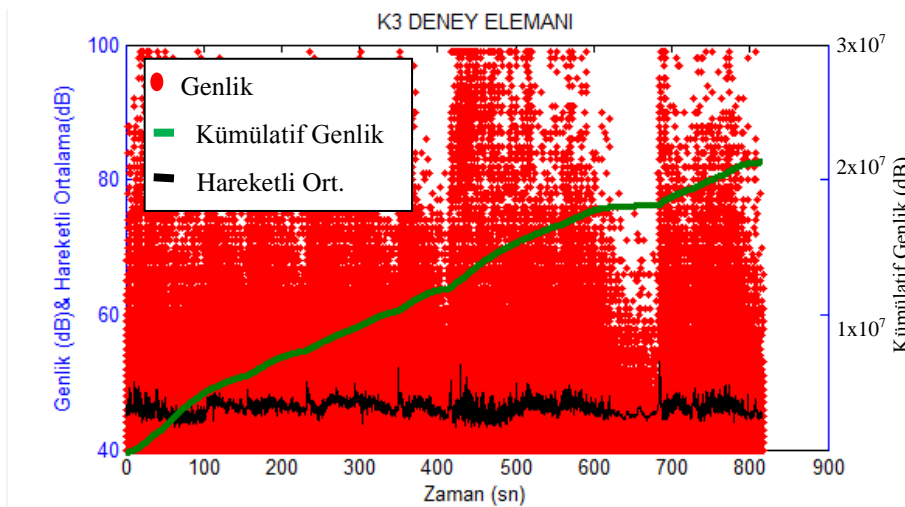
Şekil 5.28' de K3 numunesinin ortalama frekans grafiği görülmektedir. Ortalama frekans AE enerji grafiğinin tersi olduğundan frekanstaki azalan noktalar incelendiğinde enerji grafiği ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Özellikle 410. ve 690. sn'lerdeki frekanstaki düşüş noktaları enerjinin açıkça meydana çıktığı zaman aralığıdır. Genel olarak elemanda kademeli şekilde enerji açığa çıkması elemanın lifteki çekme ve sürtünmelerin etkisiyle kesme çatlaklarının sinyallerinin hakim olmasını sağlasa da genel anlamda elemanın sünek davranış içinde olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.29' de K3 elemanın süre grafiği görülmektedir. Hareketli ortalama değerleri, her süre değeri için 250 adet veri kullanılarak hesaplanmıştır. Verilerin anlaşılır olabilmesi için 100000  $\mu$ sn üzerindeki veriler elimine edilmiştir.



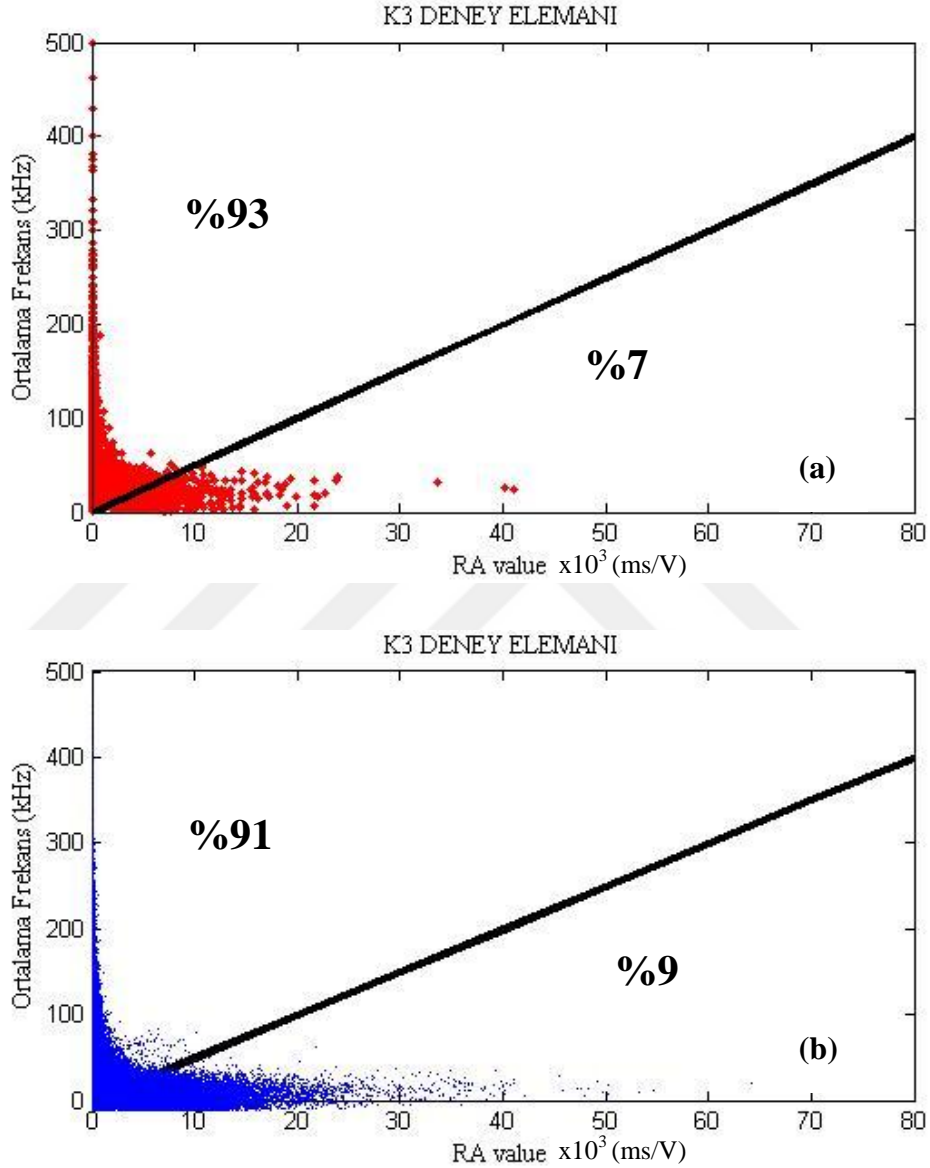
Şekil 5.29. K3 elemanının süre grafiği

Süre, enerji grafiği gibi ortalama frekans grafiğinin tersidir. Süredeki artışlar çatlak mekanizmasının oluştuğunu göstermektedir. Enerji ve ortalama frekans grafikleriyle uyumlu olarak, yükün sıçrama yaptığı noktalarda sürenin de arttığı görülmektedir. Çekme modu çatlakları kısa yükselme zamanına ve yüksek frekansa sahip iken kesme çatlakları ise düşük frekans ve uzun yükselme zamanına sahiptir. Diğer grafiklerle uyum içinde olarak özellikle 410. ve 690. saniyelerdeki süre verilerindeki piklerden de anlaşılacağı gibi bu noktadaki değişimler kesme çatlaklarına ya da lifteki sıyrılma ve kopmalara işaret ettiği düşünülmektedir (Şekil 5.29).



Şekil 5.30. K3 elemanının genlik grafiği

Şekil 5.30' da K3 deney elemanının genlik grafiği görülmektedir. 42 dB eşik seviyesi istenmeyen gürültüleri elimine edebilmek için kullanılmıştır. Genlik değerleri hasarın büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. 410 ve 690. sn'lerdeki gibi genliğin arttığı noktalar diğer grafiklerle uyum içindedir. Değişiklikler daha büyük çatlaklara veya liflerin kopmasına işaret ediyor olabilir.



Şekil 5.31. K3 elemanının (a) 20. sn'den önceki ve (b) 20. sn'den sonraki RA değeri grafiği

Şekil 5.31' deki grafikte doğrunun üzerinde ve altında kalan değerlerin yüzdeleri oluşan çatlak mekanizması ile ilgili fikir vermektedir. K3 numunesinin RA değerleri ile ortalama frekans değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. İlk çatlakların oluştuğu 20. sn'den öncesi ve sonrası değerleri karşılaştırıldığında, çekme çatlaklarının %2 kadar azalıp, kesme çatlaklarının ise bu oranda arttığı görülmektedir (Aggelis, 2011).

## 5.4. K1, K2 ve K3 Numunelerinin Mekanik ve Akustik Deney Sonuçlarının Birbiriyle Karşılaştırılması

Donatı detayları Tablo 4.9' da verilen numunelerden K1 eğilme donatısı yetersiz şekilde tasarlanmış ve eğilme çatlak oluşmuştur. K2, kesme donatısı yetersiz olarak tasarlanmıştır ve beklenildiği gibi kesme bölgesinde derin bir çatlak oluşarak hasar almıştır. K3 ise hem eğilme hem kesmeye karşı donatılandırılmış ve deney sonunda beklenildiği gibi sünek bir davranış sergileyerek eğilme çatlak oluşmuştur. K1, K2 ve K3 deney elemanlarının mekanik ve akustik deney sonuçları bu kısımda karşılaştırılmıştır.

### 5.4.1. Mekanik deney sonuçları

Deney elemanlarının mekanik deney sonuçlarının birbiriyle karşılaştırılması Tablo 5.3'de gösterilmiştir. K1 ve K3 numuneleri karşılaştırıldığında; her iki numunede de eğilme çatlak oluşarak beklenildiği gibi sünek bir davranış sergilemişlerdir. Ancak K1, yetersiz oranda eğilme donatısı içerdiğinden, eleman tam performans sergileyememiş ve %57 daha az yük taşıyabilmiştir. Deplasman değerleri deney özellikle sonlandırıldığından birbirine yakın olmasına rağmen enerji yutma kapasitesi bakımından K1 %60 az enerji absorbe edebilmiştir, K3 ise oldukça sünek davranmıştır. Bu, beton kalitesi arttıkça içeriğindeki donatı miktarının da artırılması gerektiğini göstermektedir. K2 numunesi ise etriye içermediğinden diğer numunelere göre yaklaşık %50 daha az deplasman yaparak kesmeden kırılmıştır. Taşıyabildiği maksimum yük, K3 numunesinden %20 az iken, deplasman olarak %52, enerji yutma kapasitesi olarak da %73 oranında daha azdır. K1 ve K3 eğilme çatlak oluşumu ile hasar almışken, K2 kesme çatlak oluşmasıyla hasar almıştır. Genel olarak grafiklerin bitişlerinden de görülebileceği gibi deney sonlandırılmasaydı numunelerin deplasman yapmaya daha da devam edebileceği düşünülmektedir.

Bu durumda aynı koşullardaki ve aynı kalitedeki lifli RPB için, kesme donatısının yeterli olması deplasman üzerinde büyük oranda etkili iken, betonda eğilme donatısı miktarı ise eğilmede taşıyabileceği maksimum yükü doğrudan etkilemektedir.



Tablo 5.3. Mekanik deney sonuçları ve birbirine oranları

Eleman	P max ( ton)	P max Oranı*	Dmax (mm)	Dmax Oranı*	Enerji Yutma Kapasitesi (EYK) , KN.mm ( joule)	EYK Oranı*
<b>K1</b>	11	%43	22.42	%93	2089, 2	%40
<b>K2</b>	20,7	%80	11.55	%48	1414,7	%27
<b>K3</b>	25,8	%100	24,03	%100	5169, 0	%100

\*Numuneler birbirine oranları K3 numunesi %100 kabul edilerek hesaplanmıştır.

### 5.4.2. AE deney sonuçları

Deney elemanlarının akustik deney sonuçlarının birbiriyle karşılaştırılması Tablo 5.4’de gösterilmiştir. Numunelerin AE enerjileri karşılaştırıldığında, kırılmalar sonucunda ortaya çıkan AE enerjisinin maksimum değerleri birbirine yakındır. Bu da bu deney koşullarındaki RPB betonarme kirişte, ilgili kiriş boyutlarında yaklaşık 65000 aj AE enerjisi çıktığını göstermektedir. Kümülatif AE enerjilerine bakıldığında ise numune sünekleştikçe daha az enerji açığa çıkaran mikro seviyedeki çatlaklar oluştuğu söylenebilir. K2 elemanında olduğu gibi numune daha gevrek davranış içindeyken ise daha büyük enerjili ya da sayıca daha fazla çatlaklar oluştuğu söylenebilir.

Ortalama frekans değerlerinin hareketli ortalamaları incelendiğinde K1 ve K2 numunelerinin frekansları benzer aralıklardadır ve K3 numunesine göre 2 kat daha geniş aralığa sahiptirler. K3 numunesinin frekans aralığı ise hem daha düşük frekans değerlerinden başlamakta hem de K1 ve K2’ ye göre daha düşük seviyede kalmaktadır. Literatür araştırması yapıldığında kesme çatlaklarının uzun süreli ve daha düşük frekans değerine sahip dalgalar ürettiği bilinmektedir (Aggelis, 2011; Soulioti vd., 2009). K3 numunesi gözle görülür şekilde eğilmeden kırıldığından kesme dalgasına yol açan etkenin lifler olduğu söylenebilir. Lif-beton ve ana donatı-beton arasında oluşan çekme, sürtünme ve kopmalar bu frekans değerlerini ortaya çıkarmış olabilir (Aggelis, 2011; Soulioti vd., 2009). Bu da ana donatı dışında kullanılan liflerin de eleman içinde aktif görev yaptığını göstermektedir.

Sürelerin maksimum değerleri Tablo 5.4’ den incelendiğinde belirgin şekilde K3 numunesinde daha düşük hareketli ortalamaya sahip değerler görülmektedir. Bu durum numunede oluşan çatlakların mikro seviyede olması ile ilgilidir. K1 ve K2 numunelerinde K3 e göre yaklaşık 3 kat daha uzun süreli çatlak oluştuğu görülmektedir. Özellikle K2 numunesinin maksimum süreye sahip olmasından, numunenin gözle

görülür şekilde kesmeden kırıldığı da düşünüldüğünde, bu durum kesme çatlaklarının hakim olduğunu gösterebilir.

Genlik değerleri incelendiğinde ise, maksimum genlik K2 numunesinde oluşmuştur. Bu da diğer numunelere göre K2’de makro boyutta çatlaklar oluştuğunu gösterebilir. Kümülatif oranlara bakıldığında ise, K1’e göre K3 numunesinde deney sonucu %81 daha fazla genlik oluşmuştur. Bu da K3’ te daha düşük genlikli sayıca fazla çatlak oluştuğunu gösterebilir.

Tablo 5.4. AE deney sonuçları ve birbirine oranları

	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>
<b>Pmax, (ton)</b>	11	20,7	25,8
<b>P max Oranı</b>	%43	%80	%100
<b>AE enerjisi max (aj)</b>			
<b>Mak:</b>	65565	65535	65535
<b>Küm mak:</b>	29x10 <sup>6</sup>	52x10 <sup>6</sup>	14x10 <sup>6</sup>
<b>Küm mak Oran:</b>	%207	%371	%100
<b>Ort. Frek.Har. Ort. (Khz)</b>			
<b>Min:</b>	22.424	29.756	1.132
<b>Mak:</b>	118.012	116.368	53.616
<b>Max. Oran:</b>	%220	%217	%100
<b>Süre Har. Ort. (µsn)</b>			
<b>Min:</b>	227.596	147.208	181.176
<b>Mak:</b>	18x10 <sup>3</sup>	21x10 <sup>3</sup>	6x10 <sup>3</sup>
<b>Max. Oran:</b>	%300	%350	%100
<b>Genlik (dB)</b>			
<b>Har. Ort. Mak:</b>	63.696	75.676	52.956
<b>Har. Ort. Mak. Oran:</b>	%120	%143	%100
<b>Küm. Mak:</b>	4x10 <sup>6</sup>	9x10 <sup>6</sup>	21x10 <sup>6</sup>
<b>Küm. Mak Oran:</b>	%19	%43	%100

Tablo 5.5’ de belirgin şekilde kırılma olan noktalardaki AE verilerinin yaklaşık değerleri, numuneleri birbiriyle karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için listelenmiştir. Kümülatif enerji değerleri incelendiğinde farklı kırılma anlarındaki enerji değerleri K2>K1>K3 tür. Bu durum, daha sünek davranan kirişlerde daha az enerjiye sahip çok



sayıda mikro ölçekte kırılmalar olduğundan kaynaklanıyor olabilir. Hareketli frekans değerleri incelendiğinde ise kırılma anlarında oluşan dalganın frekans değerleri arasındaki ilişki  $K2 > K1 > K3$  tür. K3 numunesinin frekans değerleri belirgin şekilde çok daha düşüktür. Bunun lif ve donatının beton ile sürtünmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Süre değerlerindeki hareketli ortalamalar karşılaştırıldığında K1 ve K2 den net bir şey söylemek mümkün değilse de yine K3 teki belirgin kırılma anındaki çatlakların daha kısa süreli olduğu net bir şekilde söylenebilir. Bunlar da numunede mikro seviyede çok sayıda çatlak olduğunun göstergesidir. Belirgin kırılma anlarındaki genlik değerleri ise birbirine benzer olduğundan net bir yorum bu tablodaki karşılaştırmadan yapılamamıştır.

Tablo 5.5. Belirgin kırılma noktalarındaki yaklaşık değerler

Eleman	K1		K2		K3	
<b>Pmax, (KN)</b>	11		20,7		25,8	
<b>Pmax oranı</b>	%43		%80		%100	
<b>Küm. Enerji (aj)</b>	45.sn	40	200.sn	129	400	96
	75.sn	100	300.sn	$189 \times 2 \times 10^5$	700	$66,5 \times 2 \times 10^5$
	160.sn	$145 \times 2 \times 10^5$				
<b>Hareketli Frek. (kHz)</b>	45.sn	43	200.sn	75	400	3.6
	75.sn	37	300.sn	60	700	10
	160.sn	56				
<b>Hareketli süre (µsn)</b>	45.sn	5156	200.sn	7000	400	400
	75.sn	16000	300.sn	4000	700	2000
	160.sn	5900				
<b>Hareketli Genlik</b>	45.sn	53	200.sn	54	400	45
	75.sn	56	300.sn	50	700	46
	160.sn	60				



## 6 . SONUÇ

Çalışma deneysel olarak, deneme karışımlarının elde edilmesi, seçilen optimum RPB karışımı ile kiriş üretimi ve üretilen kirişlerin kırılma mekanizmalarının AE yöntemi ile incelenmesi olarak 3 aşamadan oluşmaktadır. Çalışma sınırlı zaman içerisinde ve kısıtlı laboratuvar koşulları altında gerçekleşmiştir. Bu sebeple sonuçlar bu limitler içerisinde elde edilmiş sonuçlardır. Aşağıda tüm deney sonuçları açıklanmıştır.

Ön dökümlerde 50x50x50 mm ya da 40x40x160 mm boyutlarında numuneler kullanılarak 5 grup deney gerçekleştirilmiştir. Her grupta bir öncekine göre daha iyi sonuç elde edebilmek için karışımların oranlarında, çimento, mineral katkı ve akışkanlaştırıcı oranları ve çeşitlerinde, su oranında, kür tipi, kür süresinde ve kalıp alma sürelerinde değişiklik yapılmış ve optimum karışım elde edilmeye çalışılmıştır. Bu deneme karışımları sırasında;

- Beton dayanımı, s/b oranı azaldıkça artmaktadır.
- Taze beton karışımı kalıba yerleştirildikten hemen sonra kalıpla birlikte ısıtılma tabii tutulması bu karışım dizaynlarında ve bu koşullarda dayanımda artış meydana getirmemiştir. Numunelerin 24 sa. kalıpta kalması kür yönteminin türüne göre %7-%11 aralığında basınç dayanımlarını arttırmıştır. Genel olarak 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerde daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Ayrıca karışımların kalıptan çıkarıldıktan sonra, önce normal su sonra sıcak su kürüne tabii tutulmasıyla ise eğilme dayanımları %15-17 oranında artmıştır. Bu iki durumun da, yüksek toz malzeme içeren karışımlarda numune kalıpta ısıtılma uygulamadan önce 24 sa bekletildiğinde ve önce normal kürlenme uygulandığında, oluşan hidrasyon ürünlerinin kesit içinde daha iyi yayılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanımları genel olarak artmıştır.
- Isıtılma ardından normal suda kalma süresi dayanımlarda belirgin bir artış yaratmazken ısıtılma süresinin 1 günden 3 güne çıkması basınç dayanımlarını %5-%35 oranında arttırmıştır .
- Uçucu kül kullanımı beton dayanımında bir miktar düşüşe sebep olsa da akışkanlığı optimum oranda kullanıldığında arttırmaktadır.

- Ön dökümler sırasında 60°C sıcak su kürü uygulaması ile en yüksek 170 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Bu karışımın yayılması 10,5 cm ve 28 günlük standart suda kürlenme sonucu basınç dayanımı 86,28 MPa'dır. Laboratuvarında uygulama koşullarımız ve işlenebilirlik düşünüldüğünde çalışmanın devamında bu karışım kullanılmamıştır.
- Ön dökümler sonucunda; 28 günlük standart suda kürlenme sonucu basınç dayanımı benzer şekilde 86,28 MPa olan 1.grup deneyinin K-2 kodlu karışımı üzerinden çimento tipi, akışkanlaştırıcı tipi, kür tipi, kür süresi, kalıp alma süresi su oranı revize edilerek çalışma sonucunda silis dumanı 100 kg/m<sup>3</sup> çimento ile yer değiştirilerek 90°C sıcak su kürü 3 gün uygulanarak 7 günlük basınç dayanımı 152,66 MPa olan eğilme dayanımı 17,36 MPa olan karışım (I24-90S-3-4) kiriş üretimi için seçilmiştir.

Deneyin ikinci kısmında, 125x250x1500 mm boyutlarında 3 farklı donatı detayına sahip kirişler üretilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımlarını belirlemek için 150x150x150 mm ve 100x100x600 mm numuneler kirişlerle beraber aynı koşullarda kürlenmiştir. RPB kirişlerin; beton dayanımı 125 MPa, eğilme dayanımı 14,3 MPa'dır. Numune boyutu büyüdükçe basınç ve eğilme dayanımında %20 ye kadar düşüş beklenen bir durumdur. K1 numunesi 2φ12 montaj ve alt donatıya sahip olup φ8/10 etriye ile sarılmıştır. Bu elemanda etriye, elemanın kesme yerine özellikle eğilmeden kırılmasını sağlamak amacıyla daha sık olarak kullanılmıştır. K2 numunesi sadece 2φ20 alt donatıya sahiptir. Etriye ve montaj donatısı kullanılmamıştır. Bu elemanda alt donatı elemanın eğilme yerine özellikle kesmeden kırılmasını sağlamak amacıyla daha çok kullanılmış, etriye ise bu amaçla hiç kullanılmamıştır. K3 numunesi 2φ10 montaj ve 2φ20 alt donatıya sahip olup φ8/10 etriye ile sarılmıştır. Bu elemanda etriye ve alt donatı yeterli oranda kullanılarak, hem kesme hem eğilme durumunda reaktif pudra betonla üretilmiş kirişin davranışı gözlenmiştir.

- Mekanik deneyler sonucunda, aynı koşullardaki ve aynı kalitedeki lifli RPB için, kesme donatısının yeterli olması deplasman üzerinde büyük oranda etkili iken, betonda eğilme donatısı miktarı ise eğilmede taşıyabileceği maksimum yükü doğrudan etkilemektedir. Yeterli miktarda açıklık donatısı eleman tarafından taşınabilecek yük miktarını arttırmaktadır. Yeterli miktarda etriye kullanımı deplasmanı arttırmaktadır.
- RPB kirişte yeterli açıklık donatısı ve etriye kullanıldığında enerji yutma kapasitesi artmaktadır.

- RPB beton karışımında lif kullanımı, açıklık donatısının taşıyabileceği maksimum kuvveti büyük oranda arttırmaktadır.
- Lifli RPB kirişlerin taşıma kapasitesini tam olarak kullanabilmek için, beton kalitesi arttıkça içeriğindeki donatı miktarı da optimum şekilde arttırılmalıdır. Taşıma kapasitesinde lif etkisi dikkate alınmalıdır.

Deneyin son kısmında; K1, K2 ve K3 kiriş deney elemanlarının mekanik davranışları AE yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

- Ortalama frekansın düştüğü, AE enerjisinin arttığı noktalar çatlak mekanizmasının oluştuğu noktalara işaret etmektedir.
- RPB eleman sünekleştikçe daha az enerji açığa çıkaran mikro seviyedeki çatlaklar oluşmaktadır.
- Çelik lif ve beton arasındaki sürtünmelerin akustiği kesme dalgası olarak oluşmaktadır.
- Gevrek RPB elemanda daha uzun süreli çatlaklar görülmektedir.
- RPB'deki lifler, çatlağın makro boyuta ulaşmasını geciktirmekte ve böylelikle, eleman belirgin şekilde kesmeden kırılrsa da AE grafiklerindeki kademeli artışlar olmasını sağlamakta bu sayede eleman normalden daha sünek davranmaktadır.
- Sünek davranan RPB'lerde genliği daha düşük çok sayıda fakat mikro seviyede çatlaklar oluşmaktadır.



## 7. ÖNERİLER

RPB, kullanım alanları giderek gelişen, özel uygulamalarda kullanılan özel bir beton türüdür. Bu nedenle yapısal boyutlu numunelerin kırılma mekanizmasının anlaşılması önemlidir.

- RPB elemanların davranışı araştırılırken deneysel çalışmalarda yapısal boyutlu numunelere de yer verilmelidir.
- Deneysel elemanları lifsiz ve farklı lif dozajları kullanılarak üretilip, birbiriyle kıyaslanmalıdır. Lif boyutlarının davranışa etkisi hem kısa hem uzun lifler kullanılarak incelenmelidir.
- Betonarme elemanların donatı detayları değiştirilerek ve aynı zamanda donatısız eleman da üretilerek davranış farklılıkları incelenebilir.
- AE yöntemi ile birlikte çatlak lokalizasyonu ve çatlak tipi belirleyen algoritmalar kullanılarak davranış incelenebilir.





**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Aggelis, D.G.**, 2011, Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters, *Mech. Res. Commun.*, 38(3), 153-157 pp.
- Aİtcin, P.C.**, 2000, Cements of yesterday and today concrete of tomorrow, *Cement And Concrete Research*, 30:1349-1359pp.
- Akman, M.S.**, 2003, Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi, *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426-2003/4:30-36s.
- Alver, N., Tanarlan, H. M., Sülün, Ö. Y., Ercan, E., Karcılı, M., Selman, E., Ohno , K.**, 2014, Effect of CFRP-spacing on fracture mechanism of CFRP-strengthened reinforced concrete beam identified by AE-SiGMA, *Construction and Building Materials*, 67:146–156 pp.
- Aydın, S., Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y. and Yiğiter, H.**, 2010, Effect of aggregate type on mechanical properties of reactive powder concrete, *ACI Materials Journal*, 107-M50: 441-449p.
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A.U.**, 2012, Beton, Editörler: Baradan, B. Yazıcı, H. Aydın S., Dokuz Eylül Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334, İzmir, 825s.
- Bayard, O., Plea, O. , 2003**, Fracture mechanics of reactive powder concrete: material modelling and experimental investigations, *Engineering Fracture Mechanics*, 70:839–851pp.
- Beglarigale, A., Yalçinkaya, Ç., Yazıcı, H.**, 2014, Autoclaved reactive powder concrete: the effects of steel micro-fibers and silica fume dosage on the mechanical properties, *Usak University Journal of Material Sciences*, 1:7-14pp.
- Behnia ,A., Chai H.K., Shiotani, T.**, 2014, Review: Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 65:282–302pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Beshara,F.B.A., Shaaban,I.G. , Mustafa,T.S. , 2009,** Nominal Flexural Strength of High Strength Fiber Reinforced Concrete Beams, The 11th Arab Structural Engineering Conference, 25–27 October 2009, KFUPM, Dhahran, Saudi A.
- Cavill, B., Chirgwin, G., 2004,** The World’s First RPC Road Bridge at Shepherds Gully Creek, NSW, Austroads Bridge Conference, 5th, 2004, Hobart, Tasmania, Australia.
- Chan, Y.W., Chu, S.H., 2004,** Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research* , 34:1167–1172pp.
- Cifuentes, H., García, F., Maeso O., Medina F., 2013,** Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC, *Construction and Building Materials*, 45: 130–137pp.
- Dai Q., Ng K., Zhou J., Kreiger E.L., Ahlborn T.M., 2012,** Damage investigation of single-edge notched beam tests with normal strength concrete and ultra high performance concrete specimens using acoustic emission techniques, *Construction and Building Material*, 31:231–242pp.
- Doğangün, A., 2011,** Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 844s.
- Erdoğan, T.Y., 2010,** Beton, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 757s.
- ElBatanouny , M. K., Ziehl, P. H., Larosche, A., Mangual, J., Matta, F., Nanni, A., 2014,** Acoustic emission monitoring for assessment of prestressed concrete beams, *Construction and Building Materials*, 58:46–53p.
- Gholizadeh, S., Leman, Z., and Baharudin B.,T.,H.,T., 2015,** A review of the application of acoustic emission technique in engineering, *Structural Engineering and Mechanics*, (54):6:1075-1095p.
- GN İnşaat, 2017,** Özel beton, <https://www.gninsaat.com.tr/ozel-beton-cesitleri-nedir> (Erişim Tarihi: 25 Eylül 2017)

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gökçe, H.S., Sürmelioglu, S., Andiç-Çakır, Ö.**, 2017, A new approach for production of reactive powder concrete: lightweight reactive powder concrete (LRPC), *Materials and Structures*,50-58pp. (Article in Press)
- Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot ,G., Chanvillard, G.**, 2007, Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis, *Cement and Concrete Research*, 37 :519–527pp.
- Grosse, C.U., Ohtsu M.**, 2008, *Acoustic Emission Testing*, Springer, Heidelberg, 396p.
- Hutton, P.H., Ord, R.N.**, 1970, *Acoustic Emission, Research Techniques in Nondestructive Testing*, Edited by, R.S. Sharpe, Academic Press, London and New York, 492s.
- İpek, M., Yılmaz, K., Uysal, M.**, 2012, The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase, *Construction and Building Materials*, 26:459–465pp.
- Jungwirth J., Muttoni A.**,2014, Underspanned Bridge Structures in Reactive Powder Concrete, <http://infoscience.epfl.ch/record/111667/files/Jungwirth02.pdf> (ErişimTarihi: 21 Mart 2014)
- Kaiser, J.**, 1950, A study of acoustic phenomena in tensile tests., Dr.-Ing. dissertation, Technical University of Munich.
- Kaiser, J.**, 1953, Knowledge and research on noise measurements during the tensile stressing of metals, *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 24:43–44pp.
- Kamal, M. M., Safan, M.A., Etman, Z.A., Salama, R.A.**, 2013, Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers, *HBRC Journal*, Article in Press.
- Kang, S.T., Lee, Y., Park ,Y.D., Kim, J.K.**, 2010, Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber, *Composite Structures*, 92:61–71pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Karcılı, M., Alver, N., Ohtsu, M.,** 2015, Application of AE rate-process analysis to damaged concrete structures due to earthquake, *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-015-0641-3 (Published online: 31 Mayıs 2015)
- Kawasaki , Y., Wakuda, T., Kobarai, T., Ohtsu, M.,** 2013, Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 48: 1240–1247pp.
- Kishi, T., Ohtsu, M. and Yuyama, S.,** 2000, Acoustic Emission-Beyond the Millennium, Elsevier.
- MakitaT., Brühwiler, E.,** 2014, Tensile fatigue behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete combined with steel rebars (R-UHPFRC), *International Journal of Fatigue*, 59:145–152pp.
- Mahmud, G.H., Yang Z., Aram M.T. Hassan A.M.T.,** 2013, Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) beams, *Construction and Building Materials*, 48:1027–1034pp.
- Maierhofer, C., Reinhardt, H.W., Dobmann, G.,** 2010, Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures -Volume 2: Non-destructive testing methods, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, UK., 584p.
- Menefy L.,** 2007, Investigation of Reactive powder concrete and it'd damping characteristics when utilised in beam elements, Griffith University Gold Coast Campus, Doctor of Philosophy.
- Muravin, G., Muravin, B.,** 2012, Guide for Acoustic Emission Examination of Reinforced Concrete Bridges, 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission, University of Granada, (12-15 September 2012).
- Nair , A., C.S. Cai.,** 2010, Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies, *Engineering Structures*, 32 :1704-1714pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ng, K. M., Tam, C. M. and Tam, V.W.Y.**, 2010, Studying the production process and mechanical properties of reactive powder concrete: a Hong Kong study, *Magazine of Concrete Research*, 62(9):647-654pp.
- Ohtsu, M.**, 2006 , “Quantitative AE techniques standardized for concrete structures”, *Adv. Mater. Res.*, 13:183-192pp.
- Ohtsu, M., Isoda, T. ve Tomoda, Y.**, 2007, Acoustic Techniques Standardized for Concrete Structures, *J. Acoustic Emission*,(25):21-32p.
- Ohtsu, M. and Uddin, F.A.** , 2008, Mechanisms of corrosion-induced cracks in concrete at meso-and macro-scales, *J. Adv. Concrete Tech.*, 6(3), 419-429pp.
- Ohtsu, M. and Tomoda, Y.**, 2008, “Phenomenological model of corrosion process in reinforced concrete identified by acoustic emission”, *ACI Mater. J.*, 105(2), 194-199pp.
- Ohtsu, M., Kawasaki, Y.**, 2010, AE-SiGMA Analysis in Brazilian Test and Accelerated Corrosion Test of Concrete, *J. Acoustic Emission*, 28:204-214pp.
- Ohno, K. and Ohtsu, M.**, 2010 , Crack Classification in Concrete based on AE, *Construction and Building Materials*, 24(12), 2339-2346pp.
- Ohno, K., Uji, K., Ueno, A., Ohtsu, M.**, 2014, Fracture process zone in notched concrete beam under three-point bending by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 67:139–145pp.
- Ohtsu, M.**, 1991, Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of AE source: application in situ hydrofracturing test, *J Geophys Res*, 96(B4):6211-6221pp.
- Ono, K.** 2011, Acoustic emission in materials research-a review, *J. Acoust Emission*, 29, 284-308pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Ozawa, M., Uchida, S., Kamada, T., Morimoto, H.,** 2012, Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 37:621–628pp.
- Panjsetooni, A., Muhamad, N.,** 2013, Research Article: Damage Source Identification of Reinforced Concrete Structure Using Acoustic Emission Technique, Hindawi Publishing Corporation The ScientificWorld Journal, Article ID 870585, 1-5pp. (<http://dx.doi.org/10.1155/2013/870585>)
- Rebentrost, M., Annan, R.,** 2008, Design of two reactive powder concrete bridges, *Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds)*, 313-318pp.
- Richard, P., Cheyrezy, M.,** 1995, Composition of reactive powder concretes, *Cement and Concrete Research*, 25(7): 1501–1511pp.
- Sadrekarimi, A.,** 2004, Development of a light weight reactive powder concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3):409-417pp.
- Sagar, R. V., Prasad, B.K.R.,** 2012, A review of recent developments in parametric based acoustic emission techniques applied to concrete structures, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(1): 47–68pp.
- Selman, E., Ghiami A., Alver, N.,** 2015, Study of fracture evolution in FRP-strengthened reinforced concrete beam under cyclic load by acoustic emission technique: An integrated mechanical-acoustic energy approach, *Construction and Building Materials*, 95 : 832–841pp.
- Sengupta, S., Datta, A. K., Topdar, P.,** 2015, Structural damage localisation by acoustic emission technique: A state of the art review, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12:1565-1582pp.
- Shaheen, E., Shrive, N.G.,** 2006, Optimization of mechanical properties and durability of reactive powder concrete, *ACI Materials Journal*, 103-M49: 444-451p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Shigeishi, M., Ohtsu, M.,** 2001, Acoustic emission moment tensor analysis: development for crack identification in concrete materials, *Construction and Building Materials*, 15: 311-319pp.
- Şimşek, O.,** 2009, Beton Ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 263s.
- Şimşek, O.,** 2012, Beton Ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 287s.
- Soulioti, D., Barkoula, N.M., Paipetis, A., Matikas, T.E., Shiotani, T., Aggelis, D.G.,** 2009, Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending, *Construction and Building Materials*, 23:3532–3536pp.
- Tam, C.M., Tam V.W.Y., Ng K.M.,** 2010, Optimal Conditions for producing reactive powder concrete, *Magazine of Concrete Research*, 62(10):701–716pp.
- TEKPROM,** 2015, Akustik emisyon yöntemi ile tankların muayenesi, <http://tekprom.com.tr/site/akustik-emisyon-ae-yontemi-ile-tanklarin-muayenesi> (Erişim Tarihi: 29 Ekim 2015)
- Topçu B. İ., Karakurt C.,** 2005, Reaktif pudra betonları, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, SAYI: 437-50/2005-3, 25-30s.
- Tuncel, S.,** 2008, Tahribatsız muayene teknolojilerinde son gelişmeler: Akustik Emisyon, 3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition, Istanbul Turkey, April 2008.
- Uddin A.K.M. F., Numata, K., Shimasakia, J., Shigeishic,M., Ohtsu, M.,** 2004, Mechanisms of crack propagation due to corrosion of reinforcement in concrete by AE-SiGMA and BEM, *Construction and Building Materials*, 18 :181–188p.
- Uddin, F.A., Shigeishi, M. and Ohtsu, M. ,** 2006, Fracture mechanics of corrosion cracking in concrete by acoustic emission, *Meccanica*, 41(4):425-442p.
- Wadley , H.N.G., Mehrabian, R.,** 1984, Acoustic Emission For Materials Processing : a Review, *Materials Science and Engineering*, 65:245-263pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Watson, J., Yuyama, S., Pullin, R. and Ing, M.** (2005), Acoustic emission monitoring applications for civil structures, Bridge Management 5, Thomas Telford, London.
- Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E.**, 2014, Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, *Cement & Concrete Composites*, 48 : 53–66p.
- .Vogel, T., Schechinger, B. and Fricker, S.**, 2006, Acoustic emission analysis as a monitoring method for prestressed concrete structures, Proceedings of the 9th European Conference on NDT (ECNDT), Berlin, September.
- Yaman, İ. Ö.**, 2015, Betonda Tahribatlı Tahribatsız Muayene Metodları, Ders Notu, <http://www.atilimlab.com.tr/makaleler/BetondaMuayene.pdf> (Erişim Tarihi: 29 Ekim 2015)
- Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., Karabulut, A.**, 2009, Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, *Construction and Building Materials*, 23 :1223–1231pp.
- Yazıcı, H., Deniz, E., Baradan, B.**, 2013, The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 42:53–63pp.
- Yang, I.H., Changbin, J., Byung-Suk, K.**, 2010, Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending, *Engineering Structures*, 32:3478–3487pp.
- Yeğinoğlu, A.**, 2009, Silis Dumanı Ve Çimento İle Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, TÇBM/AR-GE/Y01.01, Fersa Matbaacılık, 6.Baskı, Ankara, 62s.
- Yi N.H. , Kim J.H.J., Han T.S., Cho b Y.G. and Lee J.H.**, 2012, Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 28:694–707pp.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Yunsheng, Z., Wei, S., Sifeng, L., Chujie, J., and Jianzhong L.,** 2008, Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static–dynamic behaviors, *Cement And Concrete Composites*, 30: 831–838pp.

**Zaki, A., Chai H. K., Aggelis, G. D. ve Alver , A.,** 2015, Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique, *Sensors* , 15:19069-19101pp.





## ÖZGEÇMİŞ

Setenay (EREEŞ) SÜRMEİİÖĞLU, 1990 yılında İzmir’ de doğdu. 2004 yılında Karşıyaka Zübeyde Hanım İlköğretim Okulu’nu bitirdi. 2004-2008 yılında Bornova Yunus Emre Anadolu Lisesi (Almanca)’ ni okul birinciliği ile tamamladı. 2008-2013 yılında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü bölüm birinciliği ile tamamlayıp, 2013 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında yüksek lisans programına girdi. İngilizce, Almanca ve az derecede Japonca bilmektedir. İyi derecede AutoCAD ve Sta4-CAD, orta derecede SAP programlarını bilmektedir.

### Mesleki faaliyetler/Stajlar:

2011- AFA Prefabrik A.Ş. (Stajyer ).....Şantiye : Üretim – Laboratuvar

2012- Dere Prefabrik A.Ş. (Stajyer ).....Büro : Proje

2013-2015 Ardalı İnşaat Ltd. Şti. (İnşaat Mühendisi- Stajyer).....Büro: Proje

2015- Aslı Odabaşı Şirketi (İnşaat Mühendisi)..... Büro: Proje

Hobiler: Voleybol oynamak, keman çalmak, karikatür çizmek, bisiklet, WindowsMovieMarker ile slayt/video şov/kısa film hazırlamak.

### Akademik Çalışmalar:

-**Gökçe, H.,S., Sürmeliöğlu, S., Andiç-Çakır, Ö.**, 2017, A new approach for production of reactive powder concrete: lightweight reactive powder concrete (LRPC), Materials and Structures,50-58pp. (Article in Press)



**EKLER**

Ek 1 Grup-1 Deney Sonuçları Tablosu

Ek 2 Grup-2 Deney Sonuçları Tablosu

Ek 3 Grup-3 Deney Sonuçları Tablosu

Ek 4 Grup-5 Deney Sonuçları Tablosu





Ek 1 Grup-1 Deney Sonuçları Tablosu

Deney No	Basınç Dayanımı, MPa				Açıklama
	20 °C Standart Su Kürü		60 °C Sıcak Su Kürü		
	7 günlük	28 günlük	7 günlük	28 günlük	
Z	73,60	87,20	-	-	20 cm yayılma
Y	76,76	86,20	-	-	17 cm yayılma
X*	68,84	69,08	100,04	96,84	17 cm yayılma
W	71,16	86,28	144,04	170,92	10,5 cm yayılma
V	80,84	95	108,88	-	<10,5
U	40,94	59,16			Priz sorunu yaşandı
T	61,51	76,56			Priz sorunu yaşandı

\*X ve Y karışımları arasındaki tasarım farkı sadece çimento tipi farkıdır.





Ek 2 Grup-2 Deney Sonuçları Tablosu

Kod	Basınç Dayanımı, MPa			Yayıma, cm
	20°C Standart Su Kürü		70°C Buhar Kürü	
	7-gün	28-gün	3-gün	
A6 <sup>+</sup>	-	-	94,84	>15
A24	95,38	124,16	136,2	
B6 <sup>+</sup>	-	-	81,98	<15
B24	90,1	110	117,12	



Ek 3 Grup-3 Deney Sonuçları Tablosu

Kod	Basınç Dayanımı, MPa			
	Sıcak su – 20 °C Standart su kürü süreleri (gün)			
	1-0	3-0	1-6	3-4
A18-50S	93,86	120,13	94,41	120,85
A24-50S	90,46	122,6	96,17	118,01
A18-70S	119,73	138,37	126,9	132,56
A24-70S	118,90	148,86	117	132,34
A18-90S	118,41	134,91	143,6	136,78
A24-90S	132,10	144,92	124,74	151,61



Ek 4 Grup-5 Deney Sonuçları Tablosu

Kod	Eğilme Dayanımı, MPa				Açıklama
	1-0	3-0	3-4	2-5#	
H24-90S	14,31	18,75	16,57	19,21	
I24-90S	17,70	18,23	17,36	20,35	
J24-90S	15,37	18,76	18,18	-	
K24-90S	_*	_*	20,26*	-	Priz sorunu yaşandı

\*K kodlu numunelerde 26-27 saat kalıptan çıkarma süresi gerekli oldu. 24 saat sonunda kalıptan çıkarılıp suya konulan numuneler suda dağıldı.

#Önce 2 gün normal su kürü, ardından 4 gün ısıtma işlemi uygulanmış, 5. gün içinde kırılmıştır.

Kod	Basınç Dayanımı, MPa	
	3-4	2-5#
H24-90S	155,68	172,91
I24-90S	152,66	169,35
J24-90S	146,65	-
K24-90S	147,09	-

Not: Numunelerin basınç dayanımları (3-4) kodlularda 14 günlük dayanım, (2-5) için 13 günlük dayanımdır.

#Önce 2 gün normal su kürü, ardından 4 gün ısıtma işlemi uygulanmış, 5.gün içinde eğilme deneyi için kırılmıştır.