



**DEĞİŞKEN GEOMETRİDE VE DOĞRULTUDA YAPAY AGREGAYA
SAHİP YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN ÇARPMA ETKİSİ
ALTINDA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Volkan ERKAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2017

Volkan ERKAN tarafından hazırlanan “DEĞİŞKEN GEOMETRİDE VE DOĞRULTUDA YAPAY AGREGAYA SAHİP YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN ÇARPMA ETKİSİ ALTINDA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Lütfullah TURANLI

İnşaat Mühendisliği, Yıldırım Bayezıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Meral BEĞİMGİL

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 24 /05/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Volkan ERKAN

24/05/2017

DEĞİŞKEN GEOMETRİDE VE DOĞRULTUDA YAPAY AGREGAYA SAHİP
YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN ÇARPMA ETKİSİ ALTINDA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Volkan ERKAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2017

ÖZET

Beton, diğer birçok seramik kökenli inşaat malzemesi gibi yüksek çarpma dayanımına sahiptir. Malzemede çatlak oluşturmak için belirli bir enerji gerekiyorken, göçme yaratmak için ise daha fazla enerji gerekmektedir. Bu nedenle, özel geliştirilmiş aletlerle deneyler yapılmaktadır. Bu çalışmada da çarpma etkisiyle beton kıran bir makine özel olarak geliştirilerek kullanılmıştır. Üzerinde çalışılan beton numuneler mikrobeton olarak tasarlanmıştır. Bunun için 0.20 s/ç oranında CEM I 52,5 R Beyaz Portland Çimentosu ve agregası olarak AFS 40-45 kodlu silis kumu kullanılarak yüksek performanslı beton üretilmiş ve 50×50×50 mm³ küp numune statik basınç dayanımları kireç taşı ve bazalt küp basınç dayanımı arasında kalacak şekilde ortalama minimum 150 mPa (megapaskal) olarak öngörülmüştür. Deney uygulanan beton numuneler; 4 farklı geometride, 3 farklı doğrultuda ve 3 farklı petrografik tipte olmak üzere yapay agregası kullanılarak toplamda 30 adet 100×400×20 mm³ boyutlarındaki prizmatik yüksek dayanımlı şerit beton numunelerin çarpma etkisi altındaki performansı incelenmiş, agregada ve beton arayüzündeki çatlakların yörüngeleri izlenmiştir. Uygun nitelikte deney cihazı ve ölçüm cihazları kullanılarak karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir. Andezit ve bazalt agregası barındıran numunelerde enerji yutma kapasitesi daha yüksektir. Çarpma deneylerinden elde edilen sonuçların; numune tipine ve çentik geometrisine hatta çarpan düzeneğin özelliklerine bağlı olduğu ortaya koyulmuştur. Son zamanlarda, yüksek dayanımlı betonların kullanımı artış göstermiştir. Böylece, yüksek dayanımlı betonların normal betonlara göre barındırdığı agregası petrografilerinin ve geometrilerinin daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu deneylerle, kullanıcı dostu yeni uygulamaların, yapılarda kullanılan yüksek dayanımlı betonların değerlendirilmesi sağlanmakla birlikte, başlangıç ve yapı ömrü maliyetlerini düşürmek amaçlanmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma üretilecek yapıların çarpma etkisi altında daha uzun ömürlü tasarlanmasına da katkıda bulunacaktır.

Bilim Kodu : 91111

Anahtar Kelimeler : Kırılma mekaniği, yüksek dayanımlı beton, çarpma dayanımı, tokluk, yapay agregası

Sayfa Adedi : 229

Danışman : Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

INVESTIGATION OF FRACTURE MECHANISM AND BEHAVIOUR OF HIGH
PERFORMANCE CONCRETES WITHIN ARTIFICIAL AGGREGATES IN
VARIABLE DIMENSIONS AND DIRECTIONS UNDER IMPACT LOADING

(M. Sc. Thesis)

Volkan ERKAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2017

ABSTRACT

Concrete has high impact resistance like many other calcium origin building materials. Energy is needed to create a collapse, while a definite amount of energy is only needed to create fractures in materials. Therefore, experiments have been carried out with specially developed devices. In this paper, a concrete breaker machine specially developed for the effect of impact was used. The tested concretes were designed as micro-concretes. For this purpose, high performance concretes have been produced by using CEM I 52.5 R White Portland Cement in the ratio of 0,20 w/c and silica sand coded as AFS 40-45. Their 50x50x50 mm³ cubic compressive strengths were predetermined as 150 mPa (megapascal) that is among the compressive strengths of limestone and basalt. 30 high performance concrete specimens (within artificial aggregates in 4 different sizes, 3 different directions and 3 different petrographical types) in prismatic size of 100×400×20 mm³ have been studied as they are provided to be plain specimens, the crack paths among aggregates and the interface of concretes have been investigated. Comparable results have been obtained by applying appropriately qualified test devices and data measurement device. The capacity of energy absorption in the specimens including andesite and basalt is higher. Impact test results can depend strongly upon the specimen size and the geometry of the notch, anvils, and striker. Recently, high performance concrete usage has soared. Therefore, it is deduced that high performance concretes which include aggregate petrographical types and sizes have more importance than normal concretes. Thanks to the experiments, the aim is to lower the initial costs and extend the life of structures as well as ensuring the evaluation of new user-friendly applications and the use of new materials in constructions. Hence, this study will also make contribution to manufactured buildings design to have more life expectancy under impact loads.

Science Code : 91111

Key Words : Fracture mechanism, high performance concrete, impact strength, toughness, artificial aggregate

Page Number : 229

Supervisor : Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başladığı günden itibaren benimle bilgi ve tecrübelerini paylaşan, beni en doğru biçimde yönlendiren ve ufkumu genişleten, çalışmanın tamamlanmasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanı hocam Sayın Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN'a can-ı gönülden teşekkür eder ve en derin saygılarımı sunmayı bir borç bilirim.

Tez çalışmamı sürdürdüğüm süreç boyunca bana her türlü yardım ve destek sağlayan Sayın Prof. Dr. Özgür Anıl'a, Sayın Doç. Dr. Nevzat KIRAC'a, çalışmalarında katkısı olan Sayın Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a, Sayın Uzman Faruk ÖGÜN'e, kıymetli ağabeyim Yüksek İnş. Müh. Utku ERKAN'a sonsuz teşekkürlerimi ve minnetimi ifade etmek isterim.

Tez Çalışmam sırasında bana yardımcı olan OSTİM firmalarından, Deniz Yay Sanayi A.Ş.'ne, Zafer Kauçuk Plastik Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti'ne, Yüksel Kaya Makine Kalite Kontrol ve Malzeme Test Cihazları Şti.'ne teşekkür ederim.

Tez çalışmam devam ederken bana destek olan arkadaşlarım Araş. Gör. Muhammed GÜMÜŞ'e, Yüksek İnş. Müh. Osman YÖRÜK'e, Mak. Müh. İpek YÜCETURUN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması boyunca bana maddi, manevi destek olan sevgili annem Solmaz ERKAN'a, tez çalışmamın ortaya çıkmasında destek olan kuzenlerim Umut BAĞTAŞ'a, Orçun BAĞTAŞ'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa	
iv	ÖZET
v	ABSTRACT.....
vi	TEŞEKKÜR.....
vii	İÇİNDEKİLER
xi	ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....
xii	ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....
xx	RESİMLERİN LİSTESİ.....
xxiii	SİMGELER VE KISALTMALAR.....
1	1. GİRİŞ.....
5	2. ÇARPMA ETKİSİ
5	2.1. Çarpma Deneylerinin Tarihsel Gelişimi
5	2.1.1. 1800-1895 arasında
5	2.1.2. 1895-1922 arasında
7	2.1.3. 1922-1933 arasında (ASTM E 23 standardının geliştirilmesi)
7	2.1.4. 1940-1948 arasında
8	2.1.5. 1948'den günümüze
8	2.1.6. Bugünkü uygulamalar
9	2.2. Çarpma Deneylerinde Kullanılan Deney Cihazları.....
9	2.2.1. Charpy-Izod deney aleti
10	2.2.2. Dart-Impact deney aleti.....
11	2.2.3. Ağırlık düşürme aletleri
12	2.2.4. Raylı tabancalı (balistik) deney aletleri.....
14	2.3. Çarpma ve Temas Mekaniğine Giriş.....
15	2.3.1. Çarpma deneylerinde ve mekaniğinde tanımlar
20	2.4. Beton Numuneler Üzerinde Yapılmış Çarpma Deneyleri.....

	Sayfa
2.5. Plak Çarpma Teorisi.....	29
2.6. Kırılma Enerjisi.....	30
2.7. Kuvvet Sensörleriyle Çarpma Deneylerinin Uygulanışı.....	31
3. KIRILMA MEKANİĞİ.....	35
3.1. Kırılma Mekanizmasının Tarihsel Gelişimi	35
3.2. Lineer Elastik Kırılma Mekanizması.....	37
3.3. Lineer Olmayan Kırılma Mekanizması	41
4. BETONUN KIRILMA MEKANİĞİ.....	43
4.1. Giriş.....	43
4.2. Griffith Teorisi ve Betona Uygulanması.....	43
4.3. Gerilme Gerinim Eğrisi.....	44
4.4. Betonda Kırılma Mekanizması	45
4.5. Göçmede Agrega Etkisi	47
4.6. Çatlak Yayılmını Önleyici Etkenler.....	49
4.7. Betonun Kırılma Parametrelerini Tespit Çalışmaları.....	50
4.8. G_F Kırılma Enerjisi.....	51
4.8.1. Deney yöntemleri	54
4.8.2. G_F 'nin belirlenmesinde sayısal yöntemler	56
5. MİKROBETON	59
5.1. Tanım ve Tasarım İlkeleri.....	59
5.2. Potansiyel Avantaj ve Dezavantajları ile Kullanım Alanları	61
6. ULTRA YÜKSEK DAYANIMLI BETONLAR	63
6.1. Temel Bilgiler	63
6.2. Karışım Esasları	65
6.3. Karışım Sonrası İşlemler.....	65
6.3.1. Taze betonu basınç ile sıkıştırma	65
7. AGREGA-ÇİMENTO PASTASI BAĞI(ADERANSI)	67
7.1. Temel Tanımlar ve Bağ Tipleri.....	67

	Sayfa
7.1.1. Mekanik bağlanma	68
7.1.2. Epitaksik bağlanma	68
7.1.3. Kimyasal bağlanma.....	70
7.2. Agreg a Çimento Hamuru Bağına Etki Eden Faktörler	70
7.2.1. Agreg a geometrisi ve yüzey dokusu	70
7.2.2. Su/Çimento oranının etkisi.....	71
7.2.3. Agreg a cinsinin (petrografik ve minerolojik yapı) etkisi.....	73
7.2.4. Diğer etkenler.....	75
7.3. Bağ Dayanımının Kısa Süreli Yükleme Altındaki Beton Dayanımına Etkisi	76
7.4. Ara Yüzey Kırılmasının Önemi	78
7.5. Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Çatlak Dağılımları	79
7.6. Agreg a Şekil ve Boyutunun Dayanıma Etkisi	81
8. DENEYSEL PROGRAM	83
8.1. Deney Düzen e ğ i	83
8.2. Teçhizatlandırma.....	84
8.3. Kalibrasyon	86
8.4. Deney Mekanizmasının Kullanılması	86
8.5. Beton Numunelerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler	92
8.5.1. Çimento	92
8.5.2. Agreg a.....	93
8.5.3. Kimyasal katkı malzemesi-süper akışkanlaştırıcı	93
8.5.4. Karışım ve kür suyu	94
8.6. Yüksek Dayanımlı Betonun Üretilmesi	94
8.6.1. Beton karışım oranları.....	94
8.6.2. Beton hazırlanışı.....	94
8.7. Beton Numuneler	95
8.8. Çarpma Deneylerinde Yapay Agregalar	96
8.9. Şerit Beton Numunelerin Adlandırılması ve Kodlandırılması	96

	Sayfa
8.10. Eğilme Deneyi Cihazı	98
8.11. Sertleşmiş Beton Deneyleri	98
8.12. Üç Noktalı Eğilme Deneyleri ve G_F Kırılma Enerjisinin Bulunması	101
8.13. Çarpma Deneyleri	102
9. DENEYLERİN SONUÇLARI	103
9.1. Çarpma Deneylerinde Çatlak Yörüngeleri ve Göçmeye Ait Sonuçlar	103
9.2. Üç Noktalı Eğilme Deneylerinin Sonuçları ve G_F Kırılma Enerjisinin Hesabı ..	188
9.3. Enerji-Deplasman Grafikleri	193
10. SONUÇ VE ÖNERİLER	199
KAYNAKLAR	205
EKLER.....	215
EK-1. Geliştirilen deney makinesi.....	216
EK-2. Birleşik çatlak yörüngeleri.	219
EK-3. Küp beton numunelerin standart basınç dayanımı sonuçları.	221
ÖZGEÇMİŞ	229

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Piezo-elektronik kuvvet sensörlerinin özellikleri	33
Çizelge 2.2. İvme-ölçer seçiminde önemli olan değerler.....	33
Çizelge 7.1. a) Tane şekil sınıflaması, b) Agrega yüzey dokusu sınıflaması	69
Çizelge 8.1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	92
Çizelge 8.2. Silis kumunun kimyasal analiz sonuçları.....	93
Çizelge 8.3. Beton karışım oranları	94
Çizelge 8.4. Kodlandırma şeması	97
Çizelge 8.5. Döküm sırası kodlandırması	97
Çizelge 8.6. Küp beton numunelerin basınç dayanımları	99
Çizelge 9.1. Eğilme deneyi numunelerinin eğilme dayanımları ve kırılma enerjileri	191

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Charpy- Izod deney aleti şeması.....	10
Şekil 2.2. Split-Hopkinson basınç çitası	13
Şekil 2.3. Taylor Impact yöntemi	13
Şekil 2.4. Örnek gerilme-şekil değiştirme eğrisi	15
Şekil 2.5. Çarpan cisimlerin serbest cisim diyagramı.....	16
Şekil 2.6. Beton hasar formları	17
Şekil 2.7. Ayrıntılı beton hasar formları	17
Şekil 2.8. Radyal çatlak hasar formları.....	18
Şekil 2.9. Ayrıntılı beton hasar formlarının devamı	18
Şekil 2.10. Şekil değiştirme hızına ait sınıflandırma şeması	19
Şekil 2.11. L uzunluğundaki bir kirişin serbest cisim diyagramı	19
Şekil 2.12. Düşen bir ağırlıkla sıkışan yay	26
Şekil 2.13. Kütle yay serbest cisim diyagramı	27
Şekil 2.14. Farklı özelliklerdeki ICP-PCB piezo-elektronik dinamik yük-ölçerler.....	32
Şekil 3.1. Kırılma mekaniğinde tarihi gelişim aşamaları.....	36
Şekil 3.2. Eliptik boşluğa sahip sonsuz bir levha.....	37
Şekil 3.3. Çatlak ve çentik ucundaki gerilme yığılmaları	38
Şekil 3.4. Kırılma Modları	40
Şekil 3.5. Kırılma süreci bölgesi.....	41
Şekil 3.6. Barenblatt'ın kohezif çatlak modeli.....	42
Şekil 4.1. İki eksenli gerilme altında Griffith kriteri	44
Şekil 4.2. Agreg, çimento ve betonun karakteristik gerilme-gerinim eğrisi	45
Şekil 4.3. Betonun gerilme-gerinim eğrisinin uç noktası	46

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Agrega kilitlenmesi.....	46
Şekil 4.5. Tek eksenli basınç altında betonun karakteristik gerilme-gerinim eğrisi.....	47
Şekil 4.6. Tek eksenli basınçta agrega-matriks arayüzünde gerilme ve gerinim.....	48
Şekil 4.7. Tek eksenli basınç altında idealize edilmiş bir agrega partikülü	49
Şekil 4.8. Direkt çekme deneyinde betonun yük deformasyon eğrisi.....	52
Şekil 4.9. Değişik malzemelerde N non-lineer, Y yumuşama, L lineer alanlar	53
Şekil 4.10. Betonun σ - ϵ ve σ -w eğrileri	54
Şekil 4.11. Beton için nümerik hesaplarda kullanılan gerilme-gerinim eğrileri.....	54
Şekil 4.12. Üç noktalı eğilme deneyine ait yük deformasyon eğrisi ve ilave alanlar	55
Şekil 4.13. Üç noktalı eğilme deneyinde G_F hesabı için verilen boyutlandırmalar	56
Şekil 4.14. Hayali çatlak modeli	57
Şekil 4.15. Çatlamış şerit modeli	57
Şekil 6.1. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi	63
Şekil 6.2. Betonun evrimi kapsamında basınç dayanımı-su/çimento ilişkisi.....	64
Şekil 7.1. Su/çimento oranının mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi	72
Şekil 7.2. Farklı agregaların betonun yük deformasyon davranışına etkisi.....	74
Şekil 7.3. Püskürük kayaçlı betonda bağ dayanımı-agrega silis içeriği oranı	75
Şekil 7.4. Tek eksenli basınç yüklemesi altında betonun gerilme-deformasyon eğrisi ..	77
Şekil 7.5. Göçme etkisinde agrega ve harç dayanımına göre çatlakların oluşumu.....	78
Şekil 7.6. Arayüzeyde çatlak tanımları	79
Şekil 7.7. Normal dayanımlı betonun basınç altında üç aşamalı çatlak dağılımı	80
Şekil 7.8. Yüksek dayanımlı betonun basınç altında üç aşamalı çatlak dağılımı	80

Şekil	Sayfa
Şekil 8.1. Ara aparata ait çizim	84
Şekil 8.2. Deney mekanizmasının standardizasyonu ve sönümleyicinin tayini	88
Şekil 8.3. Maksimum kapasitede şahmerdanın hız-zaman grafiği	89
Şekil 8.4. Maksimum kapasitede tam elastik çarpışmada deplasman-zaman grafiği	90
Şekil 8.5. Yükseklik-şekil değiştirme hızı grafiği	91
Şekil 8.6. Silis kumunun elek analizi ve fiziksel görünüşü	93
Şekil 8.7. Eğilme deneyi uygulanan birincil kiriş numunelerin kesitleri (mm).....	101
Şekil 8.8. Eğilme deneyi uygulanan ikincil kiriş numunelerin kesitleri (mm)	101
Şekil 9.1. 2,3 cm’de yapılan çarpma deneyinin ortalama kuvvet-zaman grafiği.....	103
Şekil 9.2. 2,3 cm’de yapılan çarpma deneyinin ortalama ivme-zaman grafiği.....	104
Şekil 9.3. 3,5 cm’de yapılan çarpma deneyinin ortalama kuvvet-zaman grafiği.....	104
Şekil 9.4. 3,5 cm’de yapılan çarpma deneyinin ortalama ivme-zaman grafiği.....	105
Şekil 9.5. A1-1 numunesine ait kuvvet-zaman grafiği	106
Şekil 9.6. A1-1 numunesine ait 3. ve 12. düşümlerin ivme-zaman grafiği.....	107
Şekil 9.7. A1-1 numunesine ait 3. ve 12. düşümlerin hız-zaman grafiği.....	107
Şekil 9.8. A1-1 numunesine ait 12. düşümün hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği .	108
Şekil 9.9. A1-1 numunesinde ait sekizinci düşüme ait kuvvet-deplasman grafiği	108
Şekil 9.10. K1-1 numunesine ait 3 düşümün kuvvet-zaman grafiği.....	110
Şekil 9.11. K1-1 numunesine ait 3 düşümün ivme-zaman grafiği.....	110
Şekil 9.12. K1-1 numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	111
Şekil 9.13. B1-1 numunesine ait tek düşümün kuvvet-zaman grafiği	112
Şekil 9.14. B1-1 numunesine ait tek düşümün ivme-zaman grafiği	113

Şekil	Sayfa
Şekil 9.15. B1-1 numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	113
Şekil 9.16. A1-1,5a numunesine ait kuvvet-zaman grafiği.....	115
Şekil 9.17. A1-1,5a numunesine ait ivme-zaman grafiği.....	115
Şekil 9.18. A1-1,5a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	116
Şekil 9.19. K1-1,5a numunesine ait iki düşümün kuvvet-zaman grafiği.....	117
Şekil 9.20. K1-1,5a numunesine ait iki düşümün ivme-zaman grafiği.....	118
Şekil 9.21. K1-1,5a numunesine ait hız-zaman grafikleri	118
Şekil 9.22. K1-1,5a numunesinin 2. düşümünün hız ve deplasman-zaman grafikleri....	119
Şekil 9.23. B1-1,5a numunesine ait kuvvet-zaman grafiği.....	120
Şekil 9.24. B1-1,5a numunesine ait ivme-zaman grafiği.....	120
Şekil 9.25. B1-1,5a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	121
Şekil 9.26. A1-1,5b numunesine ait kuvvet-zaman grafiği	122
Şekil 9.27. A1-1,5b numunesine ait ivme-zaman grafiği	123
Şekil 9.28. A1-1,5b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği.....	123
Şekil 9.29. K1-1,5b numunesine ait tek düşümün kuvvet-zaman grafiği.....	125
Şekil 9.30. K1-1,5b numunesine ait tek düşümün ivme-zaman grafiği.....	125
Şekil 9.31. K1-1,5b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	126
Şekil 9.32. B1-1,5b numunesine ait 3 düşümün kuvvet-zaman grafiği.....	127
Şekil 9.33. B1-1,5b numunesine ait 3 düşümün ivme-zaman grafiği.....	128
Şekil 9.34. B1-1,5b numunesinin düşümlerine ait hız ve deplasman-zaman grafikleri .	129
Şekil 9.35. A1-1,5c numunesinde yapılan düşümlere ait kuvvet-zaman grafikleri	130
Şekil 9.36. A1-1,5c numunesine ait ivme-zaman grafiği.....	131

Şekil	Sayfa
Şekil 9.37. A1-1,5c numunesinin 14. düşümüne ait hız ve deplasman-zaman grafiği ...	131
Şekil 9.38. K1-1,5c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği.....	133
Şekil 9.39. K1-1,5c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği	133
Şekil 9.40. K1-1,5c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	134
Şekil 9.41. B1-1,5c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği.....	135
Şekil 9.42. B1-1,5c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği.....	136
Şekil 9.43. B1-1,5c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	136
Şekil 9.44. A1-1,7a numunesine ait 3 düşümün kuvvet-zaman grafiği	138
Şekil 9.45. A1-1,7a numunesine ait 3 düşümün ivme-zaman grafiği	138
Şekil 9.46. A1-1,7a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	139
Şekil 9.47. K1-1,7a numunesine ait iki düşümün kuvvet-zaman grafiği.....	141
Şekil 9.48. K1-1,7a numunesine ait iki düşümün ivme-zaman grafiği.....	141
Şekil 9.49. K1-1,7a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	142
Şekil 9.50. B1-1,7a numunesine ait kuvvet-zaman grafiği	143
Şekil 9.51. B1-1,7a numunesine ait ivme-zaman grafiği.....	144
Şekil 9.52. B1-1,7a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	144
Şekil 9.53. A1-1,7b numunesine ait kuvvet-zaman grafiği	146
Şekil 9.54. A1-1,7b numunesine ait ivme-zaman grafiği	146
Şekil 9.55. A1-1,7b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	147
Şekil 9.56. K1-1,7b numunesine ait kuvvet-zaman grafiği	148
Şekil 9.57. K1-1,7b numunesine ait ivme-zaman grafiği	149
Şekil 9.58. K1-1,7b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri.....	149

Şekil	Sayfa
Şekil 9.59. B1-1,7b numunesinde yapılan düşümlere ait kuvvet-zaman grafikleri	151
Şekil 9.60. B1-1,7b numunesinde yapılan düşümlere ait ivme-zaman grafiği	152
Şekil 9.61. B1-1,7b numunesinin 9. düşümüne ait hız ve deplasman-zaman grafiği	152
Şekil 9.62. A1-1,7c numunesinde yapılan düşümlere ait kuvvet-zaman grafikleri	154
Şekil 9.63. A1-1,7c numunesinde yapılan son düşüme ait ivme-zaman grafiği	155
Şekil 9.64. A1-1,7c numunesinin 5. düşümüne ait hız ve deplasman-zaman grafiği	155
Şekil 9.65. K1-1,7c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	157
Şekil 9.66. K1-1,7c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği	157
Şekil 9.67. K1-1,7c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	158
Şekil 9.68. B1-1,7c numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	159
Şekil 9.69. B1-1,7c numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği	160
Şekil 9.70. B1-1,7c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	160
Şekil 9.71. A1-2a numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	162
Şekil 9.72. A1-2a numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği	162
Şekil 9.73. A1-2a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	163
Şekil 9.74. K1-2a D9b numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	164
Şekil 9.75. K1-2a D9b numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği	164
Şekil 9.76. K1-2a D9b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	165
Şekil 9.77. K1-2a D9c numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	166
Şekil 9.78. K1-2a D9c numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği	166
Şekil 9.79. K1-2a D9c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	167
Şekil 9.80. B1-2a numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	168

Şekil	Sayfa
Şekil 9.81. B1-2a numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği.....	169
Şekil 9.82. B1-2a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	169
Şekil 9.83. A1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	171
Şekil 9.84. A1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği.....	171
Şekil 9.85. A1-2b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği.....	172
Şekil 9.86. K1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği.....	173
Şekil 9.87. K1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği.....	174
Şekil 9.88. K1-2b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği.....	175
Şekil 9.89. B1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	176
Şekil 9.90. B1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği	177
Şekil 9.91. B1-2b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	177
Şekil 9.92. A1-2c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği.....	179
Şekil 9.93. A1-2c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği	179
Şekil 9.94. A1-2c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	180
Şekil 9.95. K1-2c numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği	181
Şekil 9.96. K1-2c numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği	182
Şekil 9.97. K1-2c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	182
Şekil 9.98. B1-2c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği.....	183
Şekil 9.99. B1-2c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği.....	184
Şekil 9.100. B1-2c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	184
Şekil 9.101. D9b referans numunesine ait kuvvet-zaman grafiği.....	186
Şekil 9.102. D9b referans numunesine ait ivme-zaman grafiği.....	186

Şekil	Sayfa
Şekil 9.103. D9b referans numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği	187
Şekil 9.104. 0,38 cm çentik açılmış kare prizma numunelerin uygunluk eğrisi.....	188
Şekil 9.105. 0,75 cm çentik açılmış kare prizma numunelerin uygunluk eğrisi.....	189
Şekil 9.106. Kare prizma numunelerde çentiksiz olanların uygunluk eğrisi	189
Şekil 9.107. 0,75 cm çentik açılmış diğer prizmatik numunelerin uygunluk eğrisi	190
Şekil 9.108. 1-1 kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	193
Şekil 9.109. 1-1,5a kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	193
Şekil 9.110. 1-1,5b kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	194
Şekil 9.111. 1-1,5c kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	194
Şekil 9.112. 1-1,7a kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	195
Şekil 9.113. 1-1,7b kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	195
Şekil 9.114. 1-1,7c kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	196
Şekil 9.115. 1-2a kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	196
Şekil 9.116. 1-2b kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	197
Şekil 9.117. 1-2c kodlu numunelere ait enerji deplasman grafiği	197

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Dart-Impact deney aleti	11
Resim 2.2. Ağırlık Düşürme Çarpma Deney Makinesi.....	11
Resim 5.1. Geleneksel beton ve mikro beton karışımların mikroskopik görüntüsü	59
Resim 8.1. Pirinç vidanın yatay ve düşey görünümü.....	84
Resim 8.2. 1-PCB Dinamik yük-ölçer, 2-PCB İvme-ölçer, 3-İvme-ölçer adaptörleri ..	85
Resim 8.3. Mesnetleme aparatının makine bünyesindeki üst ve alt görünümü	85
Resim 8.4. Deney düzeneğinin konuşlanması	87
Resim 8.5. 3 mm et kalınlıklı neopren kauçuk malzemeye ait görüntü	88
Resim 8.6. Çimsa SüperBeyaz – CEM I 52,5 R Beyaz Portland Çimentosu	92
Resim 8.7. Deneylerde kullanılan kireçtaşı, andezit ve bazalt yapay agregalar	96
Resim 8.8. Eğilme deneylerinde kullanılan test cihazı	98
Resim 8.9. Standart küp basınç deneyi.....	100
Resim 8.10. Basınç deneyi sonrası beton küp numune	100
Resim 9.1. A1-1 numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	109
Resim 9.2. K1-1 numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	112
Resim 9.3. B1-1 numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	114
Resim 9.4. A1-1,5a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	116
Resim 9.5. K1-1,5a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	119
Resim 9.6. B1-1,5a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	121
Resim 9.7. A1-1,5b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi	124
Resim 9.8. K1-1,5b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi	126
Resim 9.9. B1-1,5b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	129
Resim 9.10. A1-1,5c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	132

Resim	Sayfa
Resim 9.11. K1-1,5c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	134
Resim 9.12. B1-1,5c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	137
Resim 9.13. A1-1,7a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	140
Resim 9.14. K1-1,7a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	142
Resim 9.15. B1-1,7a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	145
Resim 9.16. A1-1,7b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi ...	147
Resim 9.17. K1-1,7b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi ...	150
Resim 9.18. B1-1,7b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	153
Resim 9.19. A1-1,7c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	156
Resim 9.20. K1-1,7c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	158
Resim 9.21. B1-1,7c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi....	161
Resim 9.22. A1-2a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	163
Resim 9.23. K1-2a D9b numunesinin kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi...	165
Resim 9.24. K1-2a D9c numunesinin kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi ...	167
Resim 9.25. B1-2a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	170
Resim 9.26. A1-2b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi	173
Resim 9.27. K1-2b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi	175
Resim 9.28. B1-2b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	178
Resim 9.29. A1-2c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	180
Resim 9.30. K1-2c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	183
Resim 9.31. B1-2c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi.....	185
Resim 9.32. D9b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi	187
Resim 9.33. 2,5x2,5x10 cm ³ 'lük giriş numunelerine ait kırılma sonrası görüntüsü	191
Resim 9.34. 2x5x15 cm ³ 'lük numunelerin örnek üç noktalı eğilme deneyi görüntüsü..	192

Resim**Sayfa**

Resim 9.35. 0,75 cm çentikli 2x5x15 cm³ D3 kodlu numunenin kırılmış görüntüsü 192



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

a	Eliptik boşluğun bir boyutu
A_{lig}	Kirişe çentik açıldıktan sonraki etkin alan
A°	Angstrom
°	Açı bildirir derece
b	Eliptik boşluğun bir boyutu
b	Kirişin bir boyutu
C°	Santigrat derece
c	Dalga oluşum hızı
cm²	santimetre kare
d	Yay sıkışma mesafesi
E	Elastisite modülü
E	Genel olarak enerji
ε	Epsilon-birim şekil değiştirme
ε_v	Hacimsel gerinim oranı
ε_{vmin}	Minimum hacimsel gerinim oranı
f_c	Beton basınç dayanımı
Ø	Çap gösterir simge
g	Yer çekimi ivmesi
G	Çatlağın ilerlemesiyle serbest kalan gerinim enerjisi
G_F	Kırılma enerjisi
Γ	Toplam enerji
h	Yükseklik
kg	kilogram
kN	Kilonewton
k	Yay rijitlik sabiti
K	Gerilme yoğunluk faktörü

Simgeler**Açıklamalar**

K_{IC}	Kritik gerilme şiddet çarpanı
l	Kiriş açıklığı
MPa	Megapaskal
ml	Mililitre
mm	Milimetre
mm²	Milimetre kare
N	Newton
P_{ort}	Ortalama basınç dayanımı
q	Çatlak etrafında üniform dağılan gerilme
ρ	Kütle yoğunluğu
s	Saniye
Σ	Toplam İşareti
σ	Normal Gerilme
σ_e	Eğilme dayanımı
σ_m	Eliptik boşluk çevresindeki maksimum gerilme
σ_N	Nominal dayanım
σ₀	Basınç gerilmesi
σ_y	Akma dayanımı
τ	Kayma gerilmesi
U	Genel olarak toplam enerji
u	Birim zamanda birim yer değiştirme miktarı
V, v	Hız
W	Sonsuz levhanın genişliği
W₀	Yük-deplasman eğrisi altında kalan alan
w_c	Kritik çatlak ucu açılması sabiti
W/C	Su/çimento oranı
δ₀	Kirişin göçme anındaki deformasyonu
x	Genel olarak mesafe

Kısaltmalar**Açıklamalar****ASTM**

Amerikan Society For Testing Materials

COD

Çatlak açılması

CTOD

Çatlak ucu açılması

ÇUA

Çatlak ucu açılması

EPKM

Elasto-Plastik Kırılma Mekanîği

FRP

Fiber-Reinforced Polymer

LEKM

Lineer Elastik Kırılma Mekanîği

MB

Mikro beton

SHORE

Kauçuk malzeme sertlik birimi

SHPB

Split-Hopkinson Basınç Çıtası

UYDB

Ultra Yüksek Dayanımlı Beton

1. GİRİŞ

Malzeme biliminde, bir malzemenin dayanımı; uygulanan bir yük altında göçmeksizin veya plastik deformasyon göstererek dayanma yeteneğidir. Uygulanan yükler, eksenal (çekme veya basınç) veya kesme (kayma dayanımı) olabilmektedir. Mekanik bir elemanın bünyesinde gelişen gerilme ve şekil değiştirmeler, o elemanın yük taşıma kapasitesinin bulunabilmesi için hesaplanmalıdır. Hesaplanan gerilmeler malzemenin akma ve kopma dayanımı gibi dayanımlar hakkında bir dereceye kadar karşılaştırılabilir. Malzemenin gösterdiği deplasman ise elemanın kullanılacağı alana ve servis koşullarına göre değerlendirilir. Elemanın hesaplanan kütle ve rijitlik dağılımı malzemenin dinamik tepkisinin hesaplanmasında ve böylece akustik çevre ortamında kullanılması hakkında fikir vermektedir.

Genel olarak 3 yükleme tipinden bahsedilmektedir:

1. Enine Yükleme: Kuvvetler, elemanın boyuna eksenine dik olarak uygulanır. Elemanın orijinal durumuna göre eğilmesi ve deplasman göstermesine neden olarak içsel basınç ve çekme birim şekil değiştirmeleri etkisinde eğriselliğinde değişme meydana gelir. Enine yükleme, aynı zamanda, kayma kuvvetleri oluşturarak kayma deformasyonu meydana getirir ve malzemenin kayma deformasyonu giderek artar [1].
2. Eksenal Yükleme: Uygulanan Kuvvetler, elemanın boyuna eksenine aynı doğrultudadır. Elemanda uzama veya kısalma meydana gelir [1].
3. Burulma Yükleme: Burulma etkisi, birbirine eşit ters yönde ancak paralel düzlemlerde uygulanan bir kuvvet çiftinden meydana gelir.

Malzemelerin Mekanik Özellikleri [2] şunlarla tanımlanır:

Akma Dayanımı: Bir malzemede kalıcı deformasyon yaratan en küçük gerilmedir. Bazı malzemelerde akma dayanımını tespit etmek çok zordur. Bu yüzden, genellikle 0.2% plastik deformasyon oluşturan gerilme olarak tanımlanmaktadır [1].

Basınç Dayanımı: Göçme durumundaki malzemenin nihai basınç gerilmesidir. Bu göçme, sünek göçme(teorik sonsuz akma) veya gevrek göçme(zayıf düzlemler arasında ani kayma veya çatlak gelişimi sonucunda) olarak sınıflandırılabilir.

Çekme Dayanımı: Göçme durumundaki malzemenin nihai çekme gerilmesidir. Bu göçme, sünek göçme(ilk akma anındaki göçme olabileceği gibi, bazı malzemelerde boyun vererek

ikincil göçme evresi) veya gevrek göçme(düşük hızda yükleme altında birden çok parçaya ayrılarak aniden göçme) olarak sınıflandırılır.

Yorulma Dayanımı: Tekrarlı Yükleme altındaki elemanın dayanımıdır ve statik dayanımlara göre elde etmesi çok daha zordur. Göçmeye kadar ki gerilme silsilelerinden maksimum ve minimum arasındaki fark olarak belirlenir [1].

Çarpma Dayanımı: Ani uygulanan bir yüke malzemenin dayanabilmesidir ve enerji cinsinden ifade edilir. Hacim, elastisite modülü, kuvvet dağılımı ve akma dayanımı malzemenin çarpma dayanımını etkilemektedir. Bir malzemenin çarpma dayanımının yüksek olabilmesi için gerilmelerin numune boyunca üniform dağılması gerekmektedir. Aynı zamanda büyük hacme, düşük elastisite modülüne ve yüksek akma dayanımına sahip olmalıdır [1].

Anlaşıldığı üzere, malzemenin dayanımı malzemenin kendi bünyesinden kaynaklanan özelliklere bağlı olduğu gibi yükleme şekline, test yöntemine ve yükleme hızına bağlı değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle beton gibi bazı inşaat malzemelerinin davranışı yükleme hızına göre hassasiyet göstermektedir [3]. Bu hassasiyet, malzemenin molekülleri arasında sahip olduğu kimyasal bağların koparılması için gerekli enerjiye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [4]. Ani darbelerin etkilerine karşı dayanıklılığı ölçmek amacıyla statik yüklemelerden çok farklı davranış gösterdiği ortaya çıkan malzemelerin dinamik yükler altında incelenmesi gerekmektedir [5]. Ani yükler altında, bir malzemenin hasara ne kadar dayandığı o malzemenin çarpma dayanımı olarak adlandırılır [6].

Yükleme hızı yavaşladıkça, malzemenin gösterdiği tepki daha az olmaktadır; yükleme hızı arttığında malzemenin moleküler boyutta gevşeme zamanı bulamadığından, akışkan olmasına karşın suyun belirli bir yükseklikten sonra beton etkisi göstermesinde olduğu gibi, bütünsel davranmakta ve gösterdiği direnç daha fazla olmaktadır [4,7,8]. Malzemede çatlak oluşturmak için belirli bir enerji gerekiyorken, göçme yaratmak için ise daha fazla enerji gerekmektedir. Malzemenin kırılmadan hemen önce yuttuğu enerji miktarına karşılık gelen tokluk önemli bir parametredir. Bir başka deyişle malzemenin kırılması için gerekli olan enerji miktarıdır [6]. Yani, malzemenin tokluğu arttıkça ani çarpma kuvvetiyle yutması gereken enerji miktarı artar [9]. Özellikle bu ani etkiler, magnitudü büyük olan depremler (Fukushima depremi ve tsunami), ağır makine titreşimleri, kaya düşmeleri veya hızlı trafik kazaları; çağımızın, Dünya'nın ve ülkelerin önemli sorunlarından biri olan teröre karşı özellikle intihar saldırıları, füze saldırıları gibi sorunlar sayılabilir.

Ani darbelerin etkilerine karşı dayanıklılığı ölçmek amacıyla statik yüklemelerden çok farklı davranış gösterdiği ortaya çıkan malzemelerin dinamik yükler altında incelenmesi gerekmektedir [5]. Bir malzemenin hasara ne kadar dayandığı o malzemenin çarpma dayanımı olarak adlandırılır [6]. Yüksek hızlı çarpmada cismin kırıldığı anda absorbe ettiği enerji çarpma deneyleriyle ölçülür [9]. Dolayısıyla numunelerin çarpma sırasında absorbe ettiği enerji miktarı da incelenecektir. Çarpma dayanımı genellikle tokluk olarak isimlendirilir [6]. Malzemenin kırılmadan hemen önce yuttuğu enerji miktarına karşılık gelen tokluk önemli bir parametredir. Bir başka deyişle kırılması için gerekli olan enerji miktarıdır [6]. Yani, malzemenin tokluğu arttıkça ani çarpma kuvvetiyle yutması gereken enerji miktarı artar. Çarpma Dayanımı özellikle çevrede kullanılan dış etkilere açık veya önem katsayısı büyük yapılar için önem taşımaktadır [10]. Örneğin, Nükleer Enerji Santralleri, Yüksek Performans Beklenen Bütün Köprüler, Demiryolları Sanat Yapıları, Yüksek Dayanımlı Beton Kullanılan Çevre Yapıları(Kaldırımlar, Limanlar, Gökdenler, Devlet Binaları, İstasyonlar), Öngerilmeli Kaya Koruyucular [11]...

Yıllar süren çalışmalar sonucunda geliştirilen Çarpma Deney Aletleri şu başlıklarla incelenebilir:

1. Charpy-Izod Deney Aletleri
2. Dart-Impact Deney Aleti
3. Ağırlık Düşürme Deney Aletleri
4. Raylı-Tabancalı (Balistik) Deney Aletleri [6, 9]

Bu deneylerle, kullanıcı dostu yeni uygulamaların, yapılarda kullanılan yeni malzemelerin değerlendirilmesi sağlanmakla birlikte başlangıç ve yapı ömrü maliyetlerini düşürmek amaçlanmaktadır [10]. Ayrıca; teçhizatlanış, kuvvetin daha doğru ölçülebilmesine izin verir [6, 12]. Ancak, şimdiye kadar geliştirilen düşük hızlı çarpma deney yöntemleri, anizotropik malzemeler için uygun sonuçlar vermemektedir [9]. Anizotropik malzemeler için balistik yöntem çoğunlukla ardıl çarpma deney yöntemleriyle birlikte uygulanır [9]. Ancak, balistik deney aparatlarının kurulumu, kullanımı uygulamada kolay olmayıp maliyetlidir [9, 12]. Bu nedenle, ardıl çarpma test yöntemleri uygulanması daha etkili olsa da yeni deney yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [12, 13]. Bu açıdan, özellikle karşılaşılan sorunlar çarpan mekanizmalarda tek seferde yeterli enerji üretilememesine bağlı olarak tekrarlı çarpma deneylerinin uygulanması veya çarpan mekanizmaya malzemenin gösterdiği tepkiden dolayı geri tepme ve veri eldesi için tepkime zamanı

sırasında sürtünmelerden kaynaklı kaybedilen enerji sonucunda gerçek sonuçların elde edilememesi, yeni deney cihazlarının geliştirilmesine ihtiyaç yaratmaktadır [5, 10].

Bu çalışmada, değişken doğrultuda ve geometride yapay agregaya sahip yüksek dayanımlı betonların davranışı ve kırılma mekanizması incelenmiştir. İncelenecek beton numuneler yüksek kiriş elemanların ara kesitleri gibi modellenerek tasarlanmıştır. Kullanılan beton numunelerin kesitleri ince cidarlı olduğundan ve çarpma dayanımları konusunda yeni deney yöntemlerine ihtiyaç duyulduğundan özgün bir makine tasarlanarak, bu yeni deney cihazında deneyler yapılmıştır. Üretilen beton numunelerde, 4 farklı geometriye sahip 3 farklı doğrultuda ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) ve 3 farklı petrografide yapay agregası (kireç taşı, andezit ve bazalt) kullanılmış ve bu agregalar numunelerin köşegenlerinin tam merkezine yerleştirilerek toplamda 30 adet çift çentikli şerit beton numune elde edilmiştir. Ayrıca, deneylerde referans amaçlı 3 adet yapay agregasız numune daha hazırlanmıştır. Kirişler için su/çimento oranı 0,20 olup yüksek mukavemetli beton (28 günlük $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ küp numune dayanımları, P_{ort} : 150 mPa) elde edilmiştir ve numunelerin tamamında bu beton özdeş olarak kullanılmıştır. Beton dayanımının kireç taşı ve bazalt dayanımlarının arasında kalması (Andezit için P_{ort} : 78,2 mPa ve Bazalt için P_{ort} : 165,5 mPa, Kireçtaşı için P_{ort} : 55 mPa) istenerek betonun agregadan hem zayıf hem de güçlü olması durumundaki kırılma mekanizmasının görülmesi hedeflenmiştir [112]. Tüm şerit beton numunelerinin boyutları prizmatik olarak $100 \times 400 \times 20 \text{ mm}^3$ boyutlarında olup genişliklerinin yarısından olmak üzere karşılıklı 1,5 cm derinliğinde 3mm kalınlığında çentikler açılmıştır. Bu deneylerle, üretilen numunelerin çarpma etkisi altındaki performansı incelenmiş, agregası ve beton ara yüzeyindeki kırılma çatlaklarının yörüngeleri izlenmiştir.

2. ÇARPMA ETKİSİ

2.1. Çarpma Deneylerinin Tarihsel Gelişimi

İki cisim çarpışınca, mutlaka biri veya ikisi birden hasar görür. Malzemenin hasara ne kadar iyi dayandığı o cismin çarpma dayanımı olarak adlandırılır. Yüksek hızlı çarpma altındaki bir çarpma deneyiyle cismin çatladığında veya kırıldığında ne kadar enerji absorbe ettiği ölçülür.

2.1.1. 1800-1895 arasında

İlk teorik tartışma 1824'te Tredgold tarafından demiryolu raylarına yönelik olarak ani darbelerin etkilerine karşı dayanıklılığı ölçmek amacıyla ortaya atıldı. Statik yüklemelerden çok farklı davranış gösterdiği ortaya çıkan malzemelerin çekme dayanımları da dinamik yüklere karşı yeterince bilgi içermiyordu. Örneğin, Statik yükleme koşullarıyla karşılaştırıldığında sünek malzeme olan çelik, çarpma etkisinde gevrek davranır. Bu yüzden karşılaştırılabilir veriler elde edebilmek için yeni bir mekanizma tasarımına yönelindi.

1849'da bu amaçla 30 yıl boyunca çalışacak olan İngiliz Kraliyet Komisyonu kuruldu ve Captain Rodman Ağırlık düşürme makinesi icat etti. Deney gevrek malzemeler için olumlu sonuçlar verse de sünek malzemelerde kırılmasız eğilmeye neden oldu. 1892'de LeChatalier malzemeleri çentikli numuneler şeklinde deneye tabii tutmayı önerdi. Ancak, hâlâ bu deney süreçlerinin geliştirilmeye ihtiyacı vardı [10].

2.1.2. 1895-1922 arasında

Bu periyotta uluslar arası ve yerel standartlar mevcuda getirilmeye uğraşıldı. 1898'de ASTM(Amerikan Deney ve Malzeme Topluluğu) 1901'de IATM(Uluslararası Malzeme Deneyi Kurumu) kurulduktan sonra 1902'de ASTM'nin kuruluşundan sadece 4 yıl geçmişken “Çarpma Deneyleri Üzerine Genel Bilgiler” adıyla bir kaynak dizini yayınlandı. Bu dizinden sonra, 100 yeni daha makale Birleşik Devletler'de, Fransa ve Almanya'da yayınlanarak çarpma deneyleri ile daha çok ilgilenildi. Bu makalelerin büyük bir kısmı IATM'de de değerlendirilmiştir. Bunların arasında en dikkat çeken 1898'de numune ister

kırılsın ister değişmeden kalsın çarpma deneylerinden daha çok veriler elde edilebileceğini bahsederek sarkaçlı deney aletini ilk geliştiren Russel oldu. Farklı yükleme şartları altında inşaat malzemelerine yönelik olarak 700’den fazla test uygulayarak farklı servis yükleri altında yük hızına bağlı olarak numunelerin çarpma sırasında absorbe ettiği enerjiyi ortaya koyan, sürtünme kayıpları düzeltmeleri, vuruş ve ağırlık merkezi karşılaştırmaları ve hesaplamaları da içeren değerli bir yayın hazırlamıştı. Böylece, Russel’in bu yayınıyla son yüzyılda, deney makinesi teknolojisinin gelişmesi açısından önemli bir nirengi noktası teşkil etti [10].

IATM 22. Komisyonu, çarpma deneylerinde bazı eksiklikler barındırdığını özellikle bugünün standartlarıyla karşılaştırıldığında ilan etse de elde edilen ilk raporlar ve geliştirilen aletler malzemelerin çarpma davranışlarını hakkında önemli faktörlerin elde edilmesine yardımcı oldu. Fransa, altyapı mühendisliğiyle çarpma deneylerini ilk uyarlayan ülke oldu. 1901-1912 arasındaki IATM konferanslarında Fransız araştırmacılar öncü oldular. Charpy, çarpma deney metodu ve prosedürünü başlama ve bitiş yüksekliğiyle numunenin göçmesi arasında bağıntılar kurarak standartlaştırmaya çalıştı ve Brüksel’de IATM bünyesinde 1906’da Charpy; çarpma deneyleri kürsü başkanı oldu. 1901’de Charpy “metalin gevrekliği hakkında nümerik değer” adıyla yayın yaparak Russel’in deney aletini uzun süren dinamik uğraşlardan sonra standardize etmeye çalıştı ve bu yüzden deney Charpy’nin ismiyle anılmaya başlandı. 1907’de Almanya’da ilk Ehrensberger’in adım atmasıyla çarpma deney aletlerine yönelik çalışmalar başlatıldı. Üreticiler, ağırlık düşürme, sarkaçlı ve volanlı deney makineleri önerdiler. Bu period, numune konfigürasyonu ve boyutuyla ilgili bugünkü kullandığımız yaklaşımların elde edilmesini içermekteydi. Sonraları deney numuneleri, “u” çentik ve “v” çentik olmak üzere modifiye edildi [9,10]. Bununla birlikte, numune boyutlarının küçültülmeye çalışılması daha düşük maliyetli deney aletleri üretilmesine yol açtı. Ayrıca, büyük numuneler üretmek için ekstra çaba harcamaya gerek kalmadı. Numune boyutlarının yanı sıra, Komisyon çarpma prosedürüyle ilgili başka standartlar da getirdi [10].

- a) Şahmerdanın çarpma hız limitleri
- b) Titreşim kayıplarını minimize etmek için rijit montaj
- c) Şahmerdan mili ve boyutuyla ilgili minimum oran
- d) Geniş uçlu şahmerdanın etrafından deformasyon gösteren sünek malzemelerde yapay enerji yutmasıyla ilgili aralıklar

Sonuçta, 1912’de yayınlanan bir raporla çelik üreticiler çarpma etkisine karşı daha az gevrek malzeme üretimiyle ilgili fikir edindiler [10].

2.1.3. 1922-1933 arasında (ASTM E 23 standardının geliştirilmesi)

1922’de “Malzemeler için Çarpma Deneyleri” başlıklı sempozyumda ASTM E-1 Komitesi New Jersey- Atlantic City’de 25. Yıllık Toplantısını yürütmekteydi. Bu sempozyumda özellikle İngiliz Mühendislik Standartları Kurumunun çalışmaları özellikle ele alındı. 23 sorumlu araştırmaya yönelik olarak deney makineleri, numune boyutları ve test prosedürleriyle ilgili detaylı bilgiler elde etmeyi önerdiler. Böylece, çarpma deneyleriyle ilgili ilk ASTM standardı üretmek için adım atılmış oldu. 1923’te araştırmalar baz alınarak sarkaçlı deney aletleri için ilk standart geliştirilmeye başlandı. 1933’e kadar süren çalışmalar sonucunda ASTM E 23-33T (Tentative=Deneme) geliştirildi. Bu standartla iki türlü numune Charpy test ve Izod test göz önüne alınmıştır. Çarpıcının geometrisini ön görmese de çentikli numuneler kullanılması gerektiği belirtildi. Komite, deney sonuçlarını etkileyen bir çok detaya ve kısıtlara yer verdiyse de yeterince veritabanı olmadığından tolerans ve öneri içermiyordu. Daha çok verim ilişkileri, malzemeler arası karşılaştırmalar ve tartışmalardan oluşmaktaydı. Değişkenler anlaşıldıkça 1934-1940 arasında ASTM E23 düzenlenmiştir [10].

2.1.4. 1940-1948 arasında

Çarpma deneyi malzemenin değerlendirilmesinde yararlı bir teknik olarak kendini daha çok göstermeye başlamıştır. Sünekten Gevrekliğe geçen çelik malzemeler için önemi anlaşılan kadar yaygın bir gereklilik değildi. Muhtemelen, 2. Dünya Savaşı sırasında gemi kazalarından sonra çarpma deneyi üretim standartları ve malzeme özelliklerinin anlaşılmasına yönelik uygulanmaya başlandı. 1942-1946 arasındaki onarım gerektiren 970 kaza, çarpma şiddeti ve savaş sırasındaki zaman yokluğu detaylı rapolarına yapılmasını engellese de malzemelerin hızlı bir şekilde çarpmaya karşı iyileştirilmesi gerekiyordu. Savaştan sonra bu yapısal sorunlara karşı kimyasal deneyler, mikroskopik araştırmalar ve çekme deneyleri uygulandı. Charpy çarpma deneyleriyle kırılma düzlemine göre ince malzemeler üretildi [10].

2.1.5. 1948'den günümüze

1964'te ASTM E23 revize edildiğinde ilk test parametreleri ve değişkenleri daha iyi bilinmekteydi. 1961'deki makalesinde Fahey, çarpma deneylerini etkileyen hataları şu maddelerde özetlemiştir [10]:

1. Makinenin hatalı kurulumu
2. Çarpma milinin ve başlığının düzensiz boyutları
3. Hareket eden parçalarda aşırı sürtünme
4. Öpüşen parçalarda aşınma
5. Kenar Mesnetler ve deney numunesi arasındaki yetersiz temizlik
6. Kötü hazırlanmış-işlenmiş numuneler
7. Uygunsuz soğutma ve deneye tabii tutma şeklinde sıralamıştır. ASTM E23'te bu değişkenler ve makine toleransları adres gösterilmişse de Charpy Çarpma Deney aleti için en önemli gereklilik numuneleri standardize etmektir [10].

Driscoll'un deney makineleri üzerine yaptığı verimlilik çalışmaları gösterdi ki deneylerde kullanılan makinelerin %44'ü izin verilen limitler dışında sonuçlar sağlamaktaydı. Tespit edilen bu tür makineler emekliye ayrıldı. ASTM E23 kapsamındaki çok düşük enerjili çarpma deneyleri kategorisinde diğer tüm makinelerin %100 verimlilikle dünyada kabul edilebilir en iyi tartışılır çarpma deney aletlerinden olduğu kabul edilmektedir. Bunun dışında, uluslararası *ISO Standart R 442:1965* ve *JIS Z2242* japon standardı (Metalik malzemeler için Çarpma Deneyleri) gibi standartlar da yayımlanmıştır [10].

2.1.6. Bugünkü uygulamalar

Nükleer santraller

Nükleer enerji santralinin kullanım ömrü boyunca kırılma tokluğu ölçülemeyeceğinden Charpy ve çekme numuneleri araştırmaları önem kazanmıştır. Bu araştırmalar sayesinde Nükleer Enerji Santrali yatırımında harcanan günlük 300.000 ila 500.000 \$ arasında tasarruf sağlandığı sonucuna varılmıştır. Eğer, Charpy verileri Nükleer Enerji Santralinin ömrünü uzatmak amacıyla kullanılırsa başlangıç tasarımı hariç olmak üzere yıllık 150 milyon dolarlık kazanç sağlanabilmektedir [10].

Günümüzde hala çelik numunelerle ilgili olarak geçmiş yüzyıla göre geliştirme çabaları devam etmektedir [10]. Bu çalışmalar, özellikle testin minyatürize edilmesi, şahmerdanın teçhizatlandırılarak ilave bilgiler elde edilmesi ve düzlemsel gerinimli kırılma tokluğunun elde edilmesine yarayacak yeni mekanik modeller geliştirilmesi gibi alanlar üzerinde yoğunlaşarak önümüzdeki yüzyılda devam edecektir.

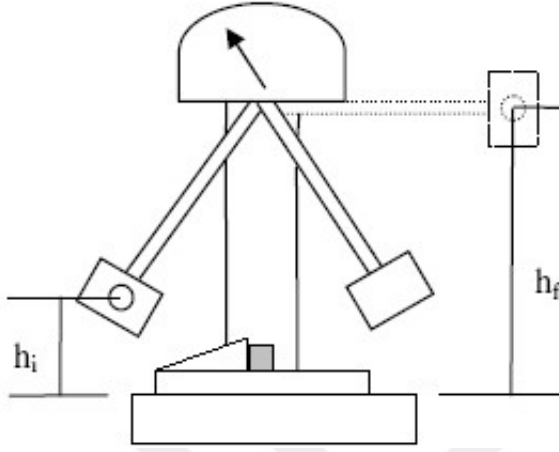
2.2. Çarpma Deneylerinde Kullanılan Deney Cihazları

Bütün bu deney cihazlarıyla birlikte yüksek hızlı kamera da kurularak kullanılabilir. Betona çarpma deneyi uygulandığında ise yetersiz hızdaki veri elde etme sistemleri, yükleme çerçevesindeki titreşimler ve sensörlerdeki rezonanslar sorun yaratmaktadır. Çarpma deneyleri genelde yatay ve düşey yönde olmak üzere iki türde olabilmektedir [12]. Bunların dışında Çarpma Deneyleri deney hızına göre, yüksek hızlı ve düşük hızlı da olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Charpy Deney Yöntemi ve Ağırlık Düşürme Deney Yöntemleri düşük hızlı çarpma deney yöntemi sınıfına girerken Raylı-Tabancalı veya Balistik Deney Yöntemleri yüksek hızlı çarpma deney yöntemine girmektedir. Çoğunlukla, yüksek hızlı çarpma deney yöntemini kullanmak elde edilen ölçüm sinyallerinin ölçüm gürültüsünden arınmış bir şekilde elde edilmesi açısından bir gereklilik taşımaktadır.

2.2.1. Charpy-Izod deney aleti

Gerilmenin yoğunlaştırılmasını sağlayan çentik açılarak önceden belirlenmiş kırılma bölgesine sahip düzgün dikdörtgen bir numuneye ağırlığı bilinen sarkaçlı bir çekicinin önceden belirlenen bir yükseklikten çarptırılma esasına dayanır. Potansiyel Enerji kinetik enerjiye dönüştürülerek yüksek çarpma enerjileri elde edilir. Ucuz ve kolay bir yöntemdir. İstenilen yüksekten sarkacın bırakılması dolayısıyla istenen enerji ayarlanabilir. Ancak, Charpy Deney Aletleri, düşük enerjili test yöntemidir. Sarkaçlı vurucu, kendine özgü kısıtlar taşımaktadır. Özellikle, sürtünme kayıpları ve yüksek enerji elde edilememesi önemli problemlerdir. Ayrıca, Beton için charpy deneyi numune boyutları açısından kısıtlılık taşımaktadır [6,9]. Charpy Deney Yöntemi araştırmacının çok miktarda deney sonucu elde etmesini sağlayacak kadar kolay ve hızlıdır. Her ne kadar kendi kapsamında basit bir yöntem olsa da derinlemesine sonuçlar ortaya çıkarmaz, numuneler hakkında karşılaştırılabilir geniş bilgiler elde edilemez [9]. Charpy Deney aletinde test edilen numuneler genellikle tek doğrultuda çentik açılmış dikdörtgensel kesitli numunelerdir ve

eğilme deneylerinde olduğu gibi mesnetlenmektedir. Ancak, Izod Deney yöntemi için, numune Charpy deney aletine düşey pozisyonda ankastre mesnetlenecek şekilde yerleştirilir.



Şekil 2.1. Charpy-Izod deney aleti şeması [13]

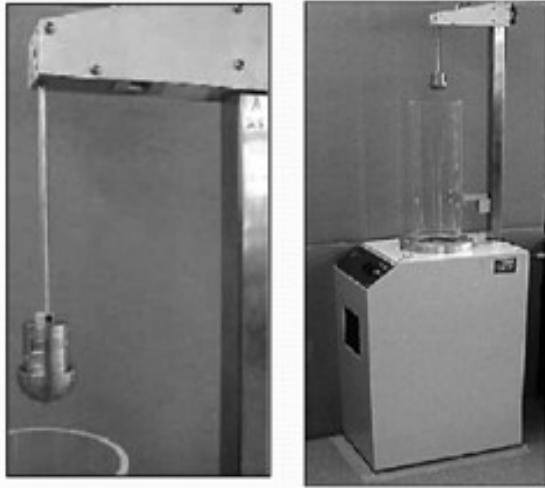
$$\Gamma = mg (h_f - h_i) \quad (2.1)$$

$$V = \sqrt{2gh} \quad (2.2)$$

Γ , toplam enerjiyi; m , kütleyi; g , yer çekimi ivmesini; h , iki yükseklik arasındaki fark ve h_f , başlangıç yüksekliğini; h_i , bitiş yüksekliğini göstermektedir.

2.2.2. Dart-Impact deney aleti

Bir Çarpma şahmerdanının belli bir yükseklikten (genellikle düşük yüksekliklerden) üzerinde isteğe bağlı arttırılabilir ağırlıklarla bırakılarak çekiçleme esasına dayalı deney yöntemidir. Pnömotik tablaya yerleştirilen numunenin merkezine kulede asılı şahmerdanın çarptırılmasıyla daha çok plastik filmler için test sonuçları elde edilir [6]. Ancak, gerçek çarpma deney yükünün bulunması, “Bruceton Merdiveni Deney Yöntemi”yle her numune için 20-25 kezde hassas bir şekilde elde edilir. İkincil çarpma önlenerek, matematiksel istatistik hesapları yardımıyla net sonuca varılır.



Resim 2.1. Dart-Impact deney aleti [6]

2.2.3. Ağırlık düşürme aletleri

Yörünge eksenleri boyunca hareket eden değiştirilebilir ağırlığın serbest düşme veya başlangıç hızı belirlenerek numuneye çarptırılması esasına dayanır [6, 9]. Gerçek hayattaki senaryolara yakın sonuçlar elde edilebilir. Ağırlık-düşürme deneyi ise geri tepme ve ilk vuruşta kırma ihtimaline karşı enerji kayıpları açısından dezavantajlıdır [9]. Özellikle Kütle bir miktar arttırılabilmekte, belli kapasiteden sonra arttırılamamaktadır. Bunların dışında, yüksekliğin de kullanılan cihazların özelliklerine ve bulunduğu ortamın fiziki şartlarına göre arttırılması kısıtlıdır. *Şekil değiştirme hızları konvansiyonel servo-hidrolik deney makineleri olduğundan maksimum 10^{-4} - 1 s^{-1} arasında olmaktadır* [115]. Yük düşümleri, çatlak başlangıcı gelişene kadar devam ettirilir. Çıplak gözle görülebilen veya nadiren çıplak gözle gözlemlenebilen çatlaklar oluşturarak deneye tabii tutulan malzemeye hasar verilebilir. Bu deneyler için geliştirilen standart ASTM D 5628'dir.



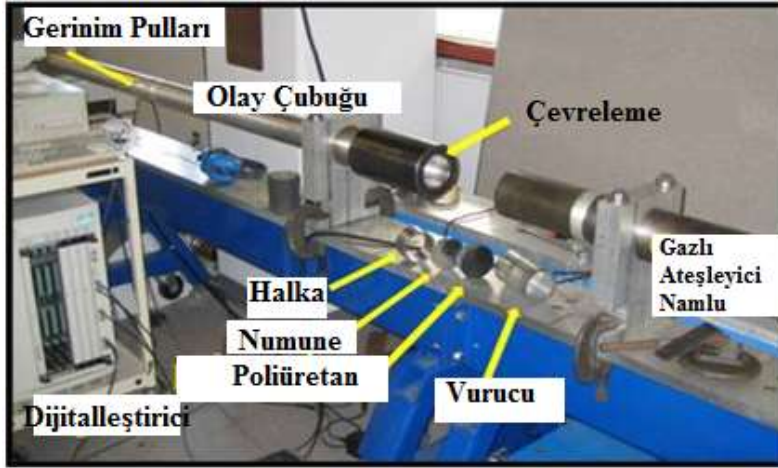
Resim 2.2. Ağırlık-Düşürme çarpma deney makinesi [6]

2.2.4. Raylı-Tabancalı (balistik) deney aletleri

Yüksek Hızlı Deney yöntemlerini barındıran bu aletler 400-2000 m/s aralığında değişen hızlarda hareket eden çarpan mekanizmalarla karakterize edilmektedir. Yüksek hızlı çarpma deneylerinde düşük hızlı çarpma deneylerine göre malzemenin bütününden ziyade bölgesel gösterdiği tepkiler kayda değer olup bu yüzden geometrik kısıtlar daha az önem taşımaktadır [9].

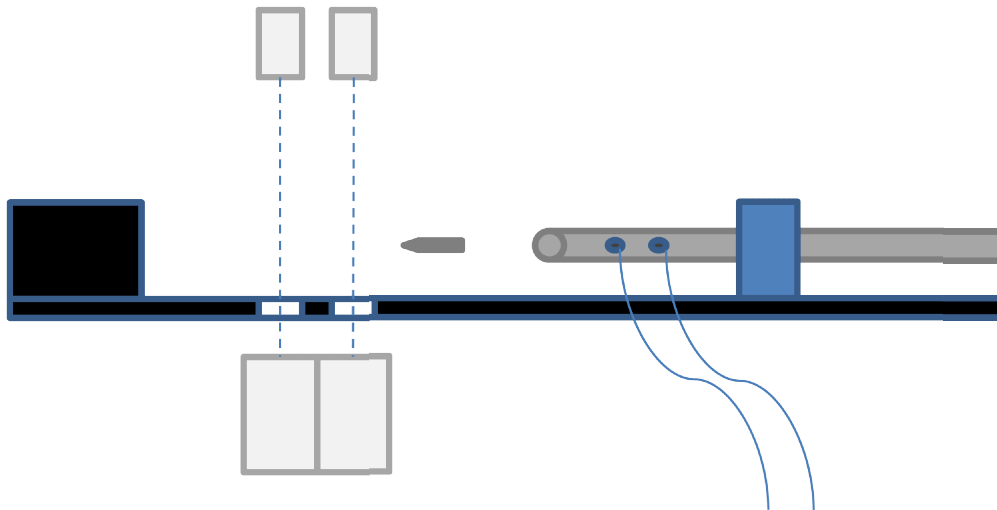
Yatayda, Taylor Impact Yöntemi düz uçlu silindirik bir merminin yüksek hızda rijit bir numuneye balistik olarak ateşlenmesi şeklinde uygulanır. Bu mermi genelde sert çelik veya zirkonyum dioksitten yapılmıştır. Diğer bir deney yöntemi olan Split Hopkinson Basınç Çıtası (SHPB) yöntemi veya düşeyde volanlı(çarklı) ya da yaylı (otomatik veya mekanik) bir düzeneğe sahip olan çarpma başlıklı bir milin raylar boyunca bir yörünge doğrultusunda yüksek hızla çarptırılması esasına dayanır [9]. Doğrudan çekme veya basınca maruz beton numunenin yüksek şekil değiştirmesi, yatay yörüngede tek veya çift eksenli kılavuz elemanlarla numuneye çarpan SHPB deneyi ile elde edilebilir [9]. Malzemelerin karakteristik özellikleri genellikle böyle yüksek hızlı çarpma deneyleriyle elde edilebilmektedir [115]. *Standart SHPB deneylerinde şekil değiştirme hızları 10^2 - 10^5 s⁻¹ arasında gerçekleşmektedir* [115].

Özellikle Taylor Impact Deney Yöntemi'nde, bazı varsayımlar yapılması gerekmektedir. Bu varsayımlar, merminin ateş edildiği andaki hızıyla numuneye çarptığı andaki hızının eşit kalmasını, merminin kaybettiği enerjinin numune tarafından absorbe edildiğini ve merminin geri tepme hızının sensörler yardımıyla kalan enerjisinin ölçülmesini kapsar. [9] Yüksek hızda fotoğraflamanın gelişmesi sayesinde çatlağın gelişimiyle ilgili fikir edinmek daha kolay hale gelmiştir [9, 13].



Şekil 2.2. Split-Hopkinson basınç çıtası [114]

Ardıl Çarpma Deneyi Yöntemleri, genelde çarpma deneyine numuneyi tabii tuttuktan sonra hasarlı numuneyi detaylı analiz etmek için uygulanır [9]. Bu amaçla; ultrason, mikrodalga, basınç deneyleri kullanılmaktadır. Burada özellikle ultrason testleri için yeni yöntemler geliştirilmiş temassız ultrason cihazlarıyla oluşan hasarlar incelenebilir olmuştur. Ancak, mikrodalga test yönteminde dalgaların ince bir filmle gözlenmesi amaçlandığından bu deney yöntemi sağlık sorunları barındırmaktadır. Bunlardan başka, hasarlı-hasarsız deney yöntemleri ihtiyaç duyulduğunda 3 ve 4 noktalı eğilme deneyi, x-ray cihazları, optik, elektron mikroskobu taraması(kırılma yüzeyini incelemek amacıyla), termografik testler uygulanabilmektedir. Genellikle Charpy Deney yönteminden sonra kırılma yüzeyini incelemek gerekir, Ağırlık Düşürme veya Balistik deney yöntemlerinden sonra standart basınç deneyi gerekebilir [9].



Şekil 2.3. Taylor Impact yöntemi [113]

Bu deneylerle, kullanıcı dostu yeni uygulamaların, yapılarda kullanılan yeni malzemelerin değerlendirilmesi sağlanmakla birlikte başlangıç ve yapı ömrü maliyetlerini düşürmek amaçlanmaktadır [10]. Ayrıca; teçhizatlanış, kuvvetin daha doğru ölçülebilmesine izin verir [6, 12]. Ancak, şimdiye kadar geliştirilen düşük hızlı çarpma deney yöntemleri, beton gibi anizotropik malzemeler için uygun sonuçlar vermemektedir [9]. Anizotropik malzemeler için balistik yöntem çoğunlukla ardıl çarpma deney yöntemleriyle birlikte uygulanır [9]. Ancak, balistik deney aparatlarının kurulup kullanımı uygulamada kolay olmayıp maliyetlidir [9, 12].

Bu nedenle, ardıl çarpma test yöntemleri uygulanması daha etkili olsa da yeni deney yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [12, 13]. Bu açıdan, özellikle karşılaşılan sorunlar çarpan mekanizmalarda tek seferde yeterli enerji üretilememesine bağlı olarak tekrarlı çarpma deneylerinin uygulanması veya çarpan mekanizmaya malzemenin gösterdiği tepkiden dolayı geri tepme ve veri eldesi için tepkime zamanı sırasında sürtünmelerden kaynaklı kaybedilen enerji sonucunda gerçek sonuçların elde edilememesi yeni deney cihazlarının geliştirilmesine ihtiyaç yaratmaktadır [5, 10]. Bu çalışmada da çarpma etkisiyle beton kıran bir makine özel olarak geliştirilerek kullanılmıştır.

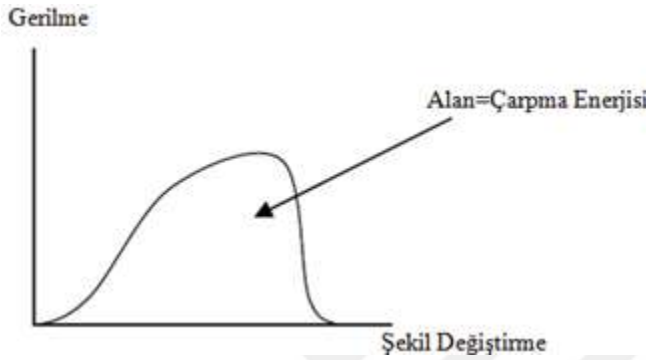
2.3. Çarpma ve Temas Mekanikğine Giriş

Çarpım noktasının hemen altında ani basınç gerilmeleri kısa mesafe uzağında yüksek eğilme yükleri oluşur. Malzemeler bu ani çekme etkisine dayanamaz ve kırılma çatlakları oluşur.

Elastik cisimlerin teması üzerine Hertz'in 1882'de başlattığı çalışmayla, çarpışmanın elastik veya inelastik olmasına çarpma şekline(çizgisel-noktasal temas) veya çarpan cismin geometrisine, hatta çarpan malzemenin rijitliğine göre çarpışma anına ait gerilmeleri belirleyen farklı formüller analitik ve nümerik yöntemlerle elde edilmiştir. Malzemeler lineer elastik, izotropik varsayılarak ve 3 Eksenli Gerilme Formülleri için süperpozisyon ilkeleri uygulanmıştır.

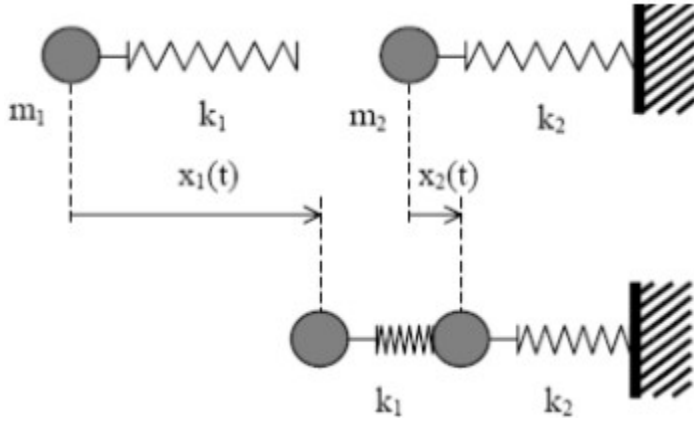
2.3.1. Çarpma deneylerinde ve mekaniğinde tanımlar

Çarpma dayanımı genellikle tokluk olarak isimlendirilir. Malzemenin kırılmadan hemen önce yuttuğu enerji miktarına karşılık gelen tokluk, joule olarak ifade edilir. Bir başka deyişle malzemenin kırılması için gerekli enerji miktarıdır. Yani, malzemenin tokluğu arttıkça ani çarpma kuvvetiyle yutması gereken enerji miktarı artar. Bu enerji, gerilme-şekil değiştirme grafiğinin altında kalan alana karşılık gelir [6].



Şekil 2.4. Örnek gerilme-şekil değiştirme eğrisi [6]

Dinamik yükleme şartları şiddetine, hızına ve dalga boyuna göre çok çeşitli olabilmektedir. Bu yükleme şartları sınıflandırılacak olduğunda quasi-static (kısmi statik) yüklemekten çok hızlı yüklemelere kadar değişen aralıklarda olabilmektedir. Bu yüklemeler deterministik olabildiği gibi olasılıksal yani rastgele de olabilmektedir. Deterministik yüklemeler içerisinde, sürekli titreşime maruz yapı elemanları periyodik ve harmonik yüklemelere maruzdur. Periyodik ancak harmonik olmayan yüklemeler için örnek verilecek olursa denizde seyir halindeki bir gemi düşünülebilir. Bunların yanı sıra, impulsif yüklemelerden (ani darbe etkileri, patlayıcı türevi etkiler) ve uzun-süreklili etki yaratan deprem (eğer zemin ivmesi biliniyorsa) yükünden de bahsedilebilir. Olasılıksal yani rastgele etki gösterebilecek olan yüklemeler ise en çok trafik kazaları gibi etkiler olarak karşımıza çıkmaktadır [14]. 1988'de Eibl'in yürüttüğü çalışmayla terminolojik olarak yumuşak ve sert çarpmalardan söz edilmiştir [14].



Şekil 2.5. Çarpan cisimlerin serbest cisim diyagramı [14]

m_1 kütlesinin, m_2 hedef cismine çarpmasını göstermek üzere, k_1 birinci cismin rijitliği ve k_2 ikinci cismin rijitliği olarak gösterilmiş ve çarpma anından hemen sonraki cisimlerin gösterdiği anlık deformasyon $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ olmuştur [14]. Burada denge denklemleri yazılacak olursa,

$$m_1 x_1(t) + k_1 [x_1(t) - x_2(t)] = 0 \quad (2.3)$$

$$m_2 x_2(t) + k_1 [x_1(t) - x_2(t)] - k_2 x_2(t) = 0 \quad (2.4)$$

Eğer, çarpan cisimdeki deformasyon (x_1), hedefte meydana gelen deformasyondan (x_2) çok çok büyükse ve sıfır (0)'a yakınsa bu yumuşak bir çarpmadır [14].

$$x_1 \gg x_2 \approx 0 \quad (2.5)$$

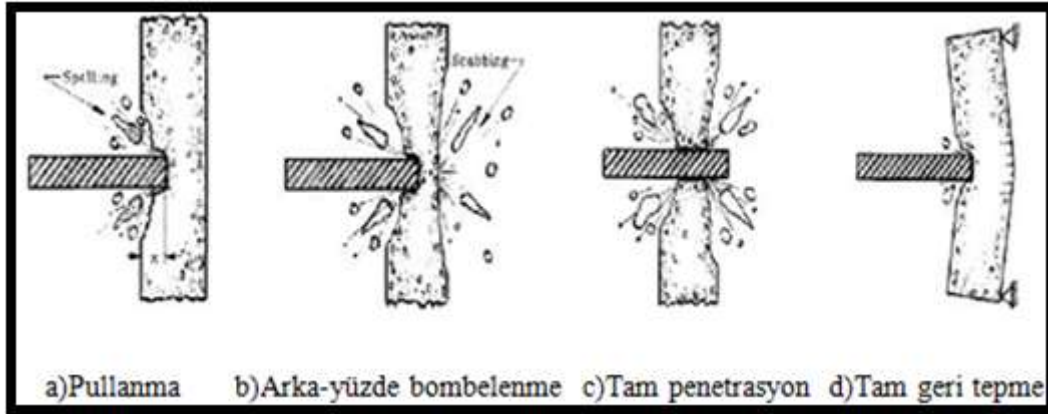
Yani çarpma etkisinden sonra yapıda az hasar meydana gelmesine karşın çarpan cisim çok daha fazla hasar görmüştür [14].

Ancak, çarpan cisimdeki deformasyon (x_1), hedefte meydana gelen deformasyondan çok çok küçükse bu sert bir çarpmadır [14].

$$x_1 \ll x_2 \quad (2.6)$$

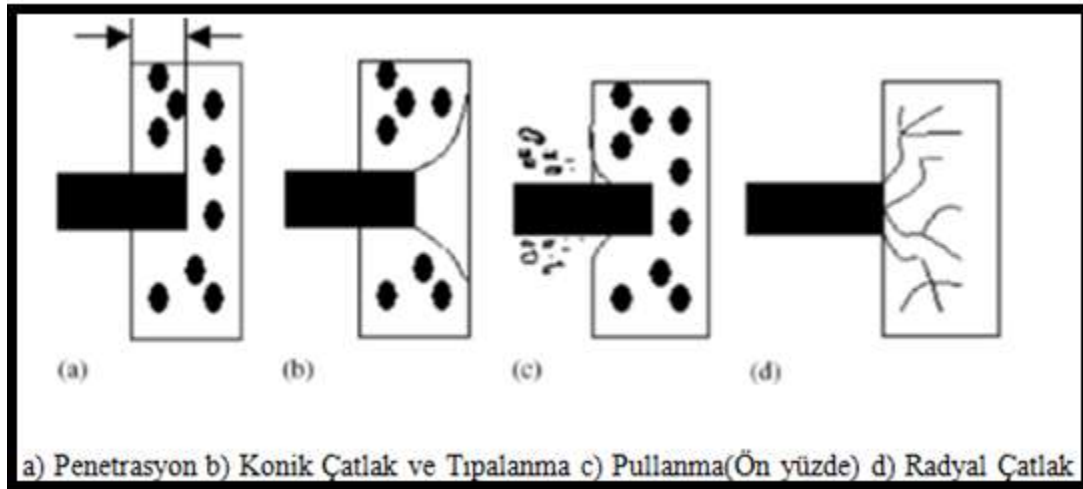
Yani çarpma etkisinden sonra yapıda çok hasar meydana gelmiştir. Burada çarpan cisim, çok rijit bir malzeme olarak düşünülmelidir [14].

Dolayısıyla, bu aşamada yapıda ne tür hasarların oluşabileceği ve bunların nasıl sınıflandırıldığına göz atmak gerekir [15]. (Bkz. Şekil 2.6) En genelleştirilmiş şekliyle, çarpma yükü altındaki betonun hasar formları; pullanma, arka-yüzde bombelenme, tam penetrasyon, tam geri tepme şeklindedir [15].



Şekil 2.6. Beton hasar formları [15]

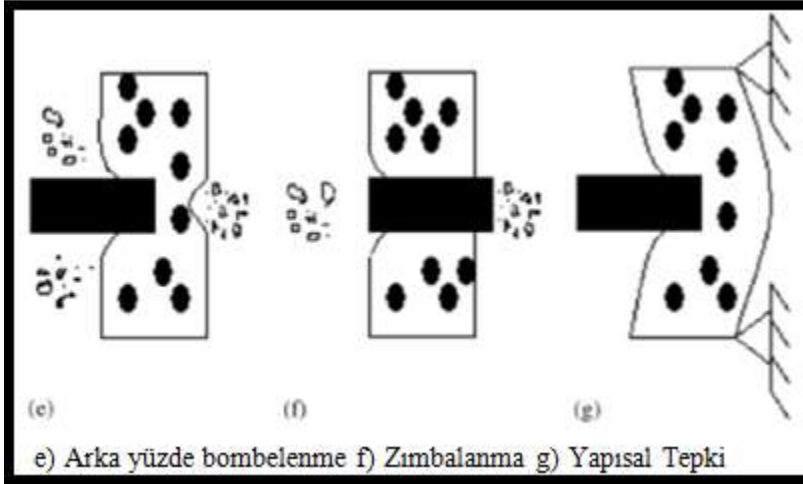
Ancak, daha sonra yapılan 2005'teki Li ve arkadaşlarının yaptığı araştırmalar sonucunda bu genel formlardan daha çok detaylandırılmış formlar da olduğu sonucuna varılmıştır [18].



Şekil 2.7. Ayrıntılı beton hasar formları [14]



Şekil 2.8. Radyal çatlak hasar formları [14]



Şekil 2.9. Ayrıntılı beton hasar formlarının devamı [14]

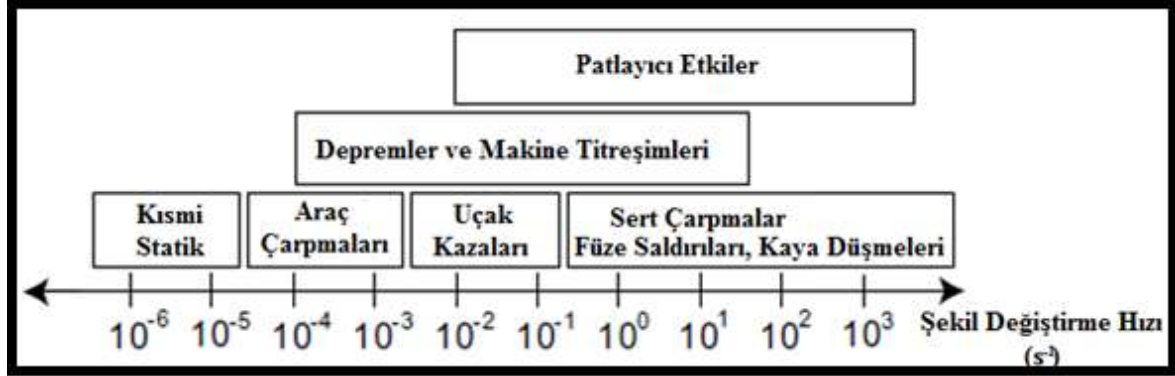
Şekil değiştirme hızlarına göre çarpma şiddetlerine göz gezdirilecek olduğunda, genellikle, trafik kazalarında $10^{-6} - 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; doğalgaz patlamalarında $0,5 \times 10^{-4} - 0,5 \times 10^{-3}$; deprem yükünde $0,5 \times 10^{-2} - 0,5$; kazık çakma işlerinde $10^{-2} - 1$, Uçak kazalarında $0,05 - 2$; sert çarpmalarda $1 - 50$, hiper hızlı çarpmalarda $10^2 - 10^6$ şeklinde olduğu ortaya koyulmuştur [14].

Bu açıdan bakılacak olduğunda yumuşak çarpma deneylerine ait bazı bilinen referans deneyleri bulunmaktadır. Bunlardan Meppen Deneyleri, istinat duvarlarına uzunluğu 50-90 cm aralığında değişen yaklaşık 1000 kg'lık çelik çubukların 170-260 m/s hızlarla çarpıtılması esasına dayanır. Iris deneyleri, 50 kg ağırlığındaki çelik çubukların yaklaşık 110 m/s hızla ateşlenmesi esasına dayanır [14]. Vulcain deneyleri, 7 cm kalınlığındaki betonarme duvara 50-100 m/s hızlarla yapılan testlerdir [14].

Bunlardan başka Sugano deneyleri gibi tam ölçekli uçak kazalarını simüle eden deneyler de mevcuttur [14]. Ancak, bu deneylerin tamamı hem maliyetli hem de uzun hazırlık süreçleri gerektirmektedir.

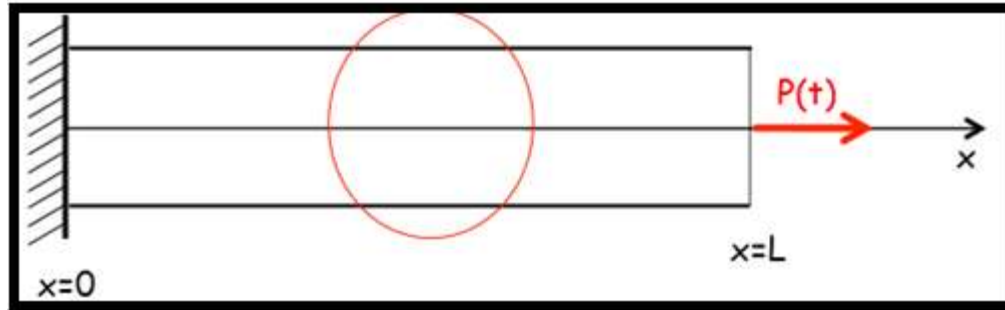
Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında ve yapılan nümerik analizler sonucunda kullanılan ampirik formüller aracılığıyla varılan sonuçlar, beton karışım oranlarının, beton yüzey ve çekirdeğinin kuruluşunun, beton su/çimento oranının, betonda var olan kaba agrega boyutlarının ve çimento hamurunun çarpma dayanımında önemli parametreler teşkil ettiğidir [14].

Beton şekil değiştirme hızına hassasiyet göstererek tepki veren bir malzeme olduğundan aşağıdaki etkilerin sınıflandırılış biçimi araştırmalar açısından önemlidir [14].



Şekil 2.10. Şekil değiştirme hızına ait sınıflandırma şeması [14]

Çarpma etkisine maruz yapı elemanlarında çarpmadan hemen sonra dalga yayılımı gerçekleşir. Bu dalga yayılımı, kirişlerdeki tek eksenli dalga oluşumuyla modellenerek ifade edilebilir [14].



Şekil 2.11. L uzunluğundaki bir kirişin serbest cisim diyagramı [14]

Kirişin kütle yoğunluğu, ρ ; young modülü E, en-kesit alanı A, deplasman $u(x,t)$ olmak üzere en kısa kiriş diliminde, $(x, x+dx)$, yazılacak momentum dengesine göre, kirişin elastik davranışı,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{E}{\rho} \times \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2.7)$$

denklemleriyle ifade edilir [14].

Bu ifadede,

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \quad (2.8)$$

dalga oluşum hızıdır [14].

D'Alembert denkleminin genel çözümü,

$$u(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) \quad (2.9)$$

ile sağlanır. Bu denklemde, eşitliğin sağ tarafındaki f fonksiyonu ileri dalga oluşumunu gösterirken, g fonksiyonu geri yansıyan dalgaları göstermektedir [14].

2.4. Beton Numuneler Üzerinde Yapılmış Çarpma Deneyleri

Bugüne kadar yapılan beton numuneler üzerinde yapılmış çarpma deneyleri göz önüne alındığında genellikle güçlendirilmiş beton numuneler üzerinde çalışılmış olup agrega ve beton ara yüzünde çarpma etkisini göz önüne alan çalışma pek yapılmamıştır. Bu çalışmaların bir kısmı ayrıntılı olarak incelenecektir.

Beton diğer inşaat malzemeleriyle karşılaştırıldığında daha iyi çarpma dayanımına sahiptir. Ancak, çarpma veya patlama yükü gözetmeksizin tasarlanan mevcut yapılar beklenmedik ani yükler altında zayıf kalabilir [15]. Dolayısıyla, Krauthammer ve Malvar ile arkadaşları yaptıkları çalışmalarda aşırı yükler altında beton yapıların dayanımını arttırmak için ek güçlendirme yöntemleri gerekmektedir. Özellikle, Chen 2005'te ve Buchan 2007'de yaptıkları çalışmalarda, yüksek hızda şekil değiştirme yaratan yüklemelere karşı taşıdığı birçok avantajından ötürü FRP güçlendirme yöntemi ilgi odağı haline geldi. Eğilme dayanımı, ASTM C39 VE ASTM C1609 standartlarına göre 4 noktalı yükleme deneyiyle 0.01 mm/sn yükleme hızıyla deplasman kontrolü altında elde edilmiştir. Fiber oranı arttıkça basınç dayanımının %1.5-13 azaldığı gözlenmiştir. Bu azalış, beton içinde homojen dağılmayan çelik fiberlerden dolayı kaynaklanmıştır. Tersine, eğilme dayanımının çelik fiberlerin köprülenme etkisiyle daha fazla çatlak gelişimini önlemesinden dolayı %0.2-24'e kadar lineer olarak arttığı gözlenmiştir [15]. Ağırlık düşürme şahmerdanıyla ölçülen maksimum deplasman FRP güçlendirme etkisinden dolayı %34 azalmıştır [15]. Normal numuneden 2.3-2.7 kat daha fazla gerçekleşen enerji tüketimi(dissipated energy), yük-deplasman eğrisindeki gecikme alanından kaynaklanmaktadır [15]. Dıştan yapıştırılmış FRP yaprakları beton numunelerin normalden

daha sünek davranmasına yol açmıştır, dolayısıyla kayda değer bir oranda çarpma enerjisi absorbe edilmiştir. Eğilme çatlaklarından, FRP güçlendirilmişlerde pullanma vb. etkilerden dolayı ikinci çarpışta enerji tüketimi büyük oranda azalmıştır. Bütün numunelerde çelik çerçevenin kısıtlamasına bağlı olarak pik yükten sonra az da olsa negatif yük oluşmuştur [15].

Düşük çekme mukavemetine ve düşük kırılma enerjisine sahip olan betonlar akustik çevre ortamında sürekli darbelere maruz yapılarda uzun ömürlü sonuçlar vermediğinden kompozit beton elemanlar kullanılmasına yol açtı. Daha çok hava alanı pistlerinde, endüstriyel ve hidrolik yapılarda hatta zemin kazıklarında bu tür uygulamalara gidilmeye başlandı. FRP ile güçlendirilmiş beton numunelerde yapılan araştırmanın sonucunda, herhangi bir izotropik şekil değiştirme hızı hassasiyetli varsayım doğru olmamaktadır. Yüksek hızlı yüklemelerde enerji absorbesinin daha düşük hızlı olanlardan 2 veya 3 kat daha fazla gerçekleştiği görüşmüştür. Böylece, malzemenin ani etkilerde daha fazla bütünsel davrandığı düşünülebilir. Burada en doğru karşılaştırma parametresi, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin altında kalan alanın bulunarak enerjilere geçilmesidir [15].

Bir başka çalışmada, araştırılan parametreler numune geometrisine, çentik derinliğine, kullanılan çelik-fiber oranına ve çarpma başlığının ağırlık ve düşü yüksekliğine yönelik olmuştur. Çarpan kütleinin, yapıya oranla boyutlarının çarpma olayı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Burada 3 farklı durumdan söz edilebilir. İlkinde, çarpan kütle küçük olmakla birlikte hasar temas bölgesiyle sınırlı kalmaktadır. İkincisi, büyük bir çarpma kütlesi nispeten küçük bir beton elemana çarpar. Bu tür olaylar için ampirik formüller öngörülmüştür. Sonuncusu ise, çarpma kütlesi ve beton elemanın karşılaştırılabilir oranlarda olmasıdır ki araştırmalar bu alanda yoğunlaşır. Çarpma deneyleri görünüşte basit olsa da pratikte tekrarlanabilir bir sistem oluşturmak zordur. Bu yüzden Banthia tarafından iki ara tipte test denenmiş ve deney numuneleri basit bir çarpma mekanizmasıyla kırılmıştır, deney sırasında absorbe edilen enerjiler ölçülmüştür. Charpy tipi test Shah ve ekibi tarafından küçük şerit kiriş numuneler üzerinde çalışmış, Shah ve Suaris iki serbestlik dereceli model kullanarak Charpy Testi analiz eden başlangıç deneyleri yapmışlardır. Çatlak başlangıç noktasının yerini daha önceden tespit etmek amacıyla numunede açılan çentikler sayesinde sonuç dağılımının çok çeşitli olması ve yayılım göstermesi önlenmiş olacaktır. Tam göçme oluşana kadar deneyler tekrar edilmiş ve en az 10 düşü yapılmıştır. Impulsif kuvvetler başlık kütlesi arttıkça artmaktadır. Yüksek

hızlı düşük kütleli çarpmanın ortaya çıkardığı göçme, yüksek kütleli düşük hızlı çarpmanın oluşturduğundan daha etkilidir [16].

Yapısal Analizlerde, nümerik metodlar hem yükleme geçmişinin bilinmesine hem de dinamik yüklemelere göre tasarım ve boyutlandırma yapılmasına ihtiyaç duyar. İki cisim arasındaki temas davranışının deneysel bilgilerle elde edilmesi gerekir. Gerçekten bu davranışın doğru belirlenmesi çarpma analizlerinin yapılmasında önemli bir aşamadır. Katı cisim çarpmalarına karşı fiber güçlendirilmiş kompozitlerin hassas olduğu sonucuna varılmıştır. Burada, çarpan mekanizmanın numuneye göre küçük olduğu varsayılırsa numune içinde dalga oluşumu ihmal edilebilir. Numuneler uzun dar bir şerit olabilir. Çünkü, çarpma süresi mesnetten yansıyan dalgalardan daha kısa sürer böylece ölçüm gürültülerinden arınmış veriler elde edilir [17].

Betonun çarpma etkisi altındaki davranışı statik yükleme altındaki davranışından çok daha farklıdır. Burada çoğu deney mode-1 kırılma tipi ve eğilme testleri üzerine yoğunlaşmıştır. Barr ve arkadaşlarınca geliştirilen deney makinesinde yapılan çalışmada, numuneye belli yükseklikten başlık çarptırılmaktadır. Kılavuz direkleriyle, başlık arasındaki sürtünme kuvvetlerinden dolayı başlık, yer çekimi ivmesinden daha az ivmelenmektedir. Ancak bu sürtünmeler ihmal edilmiştir. Testlerde yüksek oranda fiber içeren numuneler için göçmenin ne zaman olduğuna karar vermek o kadar zorlaşmıştır ki, çarpma dayanımı net elde edilebilsin. Bunun için, en kılcal çatlağın olduğu ilk an göçme anı olarak alınmıştır. Her test için gerekli düşürme sayısı kaydedilerek ortalaması alınmıştır. Böylece, her düşüdeki üretilen enerji hesaplanmış ve tam göçmeye neden olan toplam enerji düşü sayılarıyla çarpılarak belirlenmiştir. Burada, bütün potansiyel enerjinin numuneye kinetik enerji olarak transfer edildiği varsayılmıştır. Gerçekte böyle olmasa da özdeş ve ampirik bir karşılaştırmada bulunulmuştur. Kırılma enerjisinin, normal beton için statik yüklemeye göre 10 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Statik deneylerdeki dinlenme zamanının gelişmesine el vermeyecek kadar süratli enerji aktarımı söz konusu olduğundan malzeme davranışı değişmekte ve büyük tokluk oluşmaktadır [5].

Yeni bir makaleye göre, önerilmeli kirişlerde çarpma problemlerine yönelik basitleştirilmiş modal analiz kullanılmış ve kayda değer bir doğruluk sağladığı

görülmüştür. Çarpma yükü altındaki bir kirişin yuttuğu enerji anlık kuvvet-deplasman eğrisinin altında kalanla elde edilebilir [19].

Yarı-durağan (kısmi-statik, quasi-static) yüklemeler altındaki beton için göçme mekanizmaları ve çok eksenli yükleme şartları altındaki betonlar için geniş miktarda veriler elde edildiğinden göçme mekanizmaları çok iyi bilinse de ne yazık ki, yüksek hızlı şekil değiştirmeye uğrayan veya çarpma kuvvetine maruz betonlar için o kadar da iyi bilinmemektedir. Örneğin, Kuzey Atlantik'te, yüzen beton sondaj platformlarına buz dağları çarpabileceği gibi bu çarpma etkileri çok büyük önem taşımaktadır. Yüksek yoğunluklu çarpma için betonun yerel davranışı, yapının global davranışı hakkında fikir verir. Yükleme ve tepki zamanı birkaç mikrosaniyeden milisaniyeye kadar değişmektedir. Malzemenin elastisite modülü arttıkça çarpma dayanımı da artmaktadır [20].

Başka bir çalışma da, çelik bir top hazırlanmış küçük boyutlardaki ve şerit halindeki kompozit numunelere düşürülerek yapılmıştır. Bu yöntemlerde en önemli nokta, dinamik kuvvetin ve şekil değiştirmelerin ölçülmesi ve birbiriyle ilişkilendirilmesidir [21]. Geniş plakalar halinde numuneler kullanmak yararsızdır. Sonuçlarda ölçüm yetersizliklerinden ötürü belirsizlikler mevcut olduğundan daha bağımsız deney yöntemleri uygulanmalıdır [21].

Çarpma testleri sırasında elde edilen osilogramlar, yük-deplasman, yük zaman veya deplasman-zaman eğrilerini gösterebilir [22]. Böylece, dinamik kırılma tokluğunun belirlenmesi mümkün olur. Bu amaca ulaşmak için kullanılan teçhizatlı çarpma deneylerinde, iki zorluk ortaya çıkar:

1. Önceden çatlak oluşumuna izin verilmiş dahi olsa küçük basit bir Charpy numunesinde bile düzlemsel şekil değiştirmeyi elde etmek zordur.
2. Mikroskopik boyutlarda plastik deformasyon olmadan numune aniden kırılır veya düzlem şekil değiştirmeye uğrarsa yük-zaman eğrisi elastik davranış içinde kaldığından gerçek davranışı kayıtlara göre yorumlamak güçleşir.

Son yıllarda, numunenin akustik özellikleri ve atalet etkisi yoğun olarak anlaşılmaya çalışılsa da eğilme yükü ve momentinin güvenilir eldesi için yeterli bir çarpma modeli oluşturmaya ihtiyaç vardır. Böylece dinamik kırılma tokluğu elde edilebilir. Numunelerde

açılan çentikler rijitliği etkilediğinden, modelleme yapmak yerine deneysel çalışmak daha etkilidir [22].

Bir diğer çalışmada, maksimum gerilme düzeyinin azaltılarak beton elemanlarının yorulma ömrünün uzatılma fenomeni, kırılma mekaniği yardımıyla tartışılmış ve betonun davranış farklılığına açıklamalar getirilmiştir. Bunun için, beton ve çimento pastasının çekme gerilme ve birim şekil değiştirme davranışı yüksek gerilme hızlarında Split-Hopkinson Basınç Çıtası tekniği ile araştırılmıştır. Normalde yapısal analizlerde, betonun çekme gerilmesi ihmal edilmektedir. Fakat dolaylı olarak her elemanın güvenliği buna dayanmaktadır ki betondaki çatlakları, kayma kuvvetleri altındaki donatıyla olan aderansı bu çekme mukavemeti belirler. Bazı özel yapılar ani darbelere maruz kalabilirler. Açık deniz yapıları, nükleer reaktörler, karayolu yapıları, depremler, patlamalar, gemi ve uçak çarpmalarına karşı böyle yapılar dayanmalıdır. Çoğu elemanda, beton tabakalar arasında basınç gerilmesi dalgasının bir kısmı çekme gerilmesi dalgası olarak yansır ve sonuç olarak betonun göçmesine neden olur. Dolayısıyla, çarpma gerilme ve şekil değiştirmesi davranışına yönelik yapılan analizlerle güvenli ve ekonomik betonarme yapılar tasarlanır. Nihai çekme dayanımının 0,3 katındaki gerilme düzeyinde matriks-arayüz yapışma bölgeleriyle agreg a parçaları arasında mikro çatlaklar başlar. Büyüyen çatlaklar az enerji gereken yolları takip eder. Nihai dayanımın 0,7 katı kadar olan gerilme düzeyinde kırılmalar köprülenmeye başlar ki σ - ϵ diyagramında artan bir eğrilik gerçekleşir. Daha kısa zamanda agreg a parçaları ve matriks bölgeleri arasındaki kuvvetli bağ ı yenmek için daha yüksek yüklemeler çarpma şeklinde uygulanmalıdır. Kırılma dallanarak heterojen bölgeler arasında yayılır. Yüksek dayanım ve deformasyon gözlenmesinin nedeni;

1. Yüksek tokluğu olan bölgelerde çatlaklar gelişir.
2. Daha geniş mikro ve makro kırılmalar bütün numune hacminde vuku bulur.

Kırılma başlangıcından sonra stabil kırılma büyümesi meydana gelir. Yükleme kalktığında, çatlaklar kapanma eğilimi gösterir. Kırılma tokluğu karışım oranlarına ve su/çimento oranına bağlıdır. Agreg a parçalarının tokluğu yüksek olup daha fazla enerji yutmaktadır [23].

Patlayıcıların saklandığı ya da üretildiği binaların maruz kalabileceği patlama yüklerine ve şok dalgalarına karşı dayanıklı kompozit beton tasarımı yapılması amacıyla yüksek hızlı kameranın da kullanıldığı testler uygulanmıştır [24].

Mikro çatlakların olduğu yerlerden gerilme yoğunluğu artarak yırtılmalar gerçekleşecektir. Her iki mikro ve makro düzeyde malzemenin heterojenliği dolayısıyla çatlak gelişimi yavaşlar. Çatlaklar malzemenin içinde bölge değiştirirken veya gerilme yoğunluğu farklılaşmalarından ötürü çatlak gelişimi sekteye uğrar. Çatlaklar görece zayıf ara yüzleri takip eder. Bu yüzden, komşu bölgelerde gerilmeler yeniden dağılıma uğrar. Çarpma yükü altında mikro çatlakların hepsi aynı anda genişlemeye çalışır. Ancak malzemenin bir bölgesinde gelişen çatlak diğer yerlerindeki davranışı etkilemez. Bunun nedeni, malzemenin içinde bulunan parçacıkların ataletidir [25].

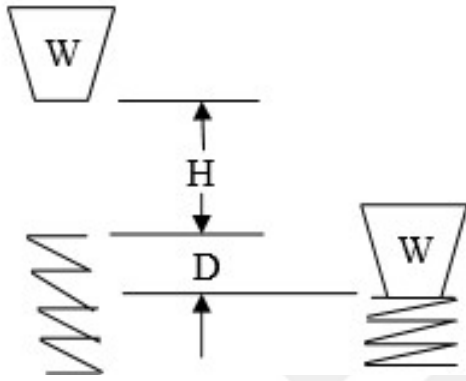
Uzun zamandır bilinmektedir ki portland çimentosuyla üretilen tüm betonların zayıf yönü düşük çekme mukavemetidir. Aslında bütün betonlar, basınç dayanımına göre daha az çekme dayanımına sahiptirler. Betonda statik çekme mukavemeti önlenebilse de gerçekte beton elemanların dinamik çekme gerilmelerine (patlamalar, füzeler, depremler, makine titreşimleri, türbülanslı su akımı, temel kazıkları çakma mekanizmaları vb.den kaynaklanan) maruz kalmasından kaçınılamaz [26]. İlk kırılma anı Kuvvet-zaman grafiklerinden elde edilemez [27].

10 yıllardır betonun dinamik mekanik özellikleri rapor edilse de dinamik kırılma mekaniği davranışı üzerine makaleler seyrek veya birkaç tane kalmıştır. Aslında, diğer yapı malzemeleriyle kıyaslandığında betonun dinamik kırılma mekaniği gelişme aşamasındadır. Lineer elasto-dinamik kırılma mekaniğinin betona uygulanmasıyla bu gelişim artarak devam edecektir. Yapılmış deney sonuçları tartışılrsa da daha çok çalışmalar metal ve polimerlerin dinamik sünek davranışları ve kırılma kuvveti ile hızı üzerine odaklanmıştır. Metal ve polimerlerdeki çatlak ucu gelişimi ve köprülenmeleri betondakine benzer nitelikler taşımaktadır. Çatlak oluşumu devamlı bir süreç olup göçmeyle sonuçlanır ki metal ve polimerlerde bu çok yavaştır. Çekme mukavemetindeki artışa rağmen kırılma anındaki büzülme betonun lineer elastik kırılma mekaniği davranışı göstermesinden kaynaklanmaktadır [28].

Modifiye edilmiş Split Hopkinson Basınç Çıtası'nda ve nümerik bilgisayar analizleriyle bir arada yürütülen bir araştırmada betonun gerilme ve şekil değiştirme hızına hassasiyet gösterdiği birbiriyle uyumluluk halinde gösterilmekle birlikte makro ve mikro düzeyde gelişen çatlaklar fosforlu epoksi malzeme püskürtülerek mikroskopik boyutta incelenmiştir. Burada kullanılan modifiye edilmiş split hopkinson basınç çıtası deney

düzeneği, normal split hopkinson basınç çitası 50GPa/s 'ye kadar çıkabilmekteyken, 1000 GPa/s ' den daha büyük oranlarda gerilme hızına çıkabilmektedir [29].

Tasarlanan cisme belli bir yükseklikten düşen ağırlık o numunede hasar meydana getirir. Böylelikle, tasarlanan cisim sıkıştırılmaya çalışılan bir yay gibi davranır. Burada, enerji denge denklemi yazılırsa,



Şekil 2.12. Düşen bir ağırlıkla sıkışan yay [30]

$$U = W(H+D) = \int_0^D kx dx = \frac{1}{2} k D^2 \quad (2.10)$$

Burada; U, sistemdeki toplam enerji, W, düşen ağırlık, H, düşü yüksekliği, k, numune rijitliği, D, çarpmaya bağlı cisimde gerçekleşen deplasman şeklindedir.

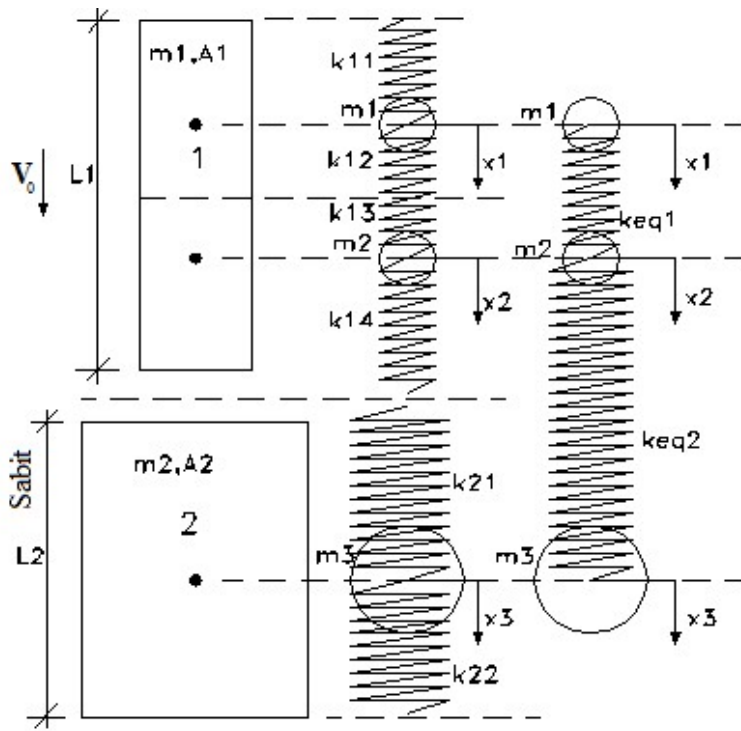
Eğer burada, D, yay deplasmanı düşü yüksekliğinden çok çok küçük olduğu varsayılırsa,

$$U = WH = \frac{1}{2} k D^2 \quad (2.11)$$

Denkleme ulaşılır. Böylece, herhangi bir sonlu eleman programıyla da gerekli parametreler çekilerek hesaplanabilir [30].

Burada sırası gelmişken, çarpan iki cisim için sonlu elemanlar yöntemiyle yazılmış denklemlerden yararlanarak kütle-yay serbest cisim diyagramına dönüştürülmüş çarpma mekaniğine özgü bilgisayarlı çözümleme yöntemine de değinmek gerekir. Bu bilgisayar programında, birbirine çarpan iki cisim sonlu elemanlar ilkesi gereği çok sayıda kütle ve

yaya ayrılarak birleştirilmiş gibi simule edilmiştir. Böylece, bu sistem birinci dereceden sıradan diferansiyel denklemlere dönüştürülmüştür. Sonuç olarak, Runge Kutta 4. Dereceden çözüm yöntemi uygulanarak çarpma sırasındaki kütlelerin sahip olduğu hızlar, deplasman-zaman grafiği ve çarpma arayüzündeki kuvvet-zaman grafikleri elde edilebilmektedir. Çarpan iki çubuğun denklemlerini elle çözmek uzun zaman aldığından yazılan bir program kullanımı daha pratiktir [31]. (Bkz. Şekil 2.13)



Şekil 2.13. Kütle-yay serbest cisim diyagramı [31]

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_{eq1} (x_1 - x_2) = 0 \quad (2.12)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_{eq1} (x_2 - x_1) + k_{eq1} (x_2 - x_3) = 0 \quad (2.13)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + k_{eq2} (x_3 - x_2) = 0 \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{eq1} & -k_{eq1} & 0 \\ -k_{eq1} & (k_{eq1} + k_{eq2}) & -k_{eq2} \\ 0 & -k_{eq2} & k_{eq3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.15)$$

Sonrasında, sistem Runge Kutta 4. Dereceden yöntemiyle çözülür. Bu yöntemi uygulamak için, iki aşama arasındaki zamanın bilinmesine ihtiyaç vardır. Böylece, temas süresi yaklaşık olarak da hesaplanabilecektir [31].

$$m_{eq} = \frac{m_1 \times m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.16)$$

$$k_1 = \frac{A_1 \times E_1}{\frac{L_1}{2}}, \quad k_2 = \frac{A_2 \times E_2}{\frac{L_2}{2}}, \quad k_{eq} = \frac{k_1 \times k_2}{k_1 + k_2} \quad (2.17)$$

$$w_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad (2.18)$$

$$t_c = \frac{\pi}{w_n} \quad (2.19)$$

Burada, m'ler kütleleri, k'lar rijitlikleri, w, doğal periyodu, t_c temas süresini gösteriyor [31].

Hesaplamalarda en popüler yöntemlerden biri olan Runge Kutta 4. Dereceden yöntemi uygulanmıştır. Araştırmalarda kullanılan çok çeşitli başka hesaplama yöntemleri veya yaklaşımları da mevcuttur [31]. Ancak, burada Euler vb. yöntemler yerine tercih edilen yöntem çıktıların doğruluğunun artırılması için şu şekildedir:

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6} \times (k_1 + 2 \times k_2 + 2 \times k_3 + k_4) \right] \times h \quad (2.20)$$

Burada,

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (2.21)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2} \times h, y_i + \frac{1}{2} \times h \times k_1\right) \quad (2.22)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2} \times h, y_i + \frac{1}{2} \times h \times k_2\right) \quad (2.23)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + h \times k_3) \quad (2.24)$$

Bu hesaplama robotuyla, temas süresi en çok 50 eşit parçaya ayırarak birbirine göre hesap yapmaktadır. Ayrıca, hesaplanan veriler grafik olarak elde edilebilmektedir. Bu program adapte edilebilir bir robottur [31].

Çarpma deneylerinde, insan hatalarını sınırlandırıp üstesinden gelmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. İlki, testlerin tekrarlanabilir olmasını sağlamak amacıyla çarpma

kuvvetinin süresini kontrol etmektir [36]. Diğeri ise, çarpma etkisi altındaki betonun yüzey deplasmanını karakterize etmektir. Çarpmanın gerçekleştiği noktadan başlayarak küresel basınç ve kayma gerilmeleri dalgaları malzemenin içine doğru radyal olarak hareket ederlerken yüzey dalgaları çarpma noktasından uzaklaşırlar [32]. Basınç ve kayma dalgaları, malzeme içerisinde heterojenlikle karşılaştığında veya dış bir sınıra ulaştığında, tekrar yüzeye yansır. Bu dalgaların neden olduğu deplasmanlar yüzeyden ölçülebilmektedir. Bu yaklaşım genel olarak sonik-eko veya sismik-eko olarak bilinir ve zemin çivileri ile kesonlarda başarıyla kullanılmaktadır [32]. Bu uzun yapılar, çarpma kuvveti ve yansıyan gerilmeler arasındaki zaman farkından yararlanılarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesine izin verirler. Döşeme ve duvarlar gibi ince beton yapılarda, analizlerin yapılması zorlaşarak karmaşıklık artar [32]. Bu tür uygulamalar için Sansalone, çarpım ekosu olarak bilinen ve ASTM C 1383'te tariflenen bir yöntem geliştirmiştir [32]. Düşük frekanslı etkiler için yeterli olan çelik kürelerle yapılan çarpma deneylerinde, temas süresi belirgin bir şekilde azalarak çarpma süresi P-dalgalarının hareket süresinden daha kısa sürmektedir. Ancak temas süresi, çelik kürenin yar çapıyla orantılıdır. Ancak, doğru ölçümler alınabilmesi için geniş-bantlı yüksek hassasiyetli ölçüm elemanları kullanılmalıdır. Uzun dalga boyuna sahip dalgalar, kısa dalga boylu dalgalardan daha derine işlerler. Bu yüzden yüzey dalgalarıyla çalışmak daha doğru olacaktır. Değişken frekanslarda yüzey dalgaları oluşturma en uygun yolu, beton yüzeyine bir şahmerdanla çarpma uygulamaktan geçer [32].

2.5. Plak Çarpma Teorisi

Numuneyi eğilme altında bir kiriş gibi farz eden bir teyidir. Bu varsayımda, numune her iki ucundan mesnetlidir [9]. Daha klasik olan her tarafından tutulu plak numune yaklaşımından farklıdır. Newton'un 2. Kanununa göre başlanırsa;

$$a(t) = g - \frac{P(t)}{m} \quad (2.25)$$

a ivme, g yer çekimi ivmesi, P(t) zamana bağlı kuvvet ve m çarpan yük olarak gösterilmiştir

t=0'da şu başlangıç şartları bilinmektedir:

$$v(t) = V, t = 0 \text{ da} \quad x(t) = 0, t = 0 \text{ da} \quad (2.26)$$

V burada çarpma öncesi ilk hızdır. Eş. 2.25'deki denklemin, $v(t)$ 'yi ve $x(t)$ 'yi elde etmek için integrali alınırsa aşağıdaki çözümler elde edilir:

$$v(t) = V + \int_0^t g - \frac{P(t')}{M} dt' \quad (2.27)$$

$$x(t) = 0 + \int_0^t V(t') dt' \quad (2.28)$$

Önceki eşitlikler bilindiğinde, artık zamanın bir fonksiyonu olarak absorbe edilen enerji hesaplanabilir:

$$\Gamma(t) = \int_0^t P(t')V(t') dt' \quad (2.29)$$

Bu, numune tarafından yutulan enerjiyi hesaplamak için en basitleştirilmiş metottur. Ancak, kompozit malzemeler için özellikle zirkon zırhlı veya sert çelik barındıran numuneler için en uygun deney yöntemi balistik deney yöntemleridir [9]. Ateş edilen merminin isabet ettiği numunede isabet noktasının etrafında kırılma halkası oluşur. Numunenin enerjiyi orantısal olarak absorbe ettiği varsayılır. Ancak, hesaplamalar için kullanılan denklemler daha karmaşıktır.

2.6. Kırılma Enerjisi

Şahmerdan kirişe çarpar çarpmaz yüksek oranda enerji transferi gerçekleşir. Başlığın çarptıktan sonra kaybettiği enerji impuls-momentum denklemleriyle çıkarılır [33].

$$\Delta E(t) = \frac{1}{2} m_h \left[2a_h - \left(\sqrt{2a_h h} - \frac{1}{m_h} \int P_t(t) dt \right)^2 \right] \quad (2.30)$$

Burada, şahmerdanın kaybettiği enerji $\Delta E(t)$ olmak üzere, m_h , h yüksekliğinden çarpan kütle, a_h şahmerdanın ivmesi, h düşü yüksekliğidir. Transfer edilen enerjinin bir kısmı kirişe aktarılırken kalanı, elastik şekil değiştirmeler ve titreşimler olarak makinede

gerçekleşir. $\int P_t(t)dt$ ifadesi ise şahmerdanın rol oynadığı itkidir. Dolayısıyla, yukarıdaki denklem her t anında kırışe transfer edilen enerjinin hesaplanması için kullanmaya yeterli değildir. Oluşan kinetik enerjiden daha çok bizi ilgilendiren eğilme enerjisidir, $E_b(t)$. Bu da yük-noktasal deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak elde edilebilir [33].

$$E_b(t) = \int_0^t P_b(t) du_0 \quad (2.31)$$

Burada, $P_b(t)$ genelleştirilmiş eğilme yükü, u_0 ise zamana bağlı gelişen deplasmandır [33]. Dolayısıyla transfer edilen enerji, yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alandan hesaplanır. Elde edilen sonuçlar ortaya koymuştur ki bütün beton türlerinin çarpma yükü altında statik yüklemedekine göre tokluğunun daha fazla olduğu görülmüştür. Mekanik davranıştaki bu farklılık araştırmacılara yüksek hızlı çarpma deneyleri uygulamakta daha fazla ilham verecektir [33]. Betona Yüksek hızlı gerilme deneyi uygulanması açısından ağırlık düşürmenin uyarlanabilir olduğu görülmüştür [33].

2.7. Kuvvet Sensörleriyle Çarpma Deneylerinin Uygulanışı

Ölçülmesi beklenen enerji, iş-enerji prensibindeki denklemlerden elde edilir. Burada enerjinin korunumu yasasına göre potansiyel enerjinin kinetik enerjiye eşitliğinden yararlanılır [13].

$$PE = KE \quad (2.32)$$

$$mgh = (1/2) \times mV^2 \quad (2.33)$$

m, kütle; g yer çekimi ivmesi, h yükseklik; V çarpma hızıdır. Yukarıdaki denklem çözüldüğünde;

$$V = \sqrt{2gh} \text{ elde edilir.} \quad (2.34)$$

Kuvvet ve mesafe arasındaki ilişki:

Çarpma sırasındaki net iş ortalama çarpma kuvvetinin çarpışma boyunca yaptığı işe denktir.

$$W_{\text{net}} = (1/2) \times mV_{\text{final}}^2 - (1/2) \times mV_{\text{başlangıç}}^2 \quad (2.35)$$

Başlangıç hızı genelde 0'dır. Kuvvet şöyle hesaplanır:

$$F = \frac{W_{net}}{d} \quad (2.36)$$

d= çarpışmadan sonraki mesafe

d'yi iyi tespit edebilmek için uygun nitelikte kuvvet sensörü seçilmelidir. Daha iyi açıklanacak olursa, köpük bir plakaya belli yükseklikten çelik top düşürülürse köpüğe çelik top penetre oldukça sahip olduğu enerji köpük tarafından absorbe edilir ve durum elastik bir çarpışma olmaktan çıkar. Ancak, aynı çelik top çelik bir plakaya çarpıtılırsa sahip olduğu kuvvet ve enerji aktarılamaz ve tam bir geri tepme gerçekleşir dolayısıyla durum tam elastik çarpışma halini alır. Dolayısıyla seçilen kuvvet sensörünün rijitliğinin deney sırasında sönümlmeler yaparak yanlış ölçüm verilerine yol açmasının önüne geçilmelidir. Ayrıca, doğru ölçümlerin alınabilmesi için deney aparatlarının uyguladığı kapasiteler içinde kalan yeterli hassasiyete sahip sensörler tercih edilmelidir [13]. Üretilmiş değişik hassasiyet ve kapasitelere sahip standart bazı dinamik kuvvet sensörleri gösterilmiştir. (Bkz. Şekil 2.14)



Şekil 2.14. Farklı özelliklerdeki ICP-PCB piezo-elektronik dinamik yük ölçerler [13]

Bu sensörlerin özelliklerine ait çizelgedeki değerler yaklaşık olup bunları göz önünde bulundurmakta fayda vardır [13].

Çizelge 2.1. Piezo-elektronik kuvvet sensörlerinin özellikleri

MODEL	Kapasite (kN)	Hassasiyet (mV/N)	Rijitlik (N/ μ m)	Doğal Frekans (kHz)
2008C05	22	0,22	1,05	36
205C	260	0,018	7	50
200C50	220	0,022	17	30
208A22	450	0,88	11	18

Harekete dair verilerin veya hesaplamaların yapılabilmesi için çarpma deneylerinde değişik amaçlar doğrultusunda deney şartlarına özgü olarak adapte edilebilmektedir. Ancak burada kullanılacak olan farklı özelliklerdeki ivme-ölçerlerin tipine karar vermek önem taşımaktadır. Bu açıdan, en geniş anlamda kullanılan ivme-ölçerler yine piezo-elektronik özellikte olanlardır. Geniş frekansta ölçüm kapasitesine sahip olan bu cihazlar, farklı hassasiyetlerde, ağırlıklarda ve boyutlarda olabilmekte ve şok ve titreşim ölçümleri içindirler. Piezo-direnç özellikteki ivme-ölçerler ise düşük hassasiyette olup şok etkiler için kullanılmaktadırlar. Bu yüzden, hangi tipte cihazın seçileceğine yükleme ve ölçülmek istenen parametreler üzerinden yola çıkılarak varılmalıdır. Bu bakış açısıyla, ivme-ölçerlerle titreşim, şok, hareket ve sismik etkiler ölçülebilmektedir. Çarpma deneyleri, düşük hızlı ve yüksek hızlı şok etkileri yarattığından kullanılması gereken ivme-ölçerin kapasitesine uygun bir yaklaşım gösterilerek seçim yapılmalıdır [34].

Bu yaklaşım aşağıdaki genelleştirilmiş çizelgeye göre gösterilebilir [34].

Çizelge 2.2. İvme-Ölçer seçiminde önemli olan değerler

Düşük Düzeyde Kapasiteler	< 500 g
Şok etkilerinde ve Çarpmalarda	> 2000 g
Uzak Nokta Ölçümleri	< 5000 g
Yakın Nokta Ölçümleri	> 5000 g

Diğer önem gösterilmesi gereken konular, sinyal değişkenliklerini önlemek için seçilen ivme-ölçerleri sisteme iyi bir şekilde montajlamaktır. Burada, sinyal dönüştürme sistemleri, kullanılacak kabloların uygun nitelikte olması da önem kazanmaktadır [34].



3. KIRILMA MEKANİĞİ

3.1. Kırılma Mekanizmasının Tarihsel Gelişimi

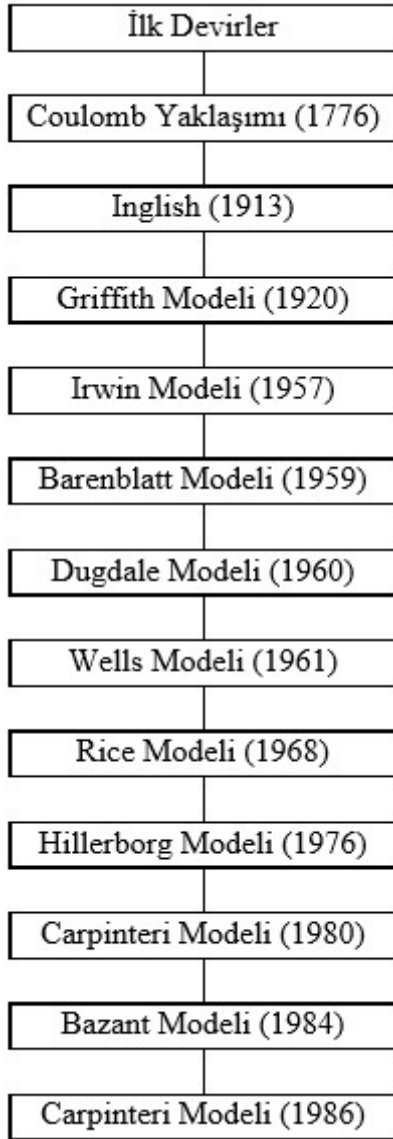
İnsanoğlunun yerleşik yaşama geçtiği tarihlerde büyük yapılar çoğunlukla kaya ve taş bloklardan yığma yapılar halinde inşa edilmiştir. Artan teknolojik imkânlar ile yapılar özellikle çelik ve betonarmeden inşa edilmeye başlanmıştır. Bu yapıların inşası esnasında beklenmedik durumlarla karşılaşmış ve oldukça büyük mühendislik kazaları meydana gelmiştir. Öyle ki II. Dünya Savaşı'nda yapılan gemiler kullanılmadan tahrip olmuş, füzeler hedeflerine ulaşmadan havada infilak etmiştir. Bu olaylar insanoğlunu malzemelerin özelliklerini daha ayrıntılı bir şekilde incelemeye sevk etmiştir [109].

Tarih boyunca insanlar ilk olarak taş ve kayaların yük altındaki davranışları konusunda çeşitli sorunlar yaşamışlardır. Galilei [35,109], “Niçin kütleler kırılır?”, sorusuna cevap aramıştır. Daha sonra Coulomb [36,109] basınç altındaki kayaların kırılması konusunda araştırmalarıyla, malzeme kusurlarının bulunmasına dolayısıyla Kırılma Mekanizmasına öncülük etmiştir.

Kırılma Mekanizması Biliminde ilk adım olarak kabul edebileceğimiz çalışma İngiliz'e aittir. İngiliz [37,109] eliptik bir boşluk çevresindeki gerilme durumunu sonsuz bir levhada incelemiştir. Daha sonra Griffith [38] belki de kırılma mekanizmasının en önemli adımını atmıştır. Griffith, sistemdeki toplam enerji azalmasının, daha önceden var olan bir çatlakın ilerlemesine sebep olacağını ifade etmiştir. Griffith bu çalışması ile Lineer Elastik Kırılma Mekanizması'nın temelini atmıştır [109].

1950'li yılların ortalarında Irwin [39] kırılma mekanizmasında yeni bir dönem başlatmış, “Çatlak ucunda kritik bir gerilme dağılımına ulaşıldığında, kırılma oluşur” diyerek Lineer Elastik Kırılma Mekanizmasının gelişmesine temel oluşturmuştur. 1959 da Barenblatt [40], Irwin'in yaklaşımındaki kırılma süreci bölgesindeki gerilme dağılımının Irwin'in aksine $q(x)$ gibi bir fonksiyon olduğunu kabul edip, probleme daha çok matematiksel olarak yaklaşmıştır. Barenblatt'ın bu çalışmasını başta Dugdale [41] olmak üzere birçok araştırmacı geliştirmiş ve farklı malzemelere uygulamışlardır [109].

LEKM çatlak ucunda sınırlı miktarda deformasyon olduğu durumlarda kullanılabilir. Çatlak ucunda önemli deformasyonlar olduğu durumlarda ise Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) kullanılmaktadır [42,109] EPKM, 1961 yılında Wells'in [43] Çatlak Ucu Açılımı (ÇUA) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar. 1968 yılında Rice [44] çatlak açılım deplasmanını kendi adıyla J integrali yaklaşımıyla bulmuştur. Kırılma mekaniği en büyük gelişimleri 1980'li yılların başlarında göstermiştir. 1976 yılında Hillerborg tarafından kırılma enerjisi yaklaşımı geliştirilmiştir. 1980 yılında Carpinteri [45] Gevreklik İndeksi kavramıyla, 1984 yılında da Bazant'ın [46] boyut etkisi teoremiyle kırılma mekaniği büyük gelişmeler kaydetmiştir. 1986 yılında ise Carpinteri [47] Enerji Miktarı teoremiyle yapısal davranışı sünek ve gevrek malzeme için incelemiştir [48,109].

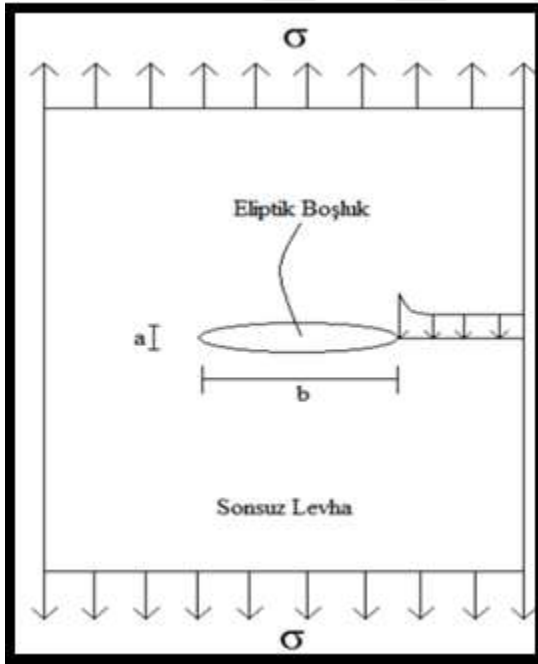


Şekil 3.1. Kırılma mekaniğinde tarihi gelişim aşamaları [109]

3.2. Lineer Elastik Kırılma Mekanikği

Lineer Elastik Kırılma Mekanikği (LEKM) gevrek ve ideal homojen malzemelerde çatlaktaki ilerlemeyi hesaplamak amacıyla kullanılabilir [109]. Çatlağa yakın bölgelerdeki gerilmeler; gerilme yoğunluk faktörü, çatlak uzunluğu ve çatlağa olan uzaklığın bir fonksiyonu şeklinde hesaplandırılabilir [109]. Enerji yaklaşımıyla da enerji salım miktarı esas alınarak çatlaklardaki ilerlemeler hesaplanabilir. LEKM ile ilgili farklı malzeme özelliklerinin saptanmasında çeşitli sorunlar meydana gelmiştir. Bu durum malzeme özelliklerinin saptandığı mezo seviyedeki betonun malzeme yapısının LEKM kurallarına uyan malzemeden tamamıyla farklı olmasından kaynaklanmaktadır [109].

Coulomb'un 1776 yılındaki yaklaşımları, araştırmacıları malzeme kusurlarını daha iyi araştırma düşüncesine itmiştir. 1913 yılında English, sonsuz bir levhada eliptik bir boşluk çevresindeki gerilme dağılımını incelemiştir [109].



Şekil 3.2. Eliptik boşluğa sahip sonsuz bir levha [109]

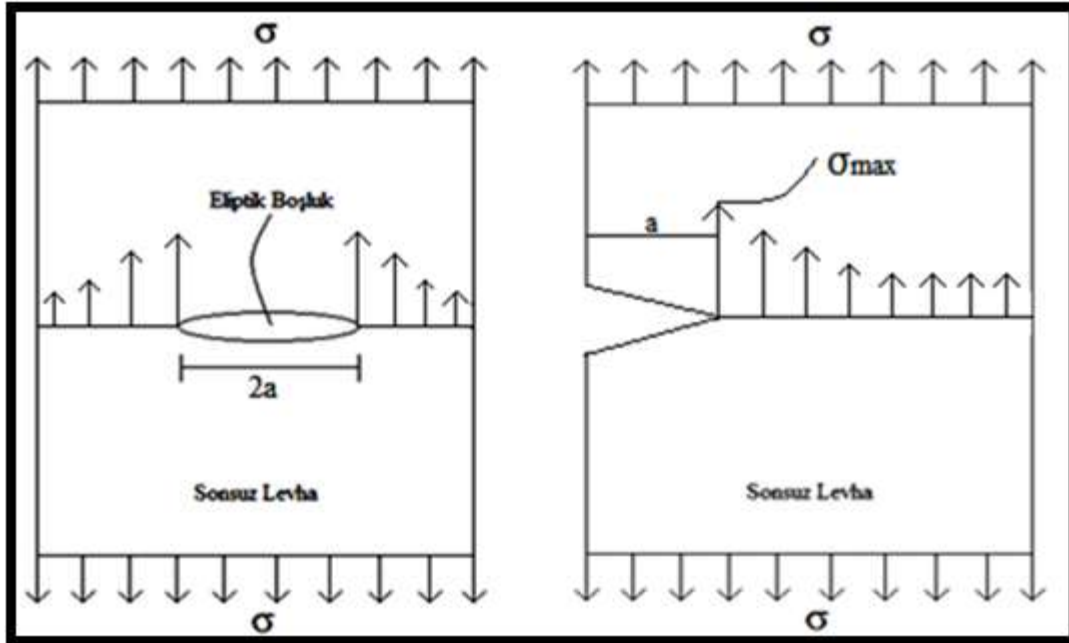
English σ gerilmesi altındaki sonsuz bir levhanın sahip olduğu eliptik boşluk etrafındaki gerilmeyi şu şekilde formüle etmiştir:

$$\sigma_m = K_t \times \sigma \quad (3.1)$$

$$K_t = 1 + 2\left(\frac{a}{b}\right) \quad (3.2)$$

Verilen bu matematiksel modelde a ve b eliptik boşluğun boyutları, σ eliptik boşluğun çevresindeki maksimum gerilme, σ sonsuz levhaya uygulanan gerilme, K_t ise gerilme yoğunluk faktörüdür. English teorisinde bahsettiği matematiksel modelin tüm malzemeler için geçerli olduğunu düşünmüş, malzemelerin sünek veya gevrek olmasının fark etmediğini savunmuştur [109].

English'in çalışmaları kırılma mekaniğine öncü olmuştur. 1920'li yıllarda Griffith, English'in teorisini daha da ileriye götürmüş ve LEKM'nin temellerini atmıştır. Griffith cam lifler üzerinde yaptığı deneylerde, teorik mukavemetin, elastisite modülünün %10'u ($E/10$) civarında olduğunu ve malzemenin gerçek mukavemeti ile arasındaki bu farkın malzeme bünyesindeki kusurlar nedeniyle oluştuğunu tespit etmiştir [109].



Şekil 3.3. Çatlak ve çentik ucundaki gerilme yığılmaları [109]

Malzemeye uygulanan gerilme çok küçük olmasına rağmen bu bölgede oluşan gerilme yığılması nedeni ile teorik kohezif mukavemete ulaşmak mümkündür. Nitekim Griffith'in cam liflerin dayanımlarının normal plaka camlarına göre daha yüksek mukavemet göstermesini göz önüne sermesi bunun açık ispatıdır [109].

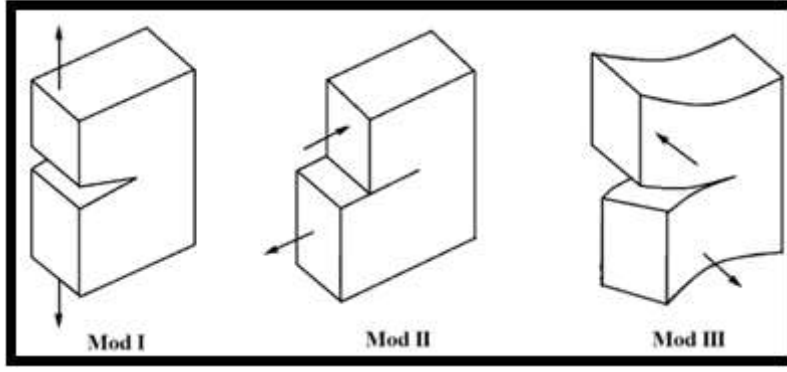
$$\sigma^2 \geq \frac{2\gamma E}{\pi a}, (2\gamma=G) \quad (3.3)$$

Bu formülde “ γ ” yüzey enerjisini, E elastisite modülünü, a çatlak boyunu ve σ da levhaya uygulanan gerilmeyi göstermektedir. Griffith kırılma konusuna enerji ile yaklaşmış ve gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik şekil değiştirme enerjisinde bir azalma olduğunu, bunun da yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjiyi meydana getirdiğini savunmuştur. Bu teori gevrek katılarda teorik mukavemetin tahminine yaradığı gibi kırılma mukavemeti ile kusur boyutu arasındaki ilişkiyi de verir [109].

Griffith yaklaşımı, 1944’de Zener ve Hollomon [48] tarafından metalik malzemelerin gevrek kırılmasında da uygulanmıştır. 1950’lerin ortalarında Irwin [39] kırılma mekaniğinde yeni bir dönem başlatmıştır. Griffith’in teorisi cam gibi tam gevrek malzemelerde çatlağın yayılması için ihtiyaç duyulan gerilmenin değerini vermektedir. Çatlağın yayılmadan öncesi veya sonrası hakkındaki herhangi bir bilgiyi içermemektedir. Irwin, seramik lifler üzerinde yapmış olduğu deneylerde teorik mukavemetin E/10 civarında olmadığını görmüş ve teoriyi metalleri de (plastik şekil değiştirme yeteneğine sahip malzemeler) içine alarak genişletmiştir. Daha sonra sırasıyla çekme, kayma ve burulma durumlarına karşılık gelen üç yükleme durumu mod I, mod II, mod III genel kırılma modlarını ve bunların birleşiminden oluşan karışık modun kanunlarını ve K adı verilen gerilme yoğunluk faktörünü ortaya koymuştur [49,109].

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma \sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= \tau \sqrt{\pi a} \\ K_{III} &= \tau \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Denklemlerde σ malzemeye uygulanan çekme gerilmesi, τ kayma gerilmesi ve a yarı çatlak uzunluğudur.



Şekil 3.4. Kırılma modları [109]

Gerilme yoğunluk faktörü, yükleme durumuna ve geometriye bağlı bir sabittir. Yani her malzeme aynı geometride ve eşit yükleme durumunda ise bu değer sabit kalacaktır. Bu yüzden gerilme yoğunluk faktörü bir malzeme sabiti değildir [109]. K , belirli bir kritik değer olan K_c değerine ulaştığında her malzeme için farklı bir değer ve kırılma tokluğu adını alır. Mod I durumu için b numune genişliği, d numune yükseklik boyutu ve P kırılma yükü olarak alınırsa, nominal dayanım $\sigma_N = P/(b.d)$ olmak üzere kritik gerilme şiddet çarpanının ifadesi [109];

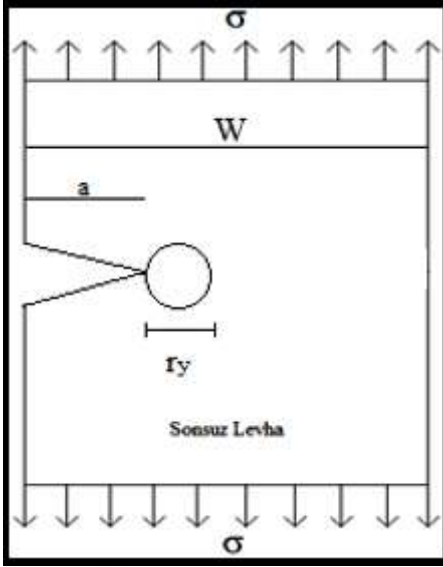
$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{d}\right) \quad (3.5)$$

şeklindedir.

Ancak yayılma hızı ve çatlak başlangıcının mühendislik bakımından daha önemli olması sebebiyle, Irwin, G_C çatlak yayılma hızı kavramını ortaya koymuş ve K_C ile arasındaki bağıntıyı şu formülle vermiştir;

$$G_C = \frac{K_C^2}{E} \quad (3.6)$$

Irwin plastik deformasyon esnasında yapılan işin yanında, sünek malzemelerde yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli olan enerjinin çok daha önemsiz derecede olduğunu savunmuştur [109]. Böylece çatlak yayılma hızı kavramını tanımlamıştır [109].



Şekil 3.5. Kırılma süreci bölgesi [109]

Şekil 3.5’de r_y kırılma süreci bölgesi uzunluğu, W levhanın genişliği, a çentik boyunu ifade etmektedir. Irwin, çatlağın hemen ucunda Kırılma Süreci Bölgesi adı verilen bölgede gerilme dağılımının sabit ve değerinin malzemenin akma dayanımına eşit olduğunu kabul etmiştir.

$$r_y = \frac{1}{\pi} \frac{K_{Ic}^2}{f_t^2} = \frac{1}{\pi} \frac{E \cdot G_c}{f_t^2} \quad (3.7)$$

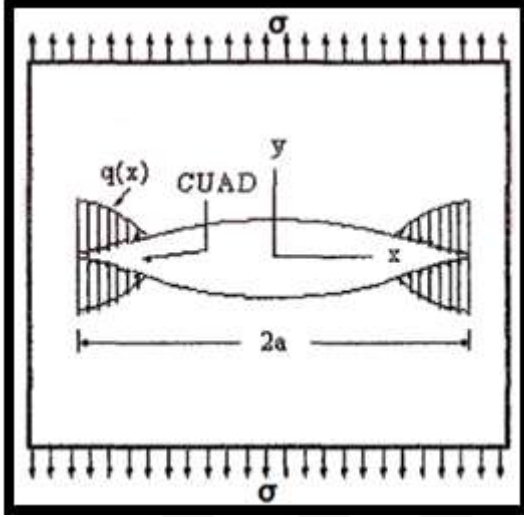
Bu denklemde f_t malzemenin çekme dayanımı, E elastisite modülüdür. Irwin’in, “enerji yaklaşımı, gerilme yoğunluğu yaklaşımıyla eşdeğerdir”, teoremi diğer birçok araştırmacıya da başlangıç noktası olmuştur [109].

LEKM, çatlak ucunda sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ucunda önemli miktarda plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği devreye girer (EPKM) [109].

3.3. Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği

1960’lı yılların başında Dugdale [41] ve Barenblatt [44] gibi bazı araştırmacılar Irwin’in aksine, çatlağın ucundaki kırılma süreci bölgesindeki gerilme dağılımının, Şekil 3.6’da

görüldüğü gibi $q(x)$ gibi bir fonksiyon olduğunu kabul etmişler ve probleme bu şekilde matematiksel açıdan yaklaşmışlardır [109].



Şekil 3.6. Barenblatt'ın kohezif çatlak modeli [109]

EPKM, Wells'in 1961 yılında çatlak açılması (COD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar. Daha sonra Billby, Cotrell, Swindon [50] ve Dugdale, Barenblatt'ın teorisini ince elasto-plastik levhalara uygulamışlar ve çatlak ucunda Çatlak Ucu Açılım Deplasmanı (CTOD) terimini ortaya atmışlardır [109].

Çatlak açılım deplasman metotlarından birisi de Rice tarafından geliştirilen J integrali yaklaşımıdır [44,109]. Ana prensip iki boyutlu bir çatlak durumu için çatlak çevreleyen bir yol boyunca hesaplanan şekil değiştirme enerjisinin yoğunluğunu bulmak üzere oluşturulmuştur. Green fonksiyonu ana prensiptir. Bu fonksiyon kapalı bir alanı, alanı çevreleyen eğri üzerinden giderek bulur [109].

1970'li yıllardan sonra ise Hillerborg [51] ve Carpinteri'nin [46] yaptığı çalışmalar sonucu CTOD, kritik bir değeri olan w_C 'ye ulaştığında ise çatlak anı olarak ilerleyeceğini ve bunun bir malzeme sabiti olarak kullanılabileceğini ispatlamışlardır. G_C ile w_C arasındaki ilişkide denklemdeki gibi tanımlanmıştır. Denklemde σ_Y akma dayanımıdır.

$$G_C = \sigma_Y \cdot w_C \quad (3.8)$$

4. BETONUN KIRILMA MEKANİĞİ

4.1. Giriş

Beton, çimento, su, ince ve iri agrega karışımından oluşan heterojen bir malzemedir. Ayrıca içerisinde farklı boyutlarda ve değişik nedenlerle meydana gelmiş gözenekler (boşluklar) ve mikroçatlaklar bulunur. Bu içyapıdaki karmaşıklığından dolayı beton kırılma mekaniği açısından önemli düzeyde araştırma konusu olmuştur [109].

Kırılma mekaniğinin temelinde bulunan malzeme kusurlarının varlığı beton için daima var olan bir gerçektir. Bu kusurlar;

1. Çimentonun hidratasyonu sonucu, çimento hamurunda (matriks) meydana gelen 15-20 A° boyutundaki jel gözenekleri [52, 109],
2. Çimento hamurunda daha büyük boyutlarda kılcal gözenekler ve çapları 1 mm'ye kadar ulaşabilen uygun olmayan su/çimento oranından kaynaklanmış sıkıştırma boşlukları,
3. Sıcaklık ve hacim değişimlerinin neden olduğu özellikle agrega ile matriks ara yüzeyinde oluşan mikroçatlaklar,
4. Taze betonun kusması ve iri agrega danelerinin farklı çökme hızları sonucu oluşmuş ayrışma mikroçatlaklarıdır.

Tüm bu kusurlar dikkate alındığında; belirli bir gerilme altında kırılma mekaniği yaklaşımıyla betondaki göçme; bu kusurlardan en kritik olan/olanların, en kritik gerilme yığılması noktalarını seçerek, tek başına veya diğer çatlaklarla birleşerek dengesiz yayılması sonucu meydana gelir. Bu arada diğer çatlaklar oluşmaya ve yayılmaya başlayacaktır [109].

4.2. Griffith Teorisi ve Betona Uygulanması

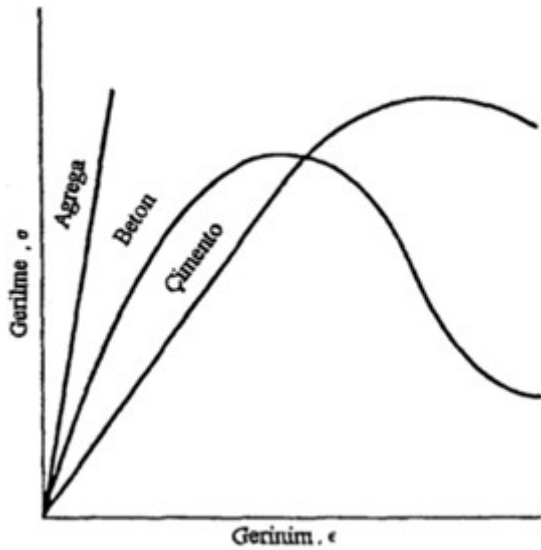
Neville [53] Griffith teorisini betona uygulayan ilk araştırmacıdır. Neville, beton içerisindeki kusurların rastgele dağılım gösterdiğini ve numune boyutu ile bağlantılı olduğunu savundu. Böylece betonda ilk defa boyut etkisinden bahsediliyordu. Neville'in bu yaklaşımı Weibull'un [54] "zayıf bağ" (weakest link) teorisini esas almıştı [109].

dayanımındaki azalma, gerilme-gerinim eğrisinin non-lineerliğini artırır [109]. Yüksek dayanımlı betonlarda matriks ve agregâ rijitlikleri birbirlerine yakın olduğundan gerilme-gerinim eğrisi lineere yakındır [109].

4.4. Betonda Kırılma Mekanizması

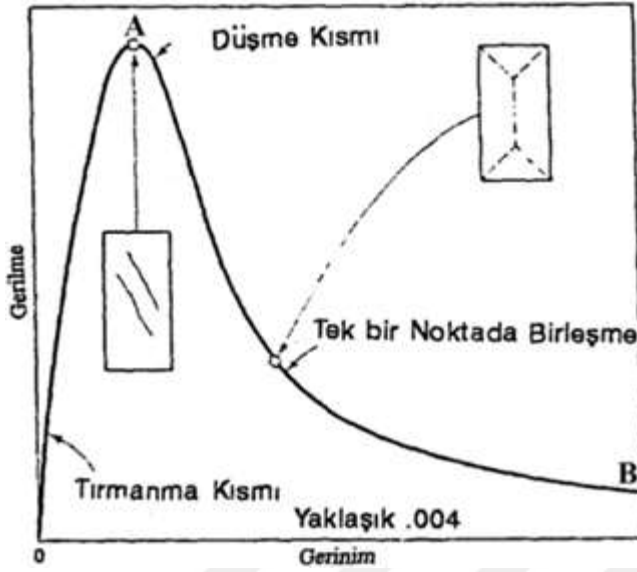
Diğer gevrek malzemelerde de olduğu gibi betonda da kırılma işlemi üç aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar; çatlak başlangıcı, yavaş çatlak büyümesi ve ani çatlak büyümesi safhalarıdır [55,109].

Dayanımın %30'una kadar olan gerilme-gerinim eğrisinin lineer kabul edilmesi mümkündür. Bu oranın altında bağ çatlakları mevcut olmasına karşın stabildirler ve büyümeye meyillidirler. Bağ çatlaklarına ek olarak imalat hatalarından kaynaklı büyük çatlaklar da bulunabilir, fakat bu çatlaklarda %30 gerilme oranına kadar stabil olmasına karşın gerilme-gerinim eğrisinde az miktarda bir non-lineerlik meydana getirirler. Gerilme oranının %30-50 olduğu aralıkta çatlaklar çok yavaş olarak yayılmaya başlarlar. Gerilme-gerinim eğrisinin eğriliği artmaya başlar. Bu çatlaklar gerilme oranının %50'yi aştığı durumlarda büyür ve bağ çatlaklarıyla birleşerek “sürekli çatlak sistemini” oluşturmaya başlarlar (mikroçatlakların, makroçatlaklar halini alması). %75 gerilme oranının üstünde çatlakların yayılımı stabilitesini kaybeder ve sonuçta göçmeyi meydana getirir [109].

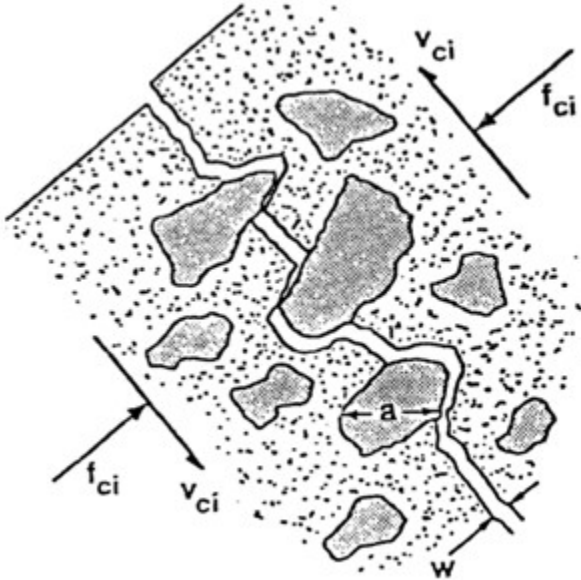


Şekil 4.2. Agregâ, çimento ve betonun karakteristik gerilme-gerinim eğrisi

Şekil 4.3'teki eğrinin OA kısmı pekleşme kısmı olarak adlandırılır. Maksimum yüke erişildiğinde diyagonal çatlaklar görülür. AB kısmına eğrinin yumuşama kısmı adı verilir, beton bu kısımda yumuşamaya başlar. Yaklaşık $\epsilon = 0.004$ değerinde çatlaklar bir noktada birleşmeye başlar ve çatlamış kısımlar arasında agregalar birbirine sürtünerek Şekil 4.4'te görüldüğü gibi "agrega kilitlemesi" adı verilen olayı meydana getirirler [56,109].



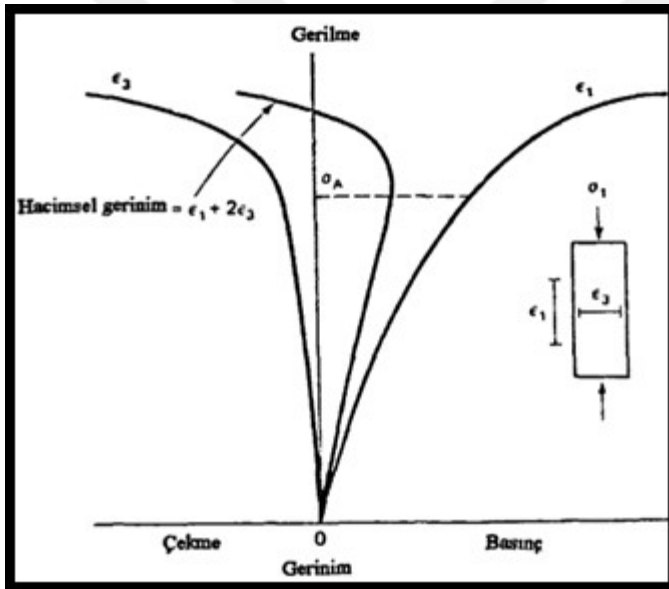
Şekil 4.3. Betonun gerilme-gerinim eğrisinin uç noktası [109]



Şekil 4.4. Agregaların kilitlemesi [109]

Temelde çatlamış paralel iki yüzey birbiri üzerinden kaymaya zorlanırsa, agregalar, oluşan kesme kuvvetini, harç kısmı ile sürtünerek karşılamaya çalışırlar. Bu olay maksimum yükten sonra bile betonun taşıma gücünü artıran bir mekanizmadır [109].

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi matriks çatlak başlangıcı σ_A gerilmesi üzerinde ϵ_3 den ϵ_1 ' e kadar olan artma poisson oranındaki artışa benzediği görülmektedir. Betonun basınç altında çatlak yayılımı hızlandığında numune hacminde artma meydana gelir. Bu artış çatlaklardaki büyük artış sebebiyle meydana gelmektedir. Bu durum betonun kompozit yapısı ile de yakından ilgilidir. Çünkü basınç altında zorlanan matriksin hacmi göçme meydana gelene kadar sürekli artmaktadır [109].



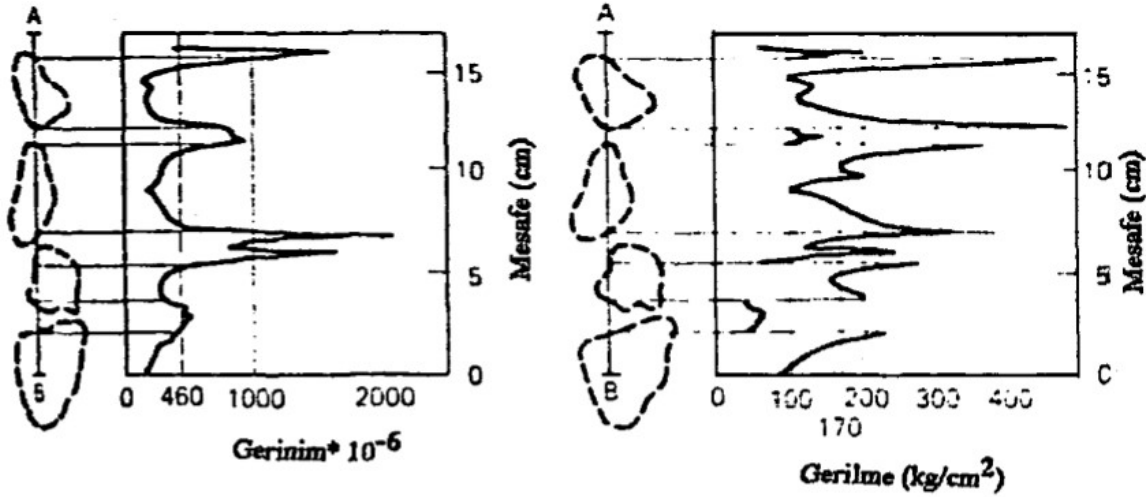
Şekil 4.5. Tek eksenli basınç altında betonun karakteristik gerilme-gerinim eğrisi [109]

Hacimsel gerinim oranı ϵ_v gerilme oranı %75 civarında minimal değerdedir ve ϵ_{vmin} gerilme süreksizlik noktası olarak adlandırılır [57, 58, 109].

4.5. Göçmede Agrega Etkisi

Beton içerisindeki gerilme dağılımı mikroskopik düzeyde incelendiğinde Şekil 4.6'daki gibi çok karmaşık bir yapıdadır. Betonun heterojen yapıda olması ve agreganın düzensiz geometrisinden ötürü matriks ile agrega ara yüzeyinde çeşitli boşluklar meydana gelir. Dolayısıyla bu bölgelerdeki yüksek gerilme yığılmaları, uygulanan nominal gerilmeden

tamamıyla farklı olacaktır. Şekil 4.6'daki çalışma [59,109] basınç altındaki beton numunelerin yüzeyinde fotoelastik tabakalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Maksimum gerinim ortalama gerinimden 4-5 kat, gerilmeler ise 2 kat büyüktür. Ara yüzeylerde meydana gelen yüksek gerilmeler çatlağın bu bölgelerde yayılmasına sebep teşkil eder.



Şekil 4.6. Tek eksenli basınçta agrega-matriks arayüzünde gerilme ve gerinim [109]

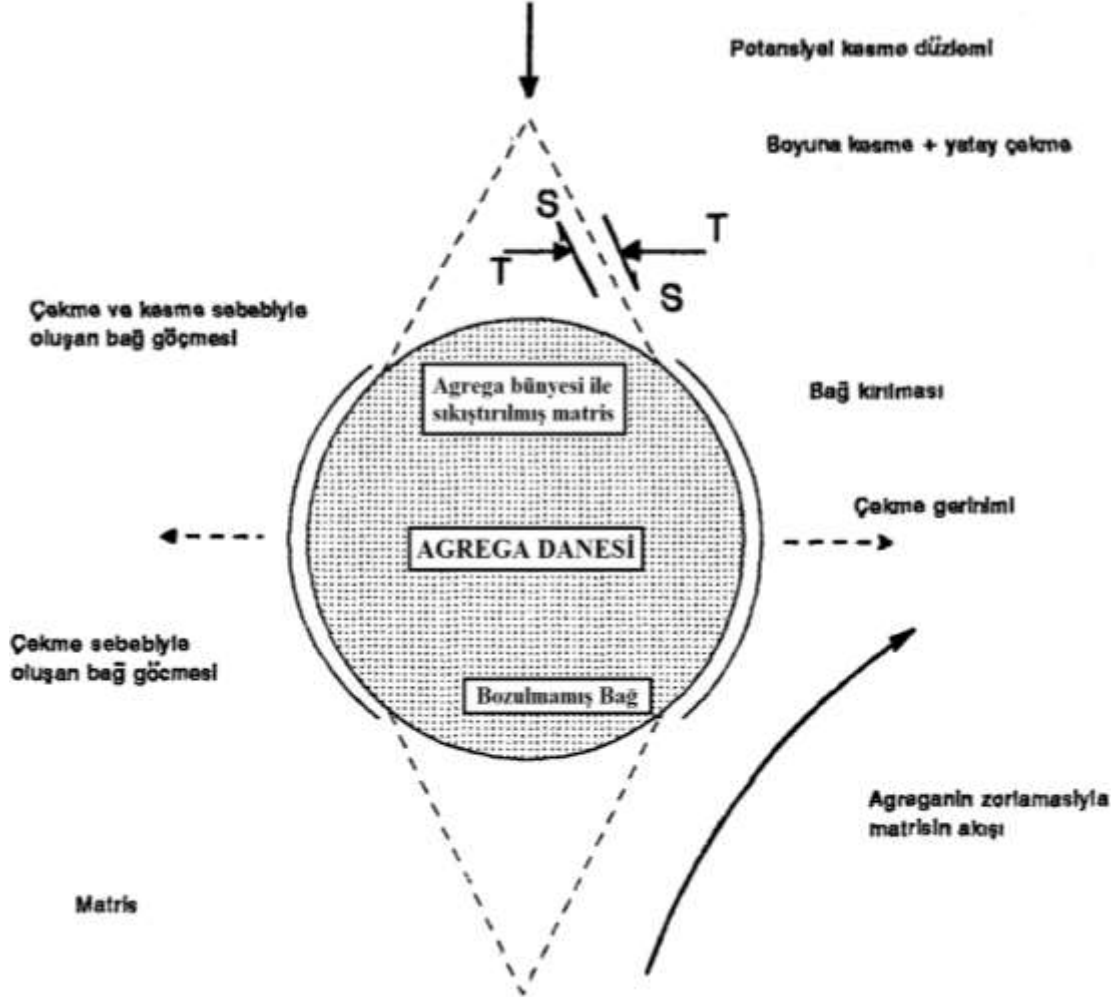
Şekil 4.7'de basınç altındaki bir beton numuneden idealize edilmiş bir agrega parçacığı görülmektedir. Buradan da anlaşılabileceği üzere gerilmeler agrega kenar kısımlarında maksimum değer alırken agrega ortasında düşük değerde kalmıştır. Normal betonda parçacık matriksten daha rijittir [109]. Gerilme analizi ile göçme şöyle tasvir edilebilir;

1. Agrega ile matriks arayüzeyinde çekme gerilmelerinden dolayı oluşan bağın kaybolması sonucu göçme,
2. Agrega ile matriks arayüzeyinde kesme gerilmelerinden dolayı oluşan bağın kaybolması sonucu göçme,
3. Matrikste meydana gelen kesme ve çekme deformasyonu sonucu göçmesi,
4. Nadir olarak meydana gelen agrega hasarı sonucu göçme [109].

Betonda agreganın varlığından dolayı anizotropluk meydana gelir ve bu anizotropluk betonun karakteristik göçme ve deformasyonunun açıklanmasında etkilidir. Bu anizotropluk basınç etkisi altında dahi, agregada çekme gerilmeleri meydana getirir [109].

Gerilmeler bu bölgelerde teorik kohezif mukavemete ulaştığından, çatlak büyümeye başlar. Basınç göçmesi durumunda çatlaklar yükleme eksenine paralel olarak (deneysel bulgulara

göre) ilerlerler. Göçme ilk önce malzemenin mikro yapısında, daha sonra da malzemede oluşan yatay çekme gerilmeleriyle meydana gelir [60, 109].



Şekil 4.7. Tek eksenli basınç altında idealize edilmiş bir agrega partikülü [109]

4.6. Çatlak Yayılmını Önleyici Etkenler

Çatlağın uzamasındaki enerji dış yüklerin yaptığı işten veya betonda depo edilen gerinim enerjisi değişiminden kaynaklanır. Bu enerji kavramından hareketle geleneksel betonda çatlağın yayılmasını engelleyen en önemli etken agregadır. Zira matriks içerisinde ilerleyen çatlak bir agrega ile karşılaşırsa minimum enerji prensibine göre ya agrega içerisinden ya da agreganın çevresinden ilerleyecektir [109]. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise bu durum biraz daha farklıdır. UYDB'larda çimento pastasının dayanımı çoğu zaman agrega dayanımından daha büyüktür. Bu sebeple çatlaklar daha düşük kırılma enerjisine sahip kesitten yani agrega yüzeyinden ilerlerler. Çatlağın ilerlemesine engel

olan diğerk bir mekanizma ise çatlak ucunda yeni mikroçatlakların oluşmasıdır. Tek bir çatlağın yerine, çatlaklar birbirlerine gerilme aktarımı yaptığından, bu durum yeni yüzey oluşumunun yanı sıra enerji gereksinimini de artırır. Daha sonra bu yeni mikroçatlaklar birleşerek makroçatlaklar haline gelirler ve numuneyi boydan boya kat ederler [109].

Yukarıdaki etkenlerin dışında, beton içerisinde bulunan hava boşlukları ve gözenekler çatlak ucunda eğrilik yarıçapını artırdığından çatlak dallanmalarına sebep olurlar ve bu yüzden çatlağı engelleyici unsurlardandır [109].

4.7. Betonun Kırılma Parametrelerini Tespit Çalışmaları

LEKM'i ilk defa Kaplan 1961'de betona uygulamıştır [61, 109]. 3x3x16 inç ve 6x6x20 inçlik ve çentik derinliği değişken olan harç ve beton numunelerde üç noktalı ve dört noktalı eğilme deneyleri yapmış ve sonuçları elektron mikroskopuyla gözlemlemiştir. Kaplan'ın bu bulguları şu şekilde özetlenebilir [109]:

1. G_c farklı çentik derinliklerinde yaklaşık sabittir.
2. G_c dört noktalı eğilme testinde üç noktalı teste nazaran %15 daha küçüktür.
3. G_c küçük kirişlerde büyüklüklerine nazaran %38 daha azdır.
4. G_c betonun yüzey enerjisinden 12 kat daha büyüktür.

Daha sonra Irwin [62], Kaplan'ın yapmış olduğu çalışmayı desteklemiş ve kritik yüke ulaşan bir numunede etkili çatlak derinliğini tespit etmek için G_c değerinin bilinmesinin metallerde olduğu gibi beton için de gerekli olduğunu savunmuştur [109].

Naus ve Lott [63], betonun kırılma sağlamlığını tayin etmek için tek çentikli 2x2x12 inç ve 4x4x12 inçlik kirişlerde; harç, çimento hamuru ve beton üzerine dört noktalı eğilme deneyleri yapmış aşağıdaki bulguları elde etmişlerdir [109]:

1. K_c çimento hamurunda ve matrikste su/çimento oranının artmasıyla azalırken betonda sabit kalmıştır.
2. K_c numunedeki hava boşluğunun artmasıyla azalır.
3. K_c zamanla artar.
4. K_c maksimum agrega boyutu arttıkça artar.
5. K_c kaba kum/çimento oranının artmasıyla artar.
6. K_c matrikste ince kum/çimento oranının artmasıyla artar, betonda ise azalır.

Carpinteri fiziksel olarak benzer olan numunelerde, Buckingham-Pi teoremi kullanarak, betonda ve harçta K_{1C} , G_{1C} , J_{1C} kırılma parametrelerini tespit etmiştir. Çalışma hem deneysel hem de analitiktir [109]. Numunelerde, maksimum agrega boyutu ve çentik derinliği değişken olarak alınmıştır. Çalışmalarının sonucunda karakteristik çentik derinliği 0,25-0,30 arasında olduğunda, K_{1C} 'nin arttığını ve sonra sabit kaldığı gözlemlemiştir. Ayrıca boyutsuz bir “gevreklik sayısı” ifadesi tanımlanmıştır [64,109]:

$$s = K_{1C} / \sigma_u \cdot d^{1/2} \quad (4.2)$$

Burada d numune derinliğidir. Çalışmalarda bu ifadenin $s > 0,50$ olduğu tespit edilmiştir.

Mindess ve arkadaşları 3x3x14 inçlik tek çentikli kirişlerde dört noktalı eğilme deneyi yaptılar. Çimento harcı, normal beton ve 8 değişik çelik ve cam lifli beton numuneler üzerinde K_c , G_c ve J_c değerlerini tespit ettiler [109]. Lif miktarı hacmin %75’inden az olduğu durumlarda kırılma davranışına etkisinin çok az olduğunu tespit ettiler. J_c çok lif ihtiva eden malzemelerde lif hacmiyle korelasyon oluşturduğunu buna karşılık, normal lifli betonlarda K_c ve G_c 'nin etkilenmediğini tespit ettiler. Böylece J_c 'nin betonda K_c ve G_c e nazaran daha iyi bir yaklaşım olduğunu savundular [65, 109].

Betonda kırılma parametrelerinin tespiti için yapılan çalışmalar daha çok Mod I durumunu inceleyen deneylerdir. Bununla beraber Barr ve Bear, betonda eksantrik basınç deneyi yapmışlar ve K_c 'nin çentik derinliği ile ters orantılı bir değer aldığını savunmuşlardır [66,109]. Naus, beton malzemedan yapılmış düzlem şeklindeki bir levhada merkezinde çentikli ve sadece çentiği zorlanan numunelerde yaptığı deneyde, çentik dibinde çok büyük bölgesel gerinimler gözlemlemiş ve K_c değerlerini belirlemiştir [67, 109]. Mindess ve arkadaşları çimento hamuru üzerinde burulma deneyleri yapmışlar ve K_c değerini tespit etmişlerdir [68, 109].

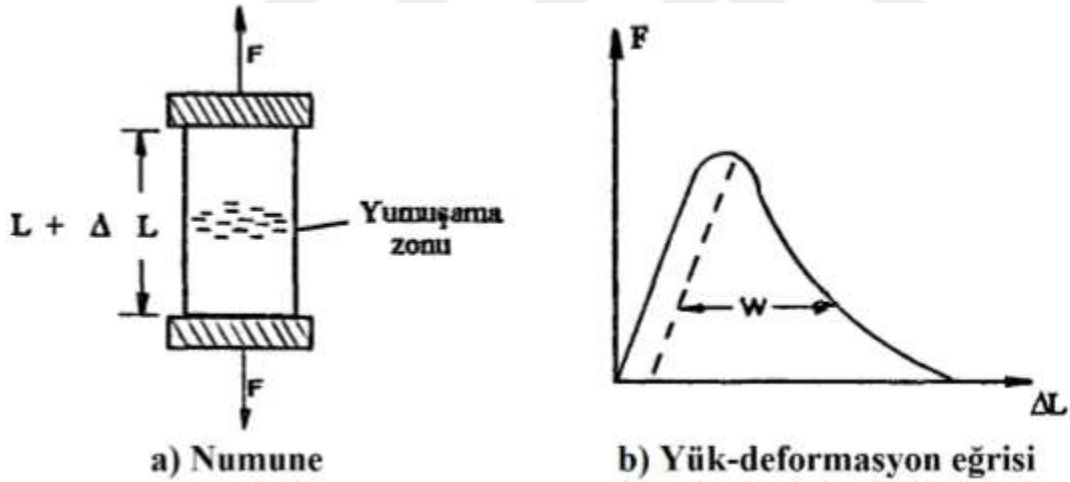
4.8. G_F Kırılma Enerjisi

Beton çekme kuvveti altında diğer malzemelerden farklı davranış gösterir. Metallerde kırılmadan önce çok büyük yanal deformasyonlar ve kayma deformasyonları gözlemlenir. Betonda ise kırılma mikroçatlakların büyüyerek makroçatlaklar haline gelmesiyle meydana

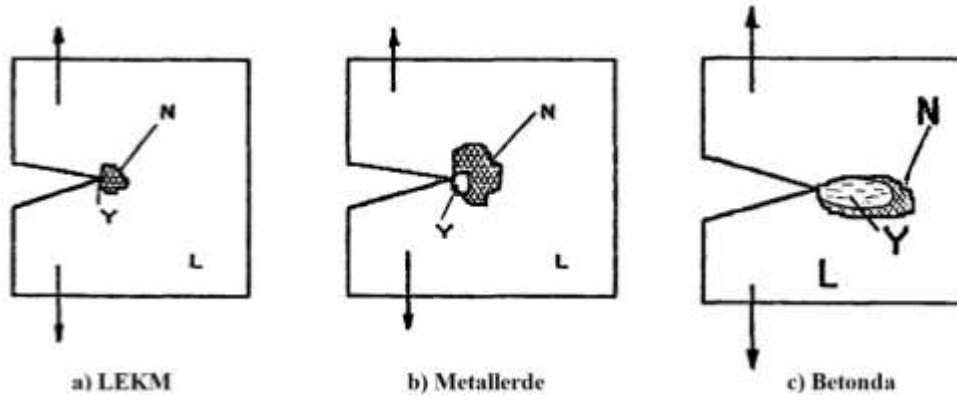
gelir ve bu durum esnasında yanal deformasyonlar oluşmaz. Dolayısıyla betonun davranışı metallere göre daha basit teorik modeller ile incelemek mümkündür [109].

Şekil 4.8’de deformasyon kontrolü ile yapılan bir çekme deneyinde yük-deplasman grafiği görülmektedir. Deformasyon miktarı arttıkça eğri bir pik noktaya erişmekte ve daha sonra eğri eğimi azalmaktadır. Artan deformasyonlar altında eğrideki bu azalmaya “yumuşama gerinimi” denir. Yumuşama gerinimi malzemenin dar bir bölgesinde meydana gelir ve bu bölgede “yumuşama bölgesi” veya “kırılma işlem zone” adı verilir. Bu bölgede pik yükten sonra deformasyonlar artmasına karşın numunenin geri kalan kısmında azaldığından yük-deplasman eğrisinde bir düşüş gözlemlenmektedir [69,109].

Yumuşama bölgesi LEKM’nde göz önüne alınmaz (Şekil 4.9a). Metallerde plastik bölgenin yanında ihmal edilebilecek düzeydedir (Şekil 4.9b). Betonda ise bu alan diğer mevcut olan alanlara göre büyük bir yer işgal eder (Şekil 4.9c) [109].



Şekil 4.8. Direkt çekme deneyinde betonun yük-deformasyon eğrisi [109]

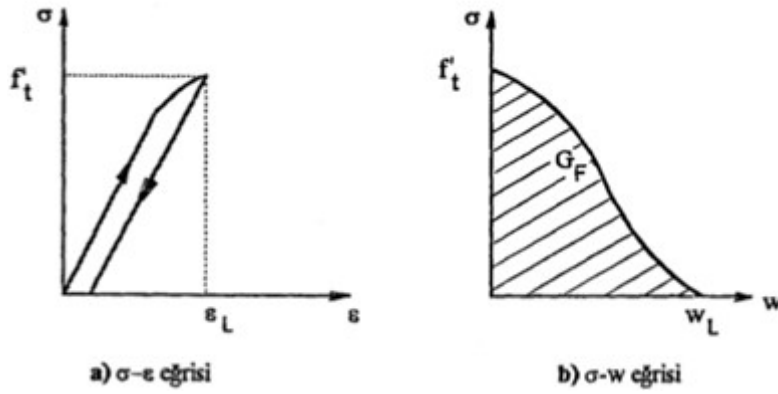


Şekil 4.9. Değişik malzemelerde N non-lineer, Y yumuşama, L lineer alanlar [109]

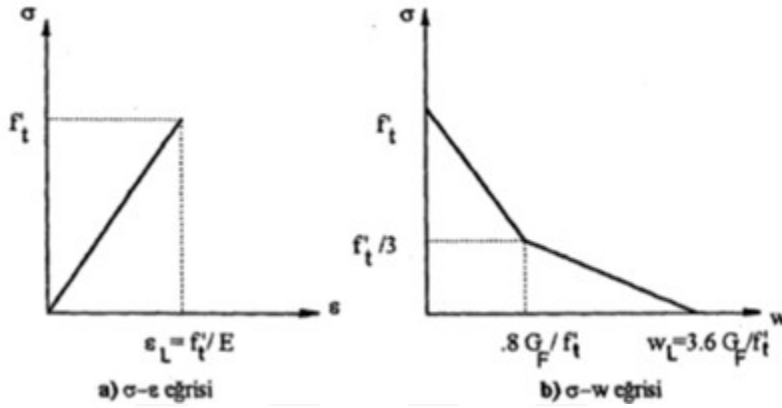
Fakat betonarme yapıların tasarımında bu alanlar göz önüne alınmaz. Hâlbuki bu alanlar betonarme yapı elemanlarında küçük olmayıp, maksimum yükleme altında 100 mm'nin üstünde değerler alabilmektedir. Öte yandan bu alanlardaki gerilmeler sabit kalmayıp, azalmaktadır. [109]

Çekme deneylerinde, beton numunenin kırılma durumuna kadar, numune içerisinde absorbe edilen toplam enerji gerilme-deformasyon eğrisinin altında kalan alana eşittir. Bu enerji iki kısma ayrılabilir [109]:

1. σ - ϵ eğrisi altında kalan alan tüm numunenin birim hacim başına düşen enerji miktarını verir (Şekil 4.10a).
2. σ - w eğrisi altında kalan ise yumuşama alanı içerisinde absorbe edilen enerji miktarını verir ve G_F olarak adlandırılır. Burada w yumuşama alanı nedeniyle oluşan ek deformasyonu belirtir. Bu nedenle G_F kırılma yüzeyinin birim alanına düşen kırılma enerjisi olarak tarif edilebilir (Şekil 4.10b). Bu iki eğri Şekil 4.11 a,b' deki gibi idealize edilebilir [70, 109].



Şekil 4.10. Betonun σ - ε ve σ - w eğrileri [109]



Şekil 4.11. Beton için nümerik hesaplarda kullanılan gerilme-gerinim eğrileri [109]

4.8.1. Deney yöntemleri

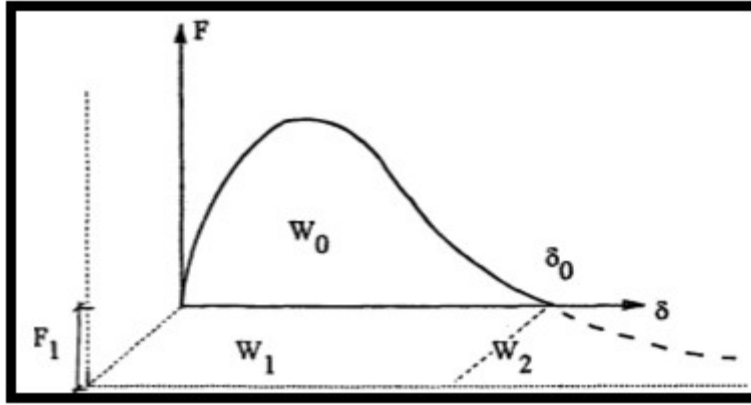
G_F 'nin belirlenmesi için direkt yol eksenli çekme deneyidir. Bu deneyde numunenin gerilme-deformasyon eğrisi tam olarak belirlenmelidir. Bu deney stabil olmalıdır ve ani sıçramalar yapmayacak biçimde deformasyonlar artırılmalıdır [109].

Direkt çekme deneyinde yalnızca G_F 'nin sayısal olarak çözümü için gerekli olan E , f_c gibi malzeme özellikleri belirlenir [109].

Fakat bu deneyi stabil olarak uygulamak güçtür ve yalnızca çok iyi donatılmış laboratuvarlarda bu deney yapılabilir. Çentikli numuneler üstünde stabil eğilme deneyleri yapmak çok daha kolaydır. Bu tip bir testin genel amacı, numune iki eşit parçaya bölündüğü zaman absorbe edilen enerji miktarıdır. Bu enerji kırılma kesit alanına bölündüğünde G_F kırılma enerjisi belirlenir [71, 109].

Deney sırasında kiriş yalnızca yük artırmakla değil aynı zamanda kiriş ağırlığı ve deney ekipmanlarının ağırlığı ile de zorlanır. Sonuç olarak yük-deplasman eğrisi ölçüldüğünde toplam absorbe edilen enerji miktarı bulunamaz [109]. Şekil 4.12’de W_1 ile belirtilen ek iş, deney ekipmanının ve kirişin etkisi F_1 ’den kaynaklanan $F_1\delta_0$ işidir. Yaklaşık olarak $W_1=W_2$ olduğundan bu durumda toplam absorbe edilen enerji:

$$W = W_0 + 2 F_1 \delta_0 \quad (4.3)$$

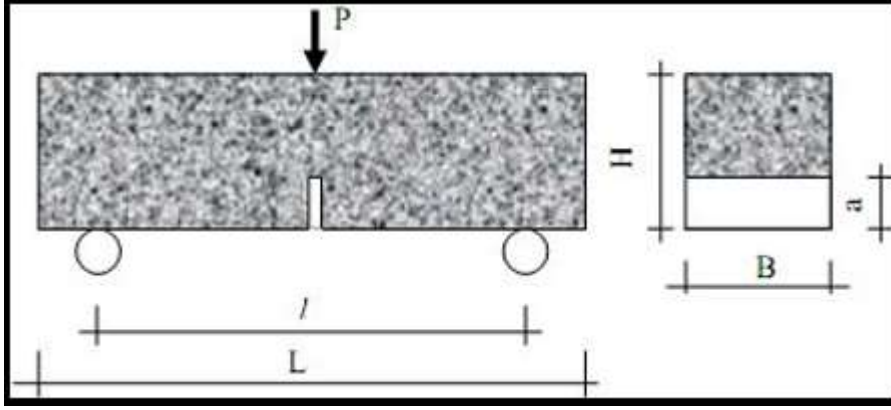


Şekil 4.12. Üç noktalı eğilme deneyine ait yük deformasyon eğrisi ve ilave alanlar [109]

G_F ’nin belirlenmesinde kullanılan başka bir formül de şu şekildedir [71, 109]:

$$G_F = \frac{W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0}{A_{lig}} \quad (4.4)$$

Bu ifadede, W_0 yük-deplasman eğrisi altında kalan alan, m kirişin mesnetler arasında kalan kısmının kütlesi, δ_0 kirişin göçme anındaki deformasyonu, g yerçekimi ivmesi ve A_{lig} ise çentik açıldıktan sonraki etkin alandır ($A_{lig}=(H-a) \cdot b$). Kırılma enerjisinin birimi N/m veya Joule/m²’dir [109].



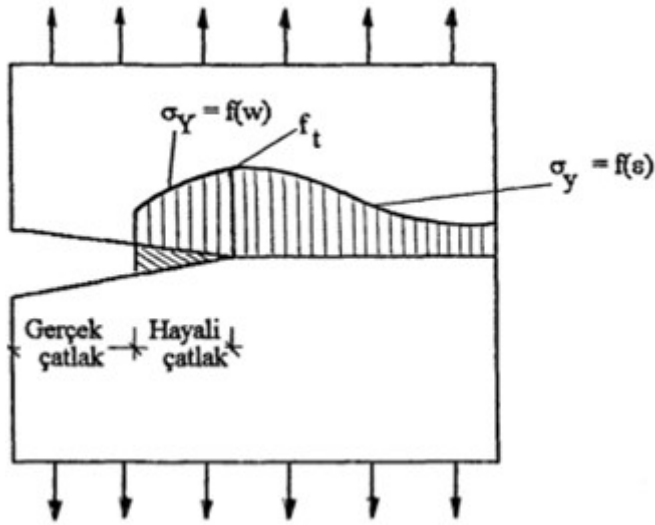
Şekil 4.13. Üç noktalı eğilme deneyinde G_F hesabı için verilen boyutlandırmalar

4.8.2. G_F 'nin belirlenmesinde sayısal yöntemler

Fiktif çatlak modeli

Mod I durumundaki çentikli bir numuneye Şekil 4.14'deki gibi çekme gerilmeleri etkimektedir. Bu gerilmeler altında çatlak ucundaki gerinim değeri ε_L 'yi (Şekil 4.11a) aşacak ve çatlağın ucunda kırılma alanı gelişecektir. Hillerborg buradaki problemin sayısal çözümü (SEM = Sonlu Elemanlar Metodu) için bir hayali çatlağın varlığını ve bu çatlağın gerilmeleri hayali çatlak genişliğine bağlı olarak $\sigma(w)$ aktardığını kabul etmiştir [72, 109]. Hayali çatlağın ucu σ - ε 'a bağlı alan ile σ - w 'ya bağlı alanların kesişim noktasıdır ve hayali çatlağın hemen ucunda $\varepsilon = \varepsilon_L$ ve $\sigma = f_t$ 'dir [109].

Kuvvetlerin artışı esnasında hayali çatlağın genişliği ve uzunluğu artış gösterir. Genişlik limit w_L (Şekil 4.11b) değerine ulaştığında gerilmeler hayali çatlağın ucunda sıfıra inecek ve hayali çatlak gerçek bir çatlağa dönüşecektir. Yumuşama alanı ve çatlağın gelişimi burada ilk uygulanan sonuç kırılmaya kadar bir yol izleyecektir [73, 109].

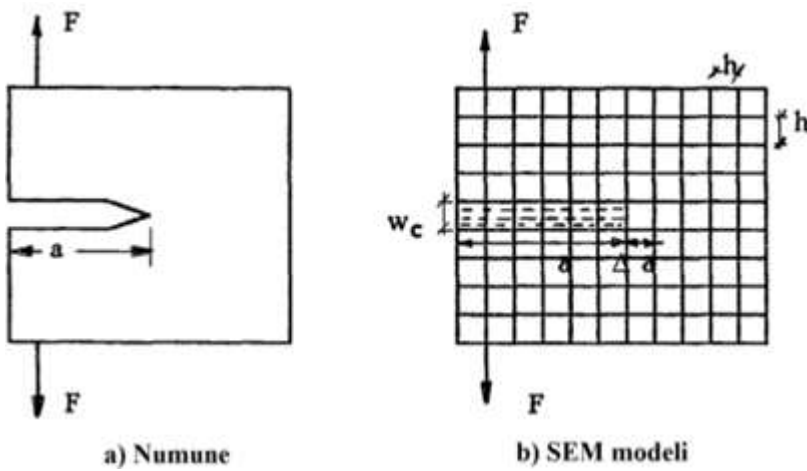


Şekil 4.14. Hayali çatlak modeli [109]

Çatlamış şerit yöntemi

Bazant ve Oh tarafından yumuşama alanı kalınlığı ve çekme dayanımına bağlı olarak G_F , SEM kullanılarak tanımlanmıştır [74, 109]. Bu metodun hayali çatlak modelinden farkı SEM formülasyonunun farklılığındandır ve sayısal sonuçlar birbirlerine yakındır [109].

Bu modelde yumuşama alanı, numunenin diğer kısmından farklı bir rijitlikte olduğu kabulü yapılmıştır. Yumuşama alanı içerisindeki deformasyonların σ - w eğrisine (Şekil 4.11b), diğer bölgelerdeki deformasyonların σ - ϵ eğrisine (Şekil 4.11a) uyduğu kabul edilmiştir (Şekil 4.15 a,b).



Şekil 4.15. Çatlamış Şerit Modülü [109]

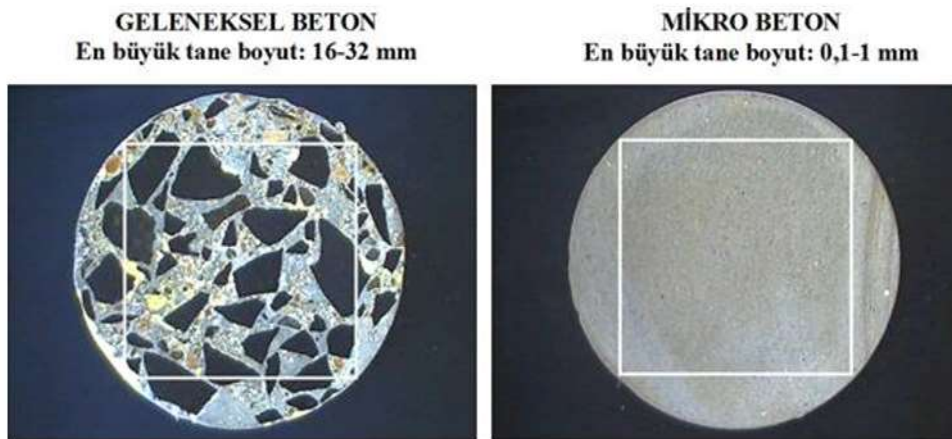


5. MİKROBETON

5.1. Tanım ve Tasarım İlkeleri

Mikro beton (MB) en büyük tane boyutu 0,1-1 mm arasında değişen çeşitli türde toz malzemelerin (mikro agreg) karışımı ile elde edilen özel bir beton türüdür (Resim 5.1). Beton kendi tanımı gereği bünyesinde çimento, su, ince ve iri agreg bulunduran kompozit bir malzeme olmasına rağmen mikro betonda iri agreg ve ince agreg fazı karışımından çıkartılmış, bunların yerine ince öğütülmüş inert veya puzolanik malzemeler kullanılmıştır. Bu değişiklik, gerek taze halde reolojik davranış gerekse sertleşmiş halde mekanik özellikler bakımından klasik betona göre farklılıklar meydana getirmiştir. Taze halde hedeflenen kıvamın elde edilebilmesi için de çoğunlukla bir akışkanlaştırıcı katkı maddesi mikro beton tasarımında kullanılmaktadır [109].

Mikro beton terimi ilk olarak 1960-70'li yıllarda betonarme yapıların küçük ölçekli modellenmesi amacıyla hazırlanan iri agregasız karışımlar için kullanılmıştır [75, 76, 109]. Günümüzde de özellikle çimento bazlı kompozitlerde yükleme etkisi altında meydana gelen çatlakların [77-79, 109] ve rötre etkisiyle oluşan çatlakların incelenmesinde [80, 81, 109] kullanılan bir model malzemesidir. Bununla beraber tamir amaçlı uygulama alanlarında çeşitli mikro beton tasarımları kullanılmaktadır [82-84]. Farklı kalıp metotları ile panel eleman üretiminde kullanılan ve patentleri alınan mikro beton ürünleri de mevcuttur [85, 109].



Resim 5.1. Geleneksel beton ve mikro beton karışımlarının mikroskopik görüntüsü [109]

Mikro beton bünyesinde iri agrega bulundurmadığından klasik betona göre çok daha gevrek bir yapıdadır. Aynı zamanda rötre hassasiyeti de klasik betonun yanında çok daha fazladır. Mikro betonun tokluğu ve sünekliği matrikse lif ilavesi ile arttırılmaktadır. Lifli mikro betonların çekme ve eğilme gerilmeleri altında deformasyon kapasiteleri oldukça yüksektir. Geleneksel betondan çok daha farklı mekanik ve fiziksel karaktere sahip olan mikro betonun tasarımında dört temel ölçüt dikkate alınmalıdır [109]:

1. Amaçlanan işlenebilirlik özelliğine göre istenen reolojik davranışı gösterebilme: Mikro betonun kullanım alanlarına göre çeşitli reolojik özellikler göstermesi istenebilir. Örneğin, kendiliğinden yerleşebilme, vibrasyonla yerleşme veya püskürtme yolu ile yerleştirme durumlarında, tasarımdan istenen reolojik davranış farklılık gösterebilir. İstenen özelliğin sağlanabilmesi için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir:
 - a) Akışkanlaştırıcı katkı – su/çimento (w/c) oranı dengesini sağlama,
 - b) Farklı kimyasal ve mineral katkı malzemelerinin kullanımı ile hedeflenen amaca ulaşma (kıvam arttırıcı, priz hızlandırıcı vb.).
2. Matriks bileşenleri bakımından istenen boşluk yapısı ve dayanım sınıfını sağlama: Matriksi oluşturan bağlayıcı ve bağlayıcı olmayan malzemelerin türü, fiziksel özellikleri, kullanım oranları üretilecek kompozitin boşluk yapısını ve dayanım sınıfını direkt etkilemektedir. Örneğin, mikro agreganın türü, boyu dağılımı, şekil ve yüzey özellikleri performansı etkileyebilen parametrelerdir. Aşağıdaki yöntemlerle, boşluk yapısı ve dayanım sınıfı en uygun şekle getirilebilir:
 - a) Mikro agrega karakterizasyonu,
 - b) Matriks bileşenleri arasındaki oranların değiştirilmesi,
 - c) Seçilen matrikste akışkanlaştırıcı katkı – su/çimento oranı dengesini sağlama.
3. Mikro betonun gevrek davranışını azaltma: Mikro betonda çatlak oluşum mekanizmasını değiştirerek tokluk performansının artırılması hedeflenmelidir. Bu amaçla en etkili metotlar aşağıda belirtilmiştir:
 - a) Mikro lif kullanımı,
 - b) Mikro lifli matriksin reolojik özelliklerinin geliştirilmesi.
4. Mikro betonda rötre çatlağı oluşumu hassasiyetini azaltma: Büzülme davranışı bakımından hassas olan mikro betonun bu özelliği, aşağıdaki yöntemler kullanılarak minimuma indirilebilir:
 - a) Çeşitli büzülme engelleyici kimyasalların kullanımı,
 - b) Genleşen özellikte ürün oluşturan maddelerin kullanımı,

- c) Kısıtlı durumda çatlağı yayma ve genişliğini kısıtlama özelliği olan liflerin kullanımı,
- d) Kür şartlarının çatlak oluşumunu azaltıcı biçimde değiştirilmesi [109].

5.2. Potansiyel Avantaj ve Dezavantajları ile Kullanım Alanları

1. Uygun parçacık tane boyut dağılımı seçilerek ve uygun akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanımıyla, matriksteki tane sıkışma oranı arttırılabilir. Daha sıkı yapılı bir iskelet elde edilerek, hava boşluğu miktarı azaltılabilir. Böylece daha geçirimsiz bir kompozit üretilerek, betonun dayanıklılık özellikleri de geliştirilebilir [109].
2. Yapısal tasarım açısından, mikro betonun yeterli tokluk ve dayanıma sahip olması halinde, tasarlanan kesitlerin küçülmesi ve yapıda hacim kazanılması sağlanabilir. Ayrıca dinamik yükler altındaki yapı elemanlarının tasarımında, lifli mikro betonların enerji yutma kapasiteleri ve deformasyon yapabilme özellikleri avantaj sağlayabilmektedir [109].
3. Zımbalama, kesme ve parçalanma etkilerine karşı dayanıklı yapı elemanlarının üretiminde mikro betonlardan yararlanılabilir [109].
4. Geleneksel betona çelik bulonlar gömülerek yapılan bağlantılar genellikle kolayca açılmakta, beton örtü tabakası kısa sürede çatlayarak çelik bulonların açığa çıkmasına neden olmaktadır. Mikro beton kullanılarak yapılan bir bağlantı ise yalın betona kıyasla çok daha uzun ömürlü olacaktır [109].
5. Kıvam özelliklerinin uygun olması durumunda (kendiliğinden yerleşen), geometrik formu farklı ince cidarlı heykel tasarımında kullanılabilir [109].

Sıralanan maddelerin dışında mikro betonların daha birçok avantajı vardır. Bununla beraber çeşitli dezavantajları da dikkate alınmalıdır [109]:

1. Lifsiz mikro beton oldukça gevrek olduğundan ani yükleme ve darbe etkilerine karşı dayanıksızdır.
2. Mikro beton iri agrega ve ince agrega içermemesi nedeniyle reolojik davranışı geleneksel betona göre farklıdır. Uygulamada kesikli üretim yapılması mikro betonu yerleştirme sorunlarına yol açabilir. Bilinçsiz uygulama yapılması halinde soğuk derz sorunları oluşabilir.
3. Mikro betonun fiziksel özellikleri (elastisite modülü, termal genleşme katsayısı) geleneksel betondan farklı olduğundan derzlerde uyum sorunu gözlenebilir.

4. Mikro betonda iri agrega olmamasý sebebiyle aşınma hassasiyeti olabilir. Sürtünme etkisi altındaki yapı elemanlarında performansı araştırılmalıdır.

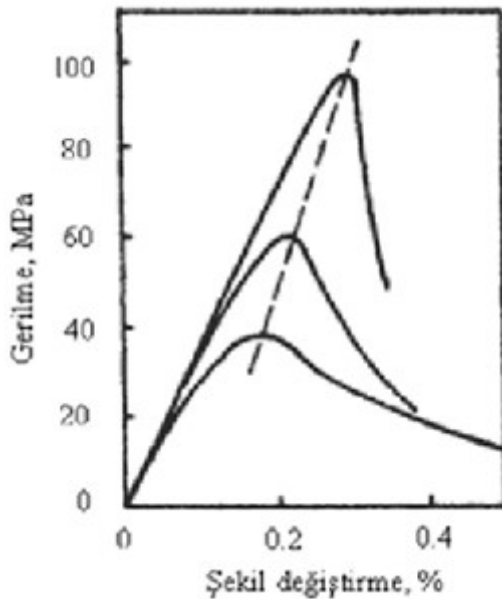


6. ULTRA YÜKSEK DAYANIMLI BETONLAR (UYDB)

6.1. Temel Bilgiler

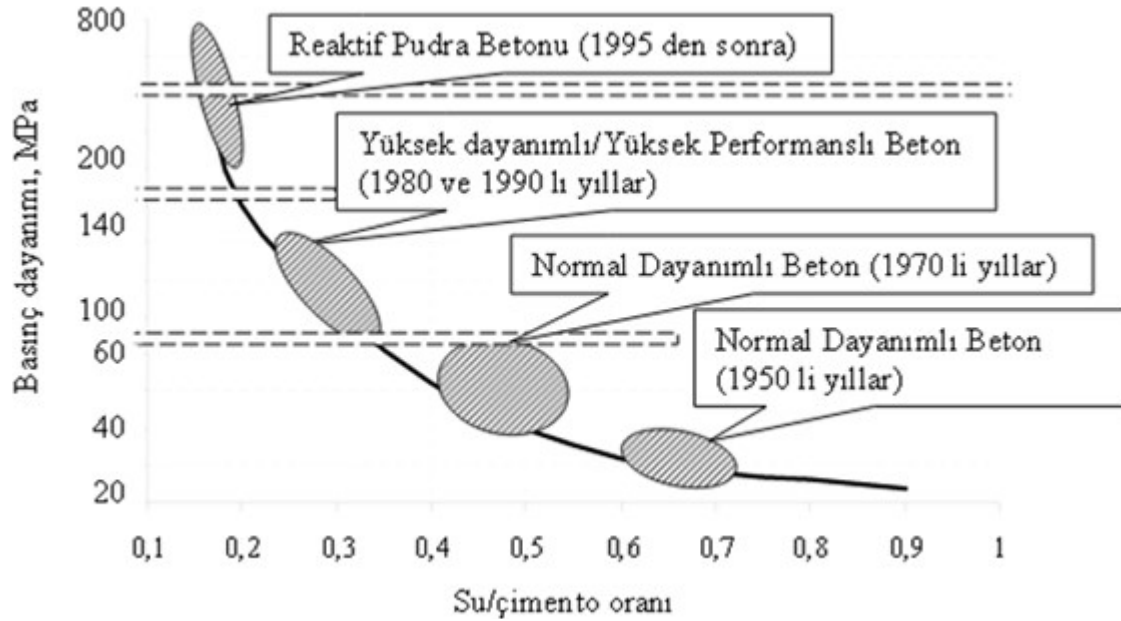
Günümüzün en sık kullanılan yapı malzemesi konumunda olan beton, hem çelik hem de betonarme yapı sistemlerinin çok çeşitli alanlarında kullanılmaktadır. Beton teknolojisi bu yoğun talep altında sürekli bir yenilenme ve gelişim içerisinde. 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15-25 MPa civarlarında iken 1970'li yıllarda yüksek katlı binalardaki artışa bağlı olarak yapılan araştırma ve geliştirmelerle 40-50 MPa basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Zaman içerisinde dayanımları artan bu betonlara yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman vb. yapı uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [86,109]. Dayanımı artırılmış beton veya bilinen adıyla yüksek dayanımlı beton geçirimsiz olması sebebiyle durabilitesi de yüksek olan betondur. Bu betonlarda dayanım arttıkça ortaya çıkan en önemli sorun ise gevrekliktir (Bkz. Şekil 6.1) [109].

Yüksek dayanımlı betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Şekil 6.1 elastisite modülündeki bağıl artışın basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğunu da göstermektedir [87,109].



Şekil 6.1. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi [87, 109]

Yüksek dayanımlı betonun tasarımında hedef, betonu oluşturan malzemeler arasında oluşabilecek boşlukları minimuma indirmek, düşük su/çimento oranı sayesinde de düşük porozite ve yüksek durabilite elde etmektir. 1980’li yıllardan itibaren betonda süper-akışkanlaştırıcıların ve silis dumanı gibi ultra incelikteki mineral katkıların birlikte kullanılmasıyla dayanımlarda çok yüksek artışlar sağlanmıştır (Şekil 6.2) [109].



Şekil 6.2. Betonun evrimi kapsamında basınç dayanımı – su/çimento ilişkisi [87, 109]

Ultra yüksek dayanımlı betonlar yüksek dayanımın yanı sıra, yüksek durabilite özellikleri ile tanımlanabilen malzemelerdir. Geleneksel betondan farklı olarak yeni nesil süper-akışkanlaştırıcılar, ince agrega, silis dumanı kullanımıyla elde edilirler. Karışımın maksimum doluluk oranına ulaşmak ve tane optimizasyonunu sağlamak amacıyla dayanımı çok yüksek silis kumu ve pudrası kullanılır. Süper-akışkanlaştırıcıların kullanılması ile betonda işlenebilme için gerekli su miktarı minimize edilmiş ve boşluklar azaltılmış olur. Betonda yüksek basınç dayanımının yanında yüksek süneklik düzeyi (enerji yutma kapasitesi) de isteniyorsa beton karışımında çelik lifler kullanılabilir. Ayrıca bu yollarla üretilen betonlara ısıtma işlemi uygulayarak dayanımın daha da artırılması mümkündür. Tüm bu işlemlerden sonra agrega- çimento hamuru temas yüzeyi güçlendirilmiş geçirimsiz bir beton elde edilir [109].

Ultra yüksek dayanımlı betonlarla ilgili ilk çalışmalar P.Richard ve M.Cheyrezy [88] tarafından yapılmıştır. Silis dumanı, süper-akışkanlaştırıcı katkı, ince agreg a ve çelik lif ilavesiyle üretilen betonlara farklı sıcaklıklarda ısıt ıl işlem uygulanarak basınç dayanımları 200 MPa'dan 800 MPa'a ulaşabilecek betonların elde edilebileceğini göstermişlerdir. Yine çelik lif kullanımı ile daha yüksek süneklik düzeyine ulaş ılabilirliğini ortaya koymuşlardır [109].

6.2. Karışım Esasları

Ultra yüksek dayanımlı betonların hazırlanmasında uygulanan karış ıtma ve vibrasyon işlemleri normal beton üretiminde kullanılan yöntemlerle farksızdır. Ancak karış ıma suyun karış ıtılmasında çok dikkatli davranılmalıdır. Öncelikle agreg a ve bağlayıcı maddeler (çimento, mikrosilika vb.) 3 dakika kadar kuru bir şekilde karış ıtılmalı, daha sonra su ve süperakışkanlaştırıcıdan süspansiyonun yarısı beton karış ımına eklenmelidir. Karış ım bu şekilde 5 dakika karış ıtıldıktan sonra geriye kalan süspansiyon da karış ıma eklenmeli ve 5 dakika daha karış ıtma yapılmalıdır. Bu şekilde malzeme topaklanmadan kalıba dökülmeye hazır hale getirilebilir [89]. UYDB'larda su/çimento oranı 0,20 dolaylarında seçilerek ince malzeme oranı artırılır. Böylece daha az boşluklu bir yapı ve daha yüksek dayanım elde edilmektedir [109].

6.3. Karışım Sonrası İşlemler

6.3.1. Taze betonu basınç ile sıkıştırma

UYDB kalıplara yerleştirildikten hemen sonra bazı kür işlemlerinin uygulanması gerekir. Hazırlanan karış ımdaki boşluklar, taze betona priz esnasında etkiyen basınç kuvveti ile azaltılabilir. Uygulanan yük etkisiyle beton karış ımı esnasında bünyesine aldığı hava kabarcıkları ve hidratasyon için gerekli su miktarından fazla olan su dışarı atıldığından hem karış ımın su/çimento oranı hem de porozitesi azalmaktadır. Ayrıca sıkıştırma işlemi ile betonun birim ağırlığı da %5 oranında artmaktadır [90,109]. P.Richard ve M.Cheyrezy numune üretimi sırasında uygulanacak 50MPa'lık bir basınç ile yoğunluğun artırılarak dayanımın yükseltilebileceğini ortaya koymuşlardır [88, 109].

M.İpek ve K.Yılmaz yaptıkları çalışmada ürettikleri beton karışımına 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulamışlar ve bu şekilde üretilen betonların sıkıştırma yapılmadan üretilen betonlara göre eğilme dayanımlarında %34 artış sağlandığını göstermişlerdir [91,109].



7. AGREGA – ÇİMENTO PASTASI BAĞI (ADERANSI)

7.1. Temel Tanımlar ve Bağ Tipleri

Beton ve betonarme yapıların hayatın birçok alanında yaygınlaşarak kullanılması sonucu mühendisler betonu tanımlarken artık basınç dayanımı, elastisite modülü, çekme dayanımı, poisson oranı gibi daha çok bilinen karakteristik özellikler yerine betonun yük etkisindeki davranışı ile ilgili tahminler geliştirmeye çalışmaktadırlar. Bu doğrultuda beton içerisinde kullanılan malzemelerin güçlendirilmesi ve buna bağlı olarak da beton davranışının değişebileceği ortaya çıkmıştır. Bunlardan en çok bilineni çimento hamuru ile agrega arasındaki ilişkidir. Son yıllarda beton teknolojisinde elektron mikroskoplarının kullanılması ile daha önce çimento hamuru ile agrega arasında mekanik, kimyasal, vs. olarak açıklanan bağ teorilerinin bu kadar basit açıklanamayacağı anlaşılmıştır. Bununla birlikte bütün araştırmacıların üzerinde ortak noktaya vardığı bir gerçek vardır ki o da çimento hamuru ile agrega arasındaki bağın betonun mekanik davranışını büyük ölçüde etkilediği ve aradaki bu temas yüzeyinin zayıf bir hat olduğu gerçeğidir [109].

Elektron mikroskopları ile yapılan araştırmada; bu geçiş bölgesi ile temas eden agrega yüzeyi üzerinde kalsiyum hidroksitten oluşan bir film tabakası olduğu ve bu filmin ince bir kalsiyum silikat hidrat (tobermorit) formunda başka bir tabaka ile kaplı olduğu tespit edilmiştir [92, 93, 109].

Çimento ve agreganın iki farklı malzeme olması (anizotropi) nedeniyle doğaldır ki bu iki malzemenin birbirine temas yüzeyleri boyunca bağlanmaları içyapıda farklı oluşumlar yaratır. Betonda çimento hamuru - agrega yüzeyi zayıftır. Bu zayıflığın nedenlerini kısaca sıralarsak [109];

1. İşlenebilir bir karışım hazırlamak için betona çimento hidratasyonu için gerekli su miktarından daha fazla su konur. Beton yerleştikten sonra iri taneler yerçekimi etkisiyle dengeyi sağlamak üzere aşağı doğru oturma hareketi yaparken karışımda henüz hidratasyona katılmamış olan su ise yukarı doğru hareket eder. İri agrega taneciklerinin altından geçemeyen bu su, burada tutularak, döküm yönüne oldukça yüksek zayıf hatlar meydana getirir. Bu suyun bir kısmı ise Van der Waalls kuvvetleri etkisiyle ara yüzeyden harca doğru hareket ederek agrega ile temas eden harç yüzeyinden içeriye doğru azalan bir porozitenin meydana gelmesine neden olur.

2. Bilindiği üzere çimento hidratasyonu sonrasında çimento hamuru hacminde kuruma neticesinde kuruma rötresi meydana gelir. Beton kürü sonrası, agreganın yüksek elastisite modülüne sahip olması nedeniyle agregaya da kurumu neticesinde rötreye yapar. Bu hareketler sonrası agregaya – çimento hamuru bağı zayıflar. Agregaya ile çimento hamuru arasında üç farklı bağlanmadan söz edilir.

7.1.1. Mekanik bağlanma

Agreganın yüzey dokusu sebebiyle meydana gelen bir bağlanma tipidir. Çizelge 7.1 (b)'de verilen ve tablonun sonuna doğru gittikçe mekanik bağ yapma özelliği artan bu tablo görüldüğü gibi agreganın yüzey dokusu baz alınarak hazırlanmıştır. Mekanik bağlanmada agreganın girintilerine çimentoların girmesi agregaya çıkıntılarının da çimento hamuruna batması sonucu adeta kamalama şeklinde bir kenetlenme meydana gelir. Mekanik bağlanmada esasen bağlanmayı sağlayan agregaya özgül yüzeyinin artmasıdır. Girintili çıkıntılı bir yüzeye sahip agreganın çimento hamuru ile temas ettiği alan diğer agregalara göre daha fazladır. Çizelge 7.1 (a)'da ise agregaya tane şekline göre yapılmış bir sınıflandırma görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere aşağıya doğru gittikçe agreganın özgül yüzeyi artar. Böylece agreganın çimento hamuru ile temas yüzeyi büyür ve mekanik bağlanmada artış meydana gelir [109].

7.1.2. Epitaksial bağlanma

Bu, daha küçük ölçekte ve ender durumlarda gerçekleşebilen bir aderans türüdür. Çimentonun hidratasyonu esnasında bazı kristal yapıları bileşenler (Ca(OH)_2 gibi) ilk önce çökerek agregaya yüzeyini ince bir tabaka halinde kaplar. Eğer çökelen bu ince tabakanın kristal yapısı ile agreganın kristal yapısının kafes sistemleri birbirine uygunsa, bu yapılar aralarında süreklilik oluşturarak küçük ölçekte bir aderansın meydana gelmesine sebep olurlar [94, 109]. Bu tip bir bağı kireçtaşı agregaların kolayca gerçekleştirdiğini söylemek mümkündür [109].

Çizelge 7.1. a) Tane şekil sınıflaması, b) Agregat yüzey dokusu sınıflaması [109]

a)	TANE ŞEKLİ		AÇIKLAMA	ÖRNEKLER
	Yuvarlak		Tamamen su içerisinde sürtünme nedeniyle yuvarlaklaşmış	Nehir ya da deniz kıyısı çakılları, çöl, deniz kıyısı ve rüzgarın serpiştirdiği kumlar
	Şekilsiz		Doğal olarak şekilsiz olup sürtünme nedeniyle yuvarlanmış olabilirler.	Diğer çakıllar, kum veya adi çakmak taşları
	Köşeli		Pürüzlü düzlemsel yüzeylerin kenarlarda kesiştiği yapılar	Kırılmış kayaların bütün çeşitleri, yamaç molozu, camsı cüruf
	Yassı		Agregat eninin diğer iki boyuta göre daha küçük olduğu yapılardır.	Lamineli Kayaç
	Uzun(Prizmatik)		Genellikle köşeli ve bir boyutunun diğer iki boyuttan fark edilir büyük olan agregalar	Lamineli Kayaç
	Yassı ve Uzun		Tane uzunluğunun eninden ve enine de kalınlıktan daha büyük olduğu agregalar	Lamineli Kayaç
b)	GRUP	YÜZEY DOKUSU	ÖZELLİKLER	
	1	Camsı	Konkoidal(midye kabuğu) kırılması sonucu yüzeyler camsı	
	2	Pürüzsüz	Tanesel veya lamine kayaların pürüzsüz kırılması ya da su içerisinde sürtünme nedeniyle düzleşerek oluşurlar.	
	3	Taneli	Kırılma sonucunda yüzeydeki keskinliklerin uniform şekilde yuvarlaklaşması sonucu oluşurlar.	
	4	Pürüzlü	Yapısında zorlukla görülebilen, orta ve ince taneseller kayaların kırılması sonucu ortaya çıkan yüzeylerdir.	
	5	Kristalli	Yapısında kolayca görülebilen kristal parçacıkları vardır.	
	6	Peteki	Yüzeyde görülebilen boşluklar ve oyuklar vardır.	

7.1.3. Kimyasal bağlanma

Bazı agregalar kimyasal yapıları (mineralojik yapı) nedeniyle çimento pastası ile reaksiyona girerek aralarında bir bağın oluşmasına sebep olurlar. Bu olay daha çok agreganın yüzeyinde çökelen Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek bağ dayanımını artırır. Buradaki reaksiyon puzolanik bir reaksiyondur [95, 109]. Bu tip bağlanma bazen epitaksial bağlanma içerisinde de değerlendirilir. Traslı çimento kullanılması durumunda eğer ortamda silisli ve alüminli agregaya varsa yine benzer reaksiyonlar sonucu daha iyi bir bağlanma meydana gelir [95, 109].

7.2. Agreganın Çimento Hamuru Bağına Etki Eden Faktörler

Çimento hamuru- agreganın bağ dayanımına etki eden birçok etken vardır. Bu etkenlerin her biri beton dayanımını doğrudan etkilemektedir [109].

7.2.1. Agreganın geometrisi ve yüzey dokusu

Son yıllara kadar, bağ dayanımını etkileyen en önemli öğe olarak bilinmekteydi. Günümüzde elektron mikroskoplarının kullanılması ile agreganın çimento hamuru arasındaki yüzeyinin incelenmesi sonucu kaba bir yaklaşımdan öte gidemeyen ve mekanik bağlanmayı vurgulayan agreganın şekli ve yüzey dokusunun etkisinin düşünüldüğü kadar fazla olmadığı, betonun diğer bileşim özellikleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Çizelge 7.1 (a) ve 7.1 (b) agregaları tane şekil ve yüzey dokusu açısından sınıflandırmıştır. Kaba bir yaklaşımla; bu her iki tabloda yukarıdan aşağıya inildikçe mekanik bağlanmanın artacağı söylenebilir [109].

Mineralojik, su/çimento oranının beton dayanımında en önemli faktör olmasına rağmen agreganın özellikleri katkısının görmezlikten gelinemeyeceğini söyler [96, 109]. Keza yine iri agreganın yüzey dokusu ve şeklinin çimento hamuru ile agreganın arasındaki kilitlemeyi (bağlanma) önemli ölçüde arttırdığı, yüzeyi pürüzlü agreganın kullanılması durumunda betonun eğilme ve çekme dayanımlarında pürüzsüz agreganın kullanılan betonlara göre yaklaşık %30 artış olabileceği belirtilmektedir [96, 109]. Yine Postacıoğlu da aderanstaki düşüklüğü agreganın yüzey dokusuna bağlamakta ve bunun betonun gerilme-şekil değiştirme kapasitesini etkileyeceğini ve betonun (basınç dayanımından bağımsız olan) deformasyon

yapabilme yeteneğinin azalacağını söylemektedir [97, 109]. Postacıoğlu'nun belirttiği bulu agrega yüzey ve tane şekline bağlı olarak betonun kırılma mekaniğinin değişebileceğidir. Yani pürüzlü agrega kullanılması durumunda sünek bir kırılma neticesinde deformasyon kapasitesinin artabileceği olgudur [109].

Agreganın bağ olayında olumlu katkısı olan tane şekli ve yüzey dokusunun bazı beton özelliklerinde olumsuzluğa yol açabileceği durumu ise gerçeğin diğer bir yüzüdür. Özellikle; su/çimento oranı, kompasite, çimento gereksinimi, işlenebilirlik, karma suyu miktarı, geçirgenlik, dayanıklılık gibi beton özelliklerinin yukarıda anılan parametrelerden olumsuz etkilenebileceğini göz ardı etmemek gerekir. Normalde agrega seçimi yapılırken yuvarlak agrega seçimi yapılır [109]. Beton kompasitesi ve işlenebilirliği açısından bu gerekli bir işlemdir. Kompasite açısından zayıf olan betonlar taşıyıcı iskeleti sağlam olmayan bir yapı getirir. Agrega yığın boşluğunu (y), yuvarlak tane yüzdesini (x) ile gösterirsek [109];

$$y = 0,42 - 0,007x \quad (7.1)$$

ampirik bağıntısından bahsedebiliriz [98, 109]. Betonda boşluklu yapının donma-çözülme, geçirgenlik, düşük dayanım, vs. gibi sorunlara yol açtığı bilindiğinden ötürü özellikle agrega seçimi yapılırken tane şekil ve yüzey dokusundan ileri gelebilecek olumsuz etkilenmeler de dikkate alınmalıdır. Bunun yanı sıra tanelerin şekilsiz olması, tanelerin birbiri üzerinde kaymasını zorlaştırarak işlenebilirlikte ciddi problemlere yol açacaktır. Yine, yüzey pürüzlülüğü tanenin temas yüzeyini artırarak (özgül yüzeyin büyümesi) işlenebilirlik için suya duyulan gereksinimi (ya da başka önlemleri gerektirecektir) arttırıp su/çimento oranı yüksek karışımların ortaya çıkmasını zorlayacaktır [109].

7.2.2. Su/çimento oranının etkisi

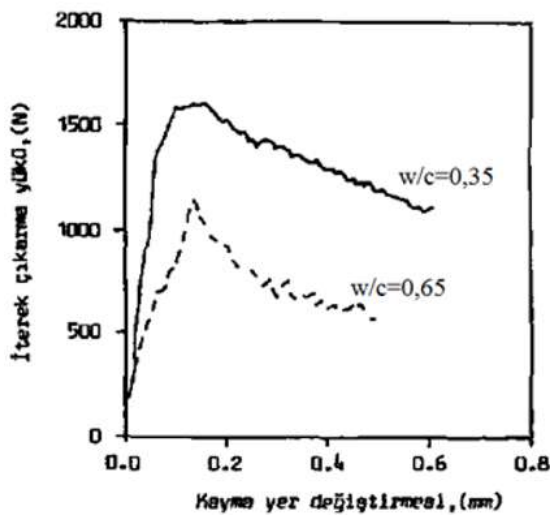
Bilindiği üzere su/çimento oranı betonun bilinen bütün özellikleri doğrudan etkileyen en önemli parametredir. Beton dayanım ve dayanıklılığı su/çimento oranından birinci derecede etkilenir. Su/çimento oranı, hem çimento hamuru yapısını hem de agrega-çimento hamuru ara yüzeyini doğrudan etkileyen bir parametredir [109]. Su/çimento oranının büyümesi ile beton içerisinde boşluklu zayıf bir yapı oluşur. Keza yüksek su/çimento

oranında betonda terleme artar ve agrega-çimento hamuru ara yüzeyindeki porozite büyür [99, 109].

Bu şekildeki bir beton dokusunda yüzey enerjisi ve bağ dayanımı azalır [95, 109]. Elektron mikroskobu ile yapılan incelemede, ara yüzeyin su/çimento oranından büyük ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir [95, 109] (Bkz. Şekil 7.1).

Yapılan araştırmalarda su/çimento oranının agrega-çimento hamuru bağ dayanımını betonun basınç dayanımından daha çok etkilediği, bağ dayanımının ancak düşük su/çimento oranları için anlamlı olabileceği ve su/çimento oranının artması durumunda kırma agrega kullanılsa bile bağ dayanımında (dolayısıyla da etkilenen diğer dayanım türlerinde) herhangi bir artış meydana gelemeyeceği ortaya çıkmıştır [94, 96, 109].

Bazı araştırmacılar ise yüksek ve orta dayanımlı betonlarda (harç dayanımı agrega dayanımından yüksek), süreksizlik sınırı, çözünme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırındaki bütün şekil değiştirmelerin çimento hamuru mikroyapısı tarafından saptandığını ve zayıf betonlarda ise (agrega dayanımı harç dayanımından yüksek) yukarıdaki ifade aynen geçerli olmak üzere iri agreganın bağ dayanımı ve yük altındaki mekanik kenetlenmesinin etkili olduğunu söylerler [94, 100, 109]. Bu nedenle beton için tek bir kırılma mekaniği tarifi yerine kompoziti meydana getiren malzemelerin durumundan ötürü birden fazla kırılma mekaniği tarifi yapılır [94, 100, 101, 109].



Şekil 7.1. Su/çimento oranının mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi [95, 109]

Başta da söylenildiği gibi su/çimento oranının büyümesiyle agrega ile temas eden harcın porozitesi yükselir. Bu, betona işlenebilirlik için katılan ve hidrasyona girmeyen suyun yerleşme sonrası bu bölgelerde tutulması sonucu ortaya çıkmış bir durumdur. Bu oluşum sonra iri agrega-harç temas yüzeyleri, porozite nedeniyle azalır ve bu bölgede su/çimento oranı hamurun diğer yerlerine göre daha yüksek olduğu için agrega ile temas eden harcın dayanımı düşer. Bütün bunların sonucunda agrega-çimento hamuru bağı zayıflar. Yani yüzey ve tane şekli açısından bağlanmayı güçlendirecek en iyi kalitede agrega kullanılması durumunda bile eğer su/çimento oranı yüksek ise agrega beklenen etkiyi (bağ dayanımını) gösteremez [109].

Tersi durumda, yani su/çimento oranının küçülmesi ile harç fazının elastisite modülü büyür. Böylece harç fazı elastisite modülü / iri agrega elastisite modülü oranı da büyümüş olur. Bu değişim iri agrega-çimento hamuru sınırlarında oluşan gerilmeleri küçültücü yönde etki yapar. Bundan dolayı süreksizlik sınırına daha büyük bir kuvvet altında varılır [109].

Bunun yanı sıra su/çimento oranının büyümesi ile yukarıda sıralanan iri agrega-çimento harcı temas kusurları da ortadan kalkar ve bağ dayanımında önemli artışlar olur [94, 109].

Yukarıda açıklanan durum agrega dayanımının harç dayanımından yüksek olduğu betonlar için geçerli değildir. Buna karşılık ikinci paragrafta açıklanan bağ dayanımının güçlenmesi bu tip betonlar için de anlamlıdır [94, 102, 109].

Akman yaptığı bir çalışmada bu durumu doğrular sonuçlara ulaşmıştır [103]. İri agregaları aynı, harç fazı iki ayrı kalitede (dayanımda) beton üretip bunların dayanımlarını ölçünce harç fazı yüksek kalitede olan betonların dayanımlarının da yüksek olduğunu tespit etmiştir [103, 109].

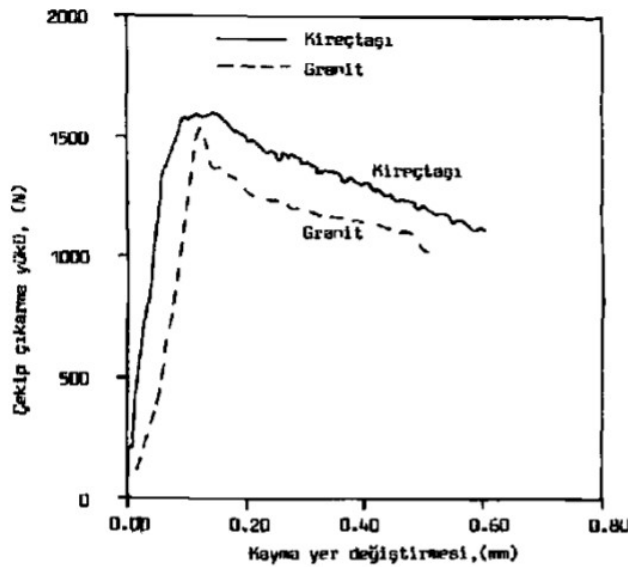
7.2.3. Agrega cinsinin (petrografik ve mineralojik yapı) etkisi

Agregalar görünüşte kaba olarak sınıflanabilmelerine rağmen içyapıları dikkate alınıp incelendiğinde son derece heterojen bir yapıya sahip oldukları görülür [109].

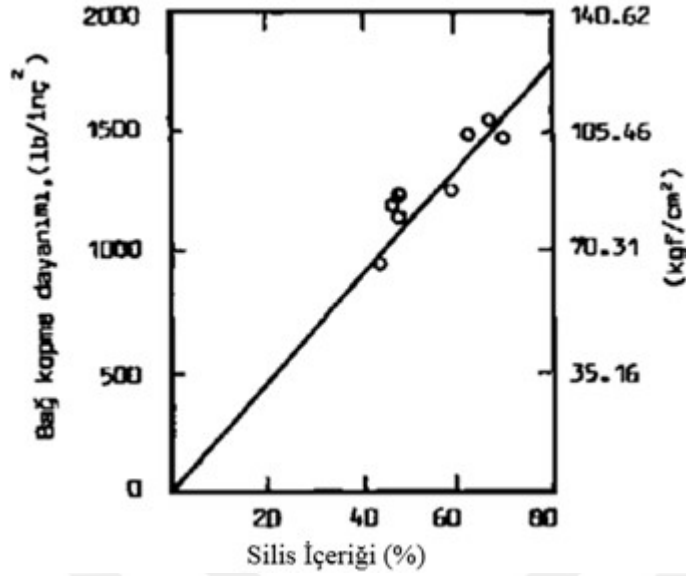
Agrega cinsinin bağ dayanımı üzerindeki etkisi çimento harcı ile agrega arasında meydana gelen kimyasal ve epitaksial aderans ile açıklanır. İyi bir bağ için; pürüzlü yüzey dokusu

yanında mineralojik olarak heterojen ve poroz taneler gereklidir. Yani agreganın kimyasal ve mineralojik yapısı ile tane yüzeyinin elektrostatik durumu oldukça önemlidir. Agreganın kimyasal yapısı ile ilgili olan epitaksial aderans harcın su/çimento oranından etkilenmez. Çünkü su/çimento oranının agrega yüzeyine çökelen ince tabakanın kristal yapısını değiştirmesi söz konusu değildir. Harç ile iri agrega arasında; agreganın kimyasal yapısı gereği ortaya çıkan aderans yüzey pürüzlülüğü ile ortaya çıkan bağlanmanın aksine, basınç (ve elastisite) dayanımını arttırıcı yönde etki eder [95, 109].

Bu tip etki daha çok kireçtaşı içerisindeki kalsit mineraller (CaCO_3) ile çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) arasında meydana gelir. Şekil 7.2’den de görüleceği üzere çalışmada, iki farklı tipte agrega kullanılarak gerçekleştirilen deneyde kireçtaşı agrega ile üretilen betonlar yapmış oldukları epitaksial bağ nedeniyle daha iyi performans göstermişlerdir. Kireçtaşı kullanılarak üretilen betonlar dayanım açısından granit agrega ile üretilen betonlara göre daha yüksek olup, kırılma şekli ise daha sünektir. Yalnız, epitaksial bağın kurulabilmesi için uzunca bir zaman gereklidir [95]. Aynı etki (püskürük) kayaların kullanılması durumunda da görülür [96, 109].



Şekil 7.2. Farklı agregaların betonun yük-deformasyon davranışına etkisi [96, 109]



Şekil 7.3. Püskürük kayaçlı betonda bağ dayanımı-agrega silis içeriği oranı [96, 109]

Keza betonda silika tozu kullanılması durumunda da silika tozu ile çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasında meydana gelen puzolanik reaksiyon sonucu harç-agrega ara yüzeyindeki porozite azalır ve bağ güçlenir (Şekil 7.3) [109].

7.2.4. Diğer etkenler

Yukarıdaki sıralanan ana etkenler dışında maksimum tane çapının büyümesi ile tanenin özgül yüzeyinin küçülmesi sonucu ara yüzeye gelen gerilme artar ve bu nedenle bağ dayanımı da azalır. Porozitesi yüksek iri agregaya karışma girmeden önce doymun kuru yüzeyden daha kuru ise ara yüzeyde biriken terleme suyunu alacağı için bu bölgede çimento harcında meydana gelen yüksek poroziteyi önleyerek bağ dayanımını güçlendirir. Portland ve katkılı portland çimentosu yerine traslı çimento kullanılması durumunda ara yüzeyde çimento hidratasyonu sonucu meydana gelen kalsiyum hidroksitin tras ile reaksiyona girmesi sonucu bağ dayanımı artar. Kür süresinin (3 aya kadar) uzaması da bağ dayanımının artmasına neden olur. Buna karşın sıcaklığın bağ dayanımına etkisi yoktur [109].

7.3. Bağ Dayanımının Kısa Süreli Yükleme Altındaki Beton Davranışına Etkisi

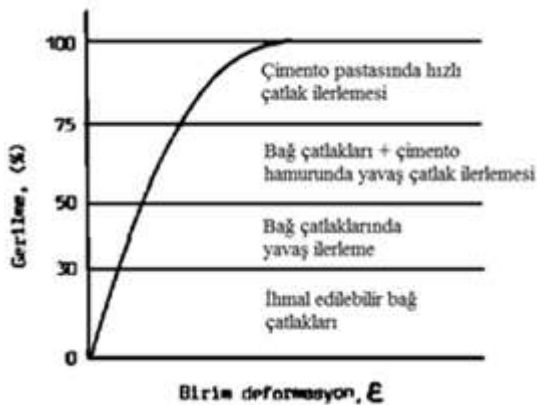
Betonun bir kompozit olması ve anizotropik yapısı sebebiyle kısa süreli yükleme altındaki davranışını etkileyen birçok etken vardır [109]. Özetle;

1. Agregası
 - a. Cinsi (mineralojik - petrografik yapı)
 - b. Sağlamlık (dayanım)
 - c. Elastisite modülü
 - d. Tane dağılımı
 - e. İri agrega/kum oranı
2. Agregası – Çimento Hamuru Bağı
3. Çimento
 - a. Cinsi (KÇ, PC, TÇ, vs)
 - b. Dayanımı (32,5 - 42,5 vs.)
 - c. İnceliği
4. Su/Çimento Oranı
5. Betonun İç Yapısı
 - a. Boşlukların karakteri ve miktarı
 - b. İçsel çatlaklar
 - c. Yerleştirme ve sıkıştırma kusurları
6. Takviye Malzemeler (Varsa)
 - a. Lifler, taşunu, vs.

Betonun yükleme altındaki davranışını etkileyebilecek etkenlerin pek çok olması sebebiyle farklı özellikleri (kalite) olan betonlar vardır. Bu betonlar basınç, çekme, darbe, vs. dayanımları açısından birbirlerinden ayrılırlar. Bu sebeple pratikte adına beton sınıfı dediğimiz ve betonları karakter itibarıyla birbirlerinden ayırt etmeye yarayan, statik hesaplamalarda esas alınan bir kavram geliştirilmiştir. Bu yüzden beton için tek bir gerilme–deformasyon davranışı tarifi mümkün değildir [109]. Ancak kaba bir yaklaşımla betonun çimento hamuru ve agrega gibi iki fazdan meydana geldiği kabulünden hareketle betonun kısa süreli yükleme altındaki davranışı açıklanabilir. Diğer kompozitlerde de olduğu gibi kompozit davranışını, kompoziti meydana getiren malzemeler ve bu malzemelerin birbirleri ile olan etkileşimleri belirler. Bu sebeple betonun yük altındaki davranışı çimento ve agreganın özellikleri ile ilgili olmakla birlikte bu iki malzemenin

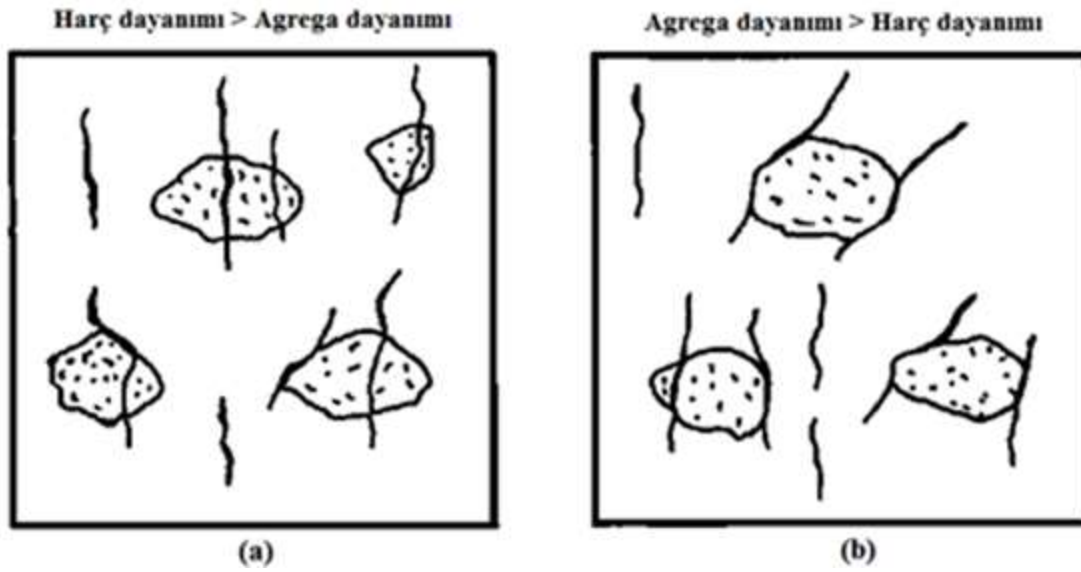
birbirleri ile olan etkileşimlerinin de bir sonucudur. Kaldı ki bu malzemelerin farklı elastisite modülüne sahip olmaları da işin içine girince beton tek eksenli yükleme altında büyük ölçüde doğrusal olmayan bir davranış gösterir [109].

Klasik anlamda, tek eksenli yükleme altında betonda kırılma işlemi üç aşamada gerçekleşir; çatlakların başlangıcı, çatlakların yavaş büyümesi ve çatlak gelişimi. Şekil 7.4'ten de görülebileceği gibi kırılma yükünün ilk %30'luk kısmında gerilme-deformasyon eğrisi oldukça doğrusaldır. Yüklemenin bu aşamasında agrega- harç bağ çatlakları mevcuttur. Fakat gerilmenin düşük seviyede olması sebebiyle bu çatlakların ilerleme eğilimi çok azdır. Kırılma gerilmesinin %30 - %50 arasındaki bölgede, yükleme ile birlikte mevcut çatlaklar yavaş yavaş ilerlemeye başlar [109]. Bu aşamada çatlakların çoğunluğu çimento hamuru-agrega ara yüzeyindedir. Artık çatlakların sayısı düzenli olarak artmaya ve çatlaklar büyümeye başlar. Gerilme-deformasyon eğrisi bu bölgede doğrusallıktan belirgin bir biçimde sapmaya başlar. Bu aşamada çimento hamuru içerisinde az miktarda çatlak vardır. Bu gerilme değeri süreksizlik sınırı diye tanımlanır. Gerilmenin artırılması ile birlikte yani kırılma gerilmesinin %50'si geçilince çatlaklar çimento hamuru-agrega ara yüzeyinden çimento hamuru içerisine doğru ilerler ve harç fazı içerisinde bu gerilme düzeyine kadar az sayıda oluşmuş mikroçatlaklar aniden ve önemli ölçüde artış gösterir. Kırılma gerilmesinin %75'i oranına ulaşıldığında ise çimento hamuru içerisinde çatlak oluşumu ve ilerleme hızı artarak beton içerisinde sürekli bir mikroçatlak ağı meydana gelir. Bu gerilme düzeyine kadar hacimsel olarak küçülen numune bu düzeyden sonra hacim artışı gösterir. Bu gerilme değeri küçülme sınırı olarak adlandırılır. Sonunda betonun stabilitesi bozulur ve göçme olayı meydana gelir [94, 96, 109].



Şekil 7.4. Tek eksenli basınç yüklemesi altında betonun gerilme-deformasyon eğrisi [109]

Keza, Şekil 7.5'teki betonda, göçme anında çatlakların oluşumu incelendiğinde birinci durumda (a), yani harç dayanımı agregaya dayanımından büyük olduğu takdirde harçta oluşan çatlaklar agregaların içerisinden geçip büyüyerek gelişecek ve numunede boyuna çatlaklar görülecektir. Bu kırılma modu çekme dayanımının aşılması ile ilgili olduğundan betonun gerçek dayanımına ulaşılmadan numune kırılacaktır. İkinci (b) durumda ise agregaya dayanımı çimento hamuru dayanımından büyük ise, çatlak matriks ile agreganın ara kesit yüzeyinde ilerleyecek ve kırılma harçtan kaynaklanacaktır [100, 109]. Görüleceği üzere birinci ve ikinci kırılma şekillerinde çimento hamuru-agrega bağ dayanımının fonksiyonu değişiktir. Birinci kırılma şeklinde bağ dayanımının işlevi yoktur(ya da çok azdır), ikinci kırılma şeklinde ise bağ dayanımının rolü fazladır. Betonun gerçek basınç dayanımı altında kırılabilmesi ve çatlak gelişiminin beton harcı içerisinde oluşması bakımından agregaya dayanımı harcın dayanımından büyük olmalıdır [100, 109].

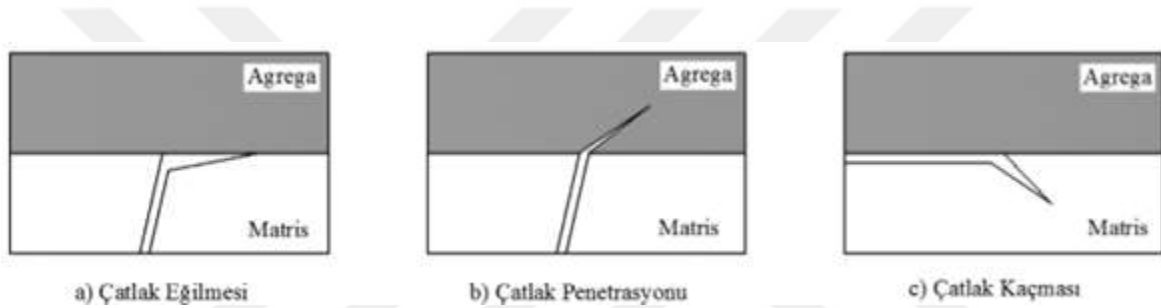


Şekil 7.5. Göçme etkisinde agregaya ve harç dayanımına göre çatlakların oluşumu [100, 109]

7.4. Ara Yüzey Kırılmasının Önemi

Betonun kırılma mekanizmasında sertleşmiş çimento hamuru-agrega arasındaki arayüzey geçiş bölgesinin önemi oldukça fazladır. Arayüzey bölgesindeki çatlakların iki nedeni vardır [109]. Betonu oluşturan agregaya ve çimento hamurunun rijitliklerinin çok farklı olması nedeniyle ara yüzey bölgesinde oldukça büyük gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Ara yüzeyin çok düşük dayanımda olması çatlakların burada oluşmasına sebep olmaktadır.

LEKM’nde birbirine benzer olmayan iki malzemenin, birleşim bölgesi boyunca oluşacak gerilme dağılımlarını ilk defa Williams incelemiştir [109]. Lee ve arkadaşları ile Büyüköztürk tarafından yapılan çalışmalarda Şekil 7.6’da gösterildiği gibi ara yüzeyde kırılma modu ayrımları yapılmıştır [105-107, 109]. Çatlak ara yüzeyi takip ettiğinde Şekil 7.6a’da gösterildiği gibi çatlak eğilmesi oluşmaktadır. Çatlak eğilmesinin zıttı Şekil 7.6b’de gösterildiği gibi agrega tanesi içerisine çatlağın geçmesi olayıdır. Şekil 7.6c’de ara yüzeyin dışına bir çatlağın geçmesini göstermektedir. Malzemenin boşluklu bir yapıya sahip olması çatlak eğilmesi olayını kolaylaştırmaktadır. Pürüzlülüğün yanında eğilmiş ve penetre olmuş çatlağın maksimum enerji salıverme miktarı da önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple ara yüzey parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir [109].



Şekil 7.6. Ara yüzeyde çatlak tanımlamaları [109]

7.5. Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Çatlak Dağılımları

Wittmann ve Zaitsev bilgisayar aracılığıyla rastgele dağıtılmış agregalar ile bir beton yapısı oluşturmuştur [108, 109]. Agregaların boyutları ve geometrileri rastgele alınmış, ayrıca her parçada arayüzey kırığı yine rastgele seçilmiştir.

Bu deneyde artırılan basınç yükü etkisinde çatlak dağılımı incelenmiştir. Önceki bölümde bahsedilen formüllere göre bazı öncü çatlaklar belirli bir gerilme seviyesinin üzerinde iken gelişmeye başlarlar. Gelişen çatlaklar matriks içerisinde uzarlar ve sonunda birleşirler. Agregaların matriksten daha güçlü olduğu durumda tüm çatlaklar arayüzeyden geçerek ilerler [109].

$$K_{IC} < K_{IC}^A \quad (7.2)$$

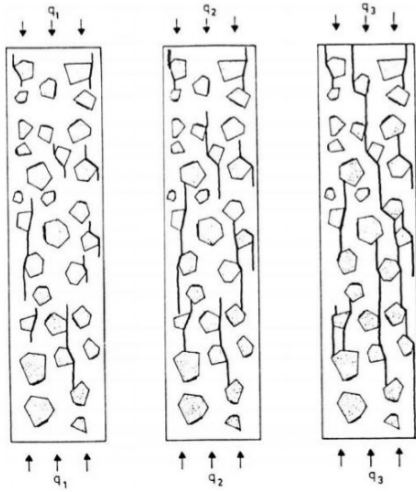
Artan yüklemenin üç aşaması Şekil 7.7’de gösterilmektedir. Burada q_1 ’in nihai yüklemenin %50’sinden büyük olmasına dikkat edilmelidir. Yük arttıkça yapının

bütünlüğü zamanla bozulur ve daha çok sayıda ve daha uzun çatlaklar oluşmaya başlar [109].

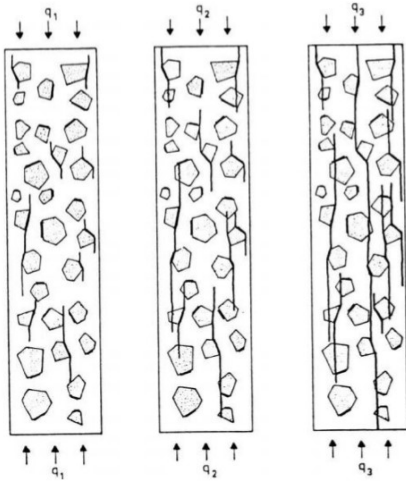
Sonuç olarak eğimli bir çatlak numune boyunca ilerlemiştir. Bu durum malzemenin yıkımı/bozulması olarak tanımlanır [109].

Normal betonda matriksin agregadan çok daha zayıf olduğu düşünülür. Bu nedenle çatlaklar yollarından saparlar. Bu durum yüksek mukavemetli betonlarda söz konusu değildir. Burada matriksin ve agreganın mukavemetleri aynı büyüklükte ya da matriks mukavemeti agrega mukavemetinden yüksek dayanıma sahiptir:

$$K_{IC} \geq K_{IC}^A \quad (7.3)$$



Şekil 7.7. Normal dayanımlı betonun basınç altında üç aşamalı çatlak dağılımı [108, 109]



Şekil 7.8. Yüksek dayanımlı betonun basınç altında üç aşamalı çatlak dağılımı [108, 109]

Bu koşullar altında çatlak bir agreganın içinden geçebilir. Aslında bu durum daha çok agregaların geometrik düzenine bağlıdır. Şekil 7.8’de yüksek mukavemetli bir betondaki çatlak oluşumu örneği gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, ilk çatlağın numune boyunca ilerlemesinde olduğu gibi yıkım yine çatlak modeline göre tanımlanmıştır. Yüksek mukavemetli betonlarda, çatlakların uygulanan yükün doğrultusu boyunca ilerlemesi daha olasıdır [109].

Yüksek mukavemetli betonlar, normal betonlara göre daha kırılğan tepkiler gösterirler. Bilgisayar deneyinde bu durum, q1 aşamasına bir kez erişildiğinde, nihai yıkımın yüklemdeki ufak bir artışın ardından meydana gelmesiyle gösterilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere çatlak oluşumuyla absorbe edilen toplam iş yüksek mukavemetli betonlarda normal betonlara göre düşük seviyede kalmıştır [108, 109].

7.6. Agregâ Şekil ve Boyutunun Dayanıma Etkisi

Betonun içinde bulunan agregaların şekli, taze ve sertleşmiş betonun durabilitesi, işlenebilirliği, kayma dayanımı, çekme mukavemeti, rijitliği, yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerini etkiler. Mühendislik yapılarında kullanılacak betonun içeriğinde bulunacak olan agreganın, geometrik ve petrografik özelliklerine uygun karar verilmesi önem taşımaktadır. Seçilen agregalar, betonun reolojik özelliklerini de etkileyecektir. Bu anlamda araştırmalarda agregaların geometrik özellikleri açısından daha çok, şekil faktörü, uzunluk oranı, küresellik, yassılık, uzunluk miktarı, yuvarlaklık, aç vb. parametreler üzerinde çalışılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, agreganın betonda açılı pozisyon almasının basınç dayanımını daha çok geliştirdiği görülmüştür. Ayrıca, kaba agregaların mineralojik ve morfolojik özelliklerinin betonun rijitliğini doğrudan etkilediği anlaşılmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada, çarpma etkisi altındaki betonda bu bakış açısıyla ne gibi değişimler olduğu değerlendirilecektir [110-112].



8. DENEYSEL PROGRAM

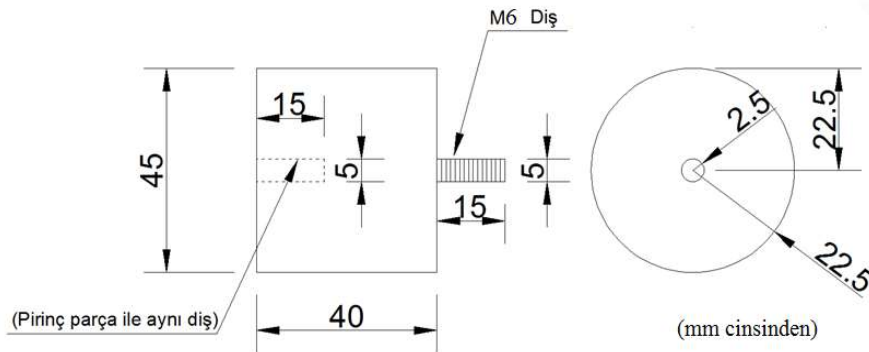
8.1. Deney Düzenegi

Her tasarım ihtiyaçtan doğar. Dolayısıyla, bu çalışmada böyle bir dayanıma ihtiyaç duyulmasındaki ana neden, çarpma deneylerinin düz şerit betonlar üzerinde yapılmak istenmesi ve numunelerin narinlik boyutların yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Aynı zamanda hem yüksek hızlı çarpma deneyleri hem tekrarlı düşüde düşük hızlı çarpma deneylerine müsaade edebilir bir aparat geliştirilmeye çalışılmıştır. Deney için özel tasarlanan çarpma mekanizması, 2 ana parçadan oluşmaktadır. İlk parça, hareketli olup deney sehпасının üzerine yerleşebilmektedir. Bu hareketli parça 4 adet Ø30 mm çaplı paslanmaz çelik 110 cm uzunluğundaki direklerin üzerinde yükselmektedir. Bu parçanın çalışma yüksekliği 100 cm'dir ve yarısından itibaren net çalışma mesafesine kadar 50 cm boyunca, 10 cm'de bir olmak üzere toplam 6'şar adet delik açtırılmıştır. Bu deliklerden, makine yüksekliğini istenilen düzeyde sabitlemek için temin edilen 4 adet çelik pim geçmektedir. Bu sayede şahmerdanı taşıyan mekanizma farklı yüksekliklerde, dolayısıyla farklı kapasitelerde çalışabilir hale getirilmiştir. Bu direklerin alt ve üst ucu 5 cm montaj payı olmak üzere, üst ucuna 60 kg'lık 2 cm kalınlığında 50×60 cm²'lik çelik levha adapte edilmiştir. Çelik levhanın köşegenlerinin kesim noktası merkez olmak üzere 26 mm çaplı pürüzsüz delik açtırılmıştır. Bu deliğin içinden geçmek üzere Ø25 mm çaplı 100 cm'lik çelik deney şahmerdanına sonsuz kramayer dişlisi açtırılmıştır. Bu milin, yörüngesinde kılavuz olarak kullanılması amaçlanmıştır. Şahmerdanın dışından geçmek üzere 70 cm uzunluğunda, Ø26 mm çaplı ve Ø2,8-Ø3,0-Ø3,30 mm et kalınlıklı, 15 mm adımlı yay çektilirilmişir. Böylece şahmerdan yayın sıkışma katsayısına bağlı olarak depolanan enerjiyle yüksek kapasitede kuvvet ve ivmeye çıkabilmektedir. Aynı zamanda, değişik yüksekliklerde sıkıştırılarak elde edilmek istenen enerji seviyesi ayarlanabilmektedir. Şahmerdanın alt ucuna 5 cm çaplı 2 cm uç kesitli bir topuz yerleştirilmiştir. İnsan gücüyle çalıştırabilmek amacıyla kramayer dişlisiyle uyumlu pinyon ve yataklar üst levhaya kaynaklanarak adapte edilmiştir. Bunun yanı sıra güvenlik ve deney anını başlatmak amacıyla sabitleyici bir tetik mekanizması da tasarlanmıştır. Bir çevirme kolu anahtarıyla yaylı şahmerdan, sıkıştırılarak ani çarpma kuvveti uygulanabilmektedir. İkinci ana parça ise deney sehпасı olup 50 cm yüksekliğinde 40×40 mm² kutu profil 4 ayak üzerinde 50×60 cm²'lik çelik levha bijonlarla vidalanarak ve sonrasında kaynaklanarak sabitlenmiştir. Yine

bu çelik levhanın köşegenlerinin kesim noktası merkez olmak üzere numuneleri adapte edebilmek amacıyla Ø20 mm çaplı pürüzsüz delik açtırılmıştır. Ancak, çarpma uygulandığı esnada makinede gerçekleşecek titreşimleri ve sarsıntıları önlemek ve/veya sönümlmek amacıyla alt ayaklara teleskopik kauçuk ayak monte edilmiştir. Ayrıca, çarpma sırasındaki numuneden gelebilecek sıçrayan parçaları önlemek amacıyla 40×60×55 cm ebatlarında kafes yaptırılmıştır. Makinenin tamamı 200 kg'dır (Geliştirilen Çarpma Deney Makinesi için bkz. EK-1).

8.2. Teçhizatlandırma

Yapılacak olan deneylerden veri elde edilebilmesi için geliştirilen deney düzeneğinin teçhizatlandırılması önem taşımaktaydı. Bu amaçla 5 cm çapındaki PCB çarpma kuvvet sensörünü şahmerdana adapte edebilmek için aşağıda çizimi gösterilen paslanmaz çelikten 2 adet aparat yaptırılmıştır. Şahmerdan, çelik topuzlu ucundan 10 cm kesilmiş ve iki ucuna vida yuvası açılmıştır. Bu aparatlar şahmerdana bu yuvalardan vidalanarak arasına, dinamik yük hücresi kendi özel inç birimli pirinç vidasıyla montajlanabilmektedir (Ara Aparat için bkz. EK-1, 5 no'lu Parça).



Şekil 8.1. Ara aparata ait çizim



Resim 8.1. Pirinç vidanın yatay ve düşey görünümü



Resim 8.2. 1-PCB dinamik yük-ölçer, 2- PCB ivme-ölçer, 3- İvme-ölçer adaptörleri

Bunun yanı sıra, sonradan kesilen 10 cm'lik şahmerdan mili ve çelik topuz arasına; 10 cm genişliğinde, 5 cm eninde, 5 mm kalınlığında paslanmaz çelik levha üretilerek yerleştirilmiştir. Bu levha, 5000g kapasiteli ivme-ölçerin adaptasyonu için kullanılmaktadır. Konsol olarak çalışan bu levhadaki esneme ve titreşimler bütün deneyler için özdeş olacağından ivmedeki değişimler karşılaştırılabilir.

Beton numunelerin deneye tabii tutulabilmesi için makinenin alt tabladaki düzlemine mesnetlemek amacıyla paslanmaz çelikten bir aparat daha yaptırılmıştır (Bkz. Resim 8.3 ve EK-1, 10 no'lu parça).



Resim 8.3. Mesnetleme aparatının makine bünyesindeki üst ve alt görünümü

8.3. Kalibrasyon

Deneye başlamadan önce kullanılacak olan bütün deney cihazlarının bir defalığına mahsus olmak üzere kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi ve bağlantılarının sağlanarak çalışırılık durumlarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kullanılan deney ölçüm cihazlarının kilitli veri giriş soketleri, dijital veri toplama ve dönüştürme cihazlarıyla bilgisayara bağlanarak yine bilgisayar ortamında kurulan programlar eşliğinde çalıştırılmıştır. Bu programlar ikiye ayrılmaktadır ki ilki deney sırasında deneyin yürütülmesi ve verilerin kaydedilmesini sağlamaktayken, ikincisi bu verilerin grafiğe dökülmesini, elde edilen veriler üzerinden hız ve deplasman verilerinin hesaplanmasını ve başka programlara bu veri ve grafiklerin aktarılmasına yaramaktadır. Her çarpma etkisi uygulanmadan önce dinamik yük hücresinin ve ivme-ölçerin tepkisi kontrol edilmiştir. Kapasitesi yüksek olan ölçüm cihazlarının ölçüm sınırları dâhilinde emniyetli bir şekilde kalındığından deney süresince ekstra bir kalibrasyona ihtiyaç duyulmamıştır.

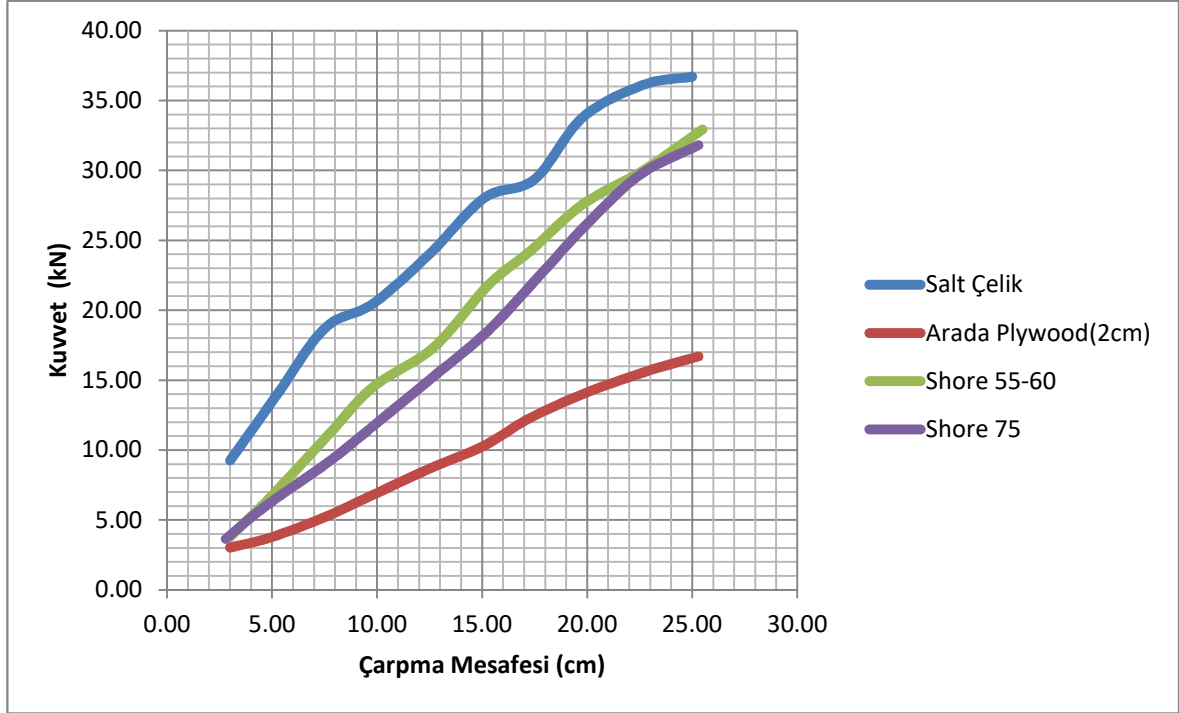
8.4. Deney Mekanizmasının Kullanılması

Beton numunenin kırılması için gerekli kinetik enerjiyi belirlemek amacıyla önceden silindirik çelik bir elemana 2,5 cm'den 25 cm'ye kadar değişen yüksekliklerde yay sıkıştırılarak çarptırılmıştır. Bu silindir çelik elemanın yüksekliği 30 cm olup çarpılan yüzey bu silindire kaynaklanmış 1 cm kalınlığındaki kare çelik bir levhadır. Bu karenin kenar uzunluğu 19,5 cm'dir. Böylece kullanılan deney düzeneği tam elastik çarpışma varsayılarak standardize edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra bu çelik silindir numunenin üzerine farklı özelliklerde sönümleyiciler (2 cm kalınlığında plywood, 3 mm kalınlığında 55-60 shore ve 75 shore ezilmeye karşı dayanıklı neopren kauçuk ped) yerleştirilerek beton numunelerde kullanılacak sönümleyici (shore 75 olarak) yine aynı yüksekliklerde test edilerek belirlenmiştir. (Bakınız Şekil 8.2) Bu sönümleyici diğer sönümleyiciler arasında en makul eğriyi gösterdiğinden seçilmiş olup numuneye verilen hasarı kontrol edilebilir kılmak ve ölçülecek kuvvet verilerini daha sağlıklı ve karşılaştırılabilir sınırlar içerisinde elde etmek için kullanılmıştır. Daha sonra, mesnetleme aparatı deney düzeneğine yerleştirilip sıkıştırıldıktan sonra kullanılacak olan beton numune bu aparat yardımıyla sabitlenmiştir. Üretilen ve sonradan çatlama güzergahının belirlenmesi için çentik açılan beton numuneye eksantrik olarak çarpma yükü uygulanmıştır. Zira, literatür tarandığında genellikle çentikli şerit beton numunelerde çarpma deneylerinin betonun simetri eksenine

göre eğilme momenti oluşturularak, düşey tarafsız eksenin yarı yüzünde çekme diğer yüzünde ani basınç gerilmeleri meydana getirilecek biçimde uygulandığı görülmüştür [116].

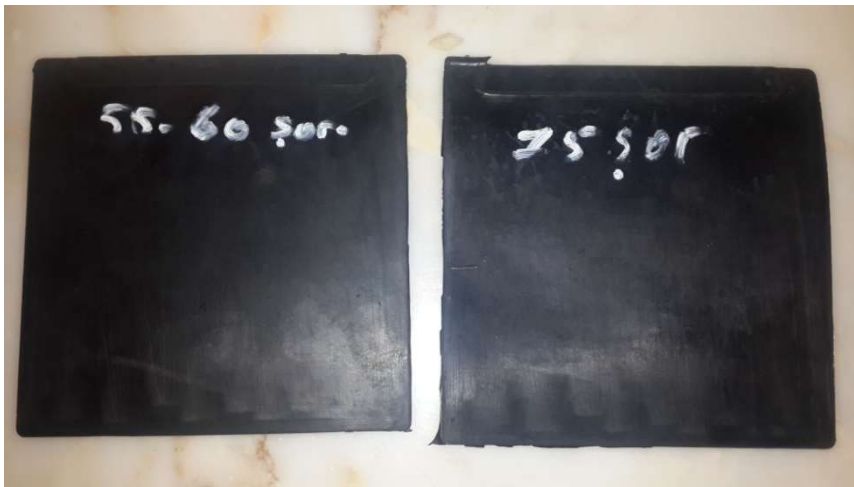


Resim 8.4. Deney düzeneğinin konuşlanması

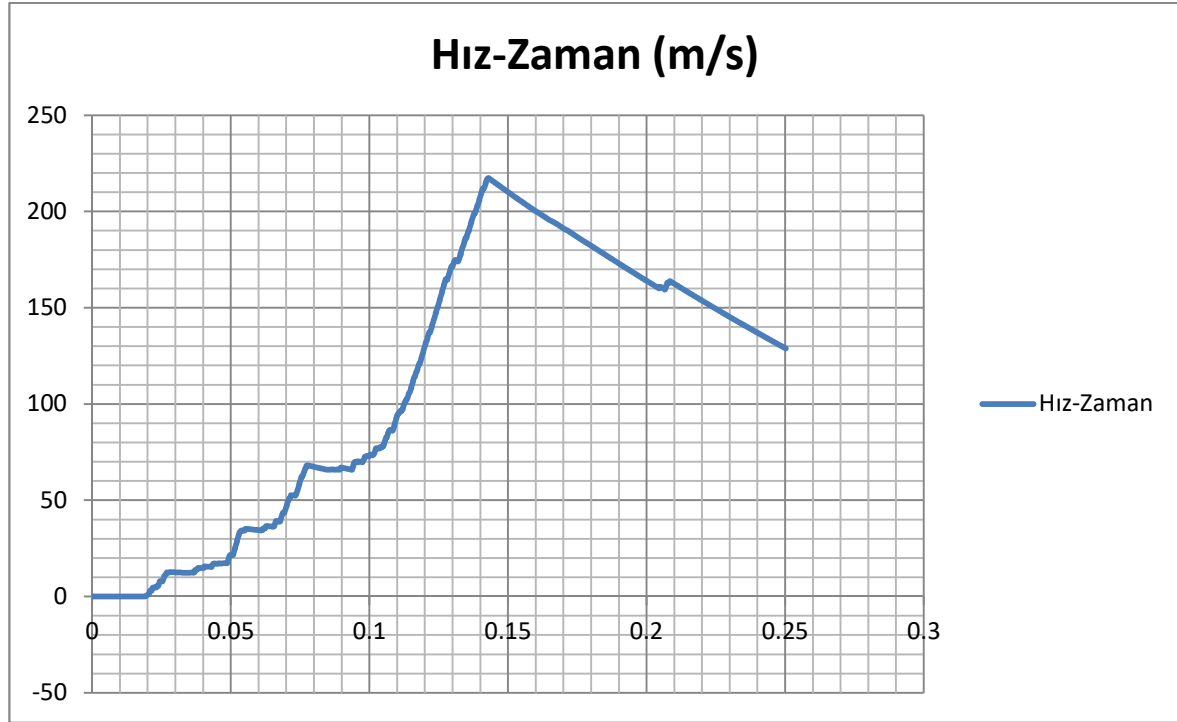


Şekil 8.2. Deney mekanizmasının standardizasyonu ve sönümleyicinin tayini

Bu özel olarak geliştirilen deney cihazıyla yayın maksimum sıkışma düzeyinde kullanıldığında yani maksimum kapasitede, şahmerdan hızı 200 m/s olarak ölçülmüştür. (Bkz. Şekil 8.3). Ayrıca, deplasman-zaman veri eğrisine, uyan en doğru parabolik eğrinin teğetinin eğimi yani bu eğri denkleminin türevinden şekil değiştirme hızı 10^3 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla geliştirilmiş olan bu makineyle, hem düşük hızlarda deneyler yapılacağı gibi hem de yüksek hızlı çarpma deneyleri uygulanabilmektedir.



Resim 8.5. 3mm et kalınlıklı neopren kauçuk malzemeye ait görüntü



Şekil 8.3. Maksimum kapasitede şahmerdanın hız-zaman grafiği

Deney makinesi kullanıldıktan sonra elde edilen veriler sayesinde Hooke Yasası uygulanırsa,

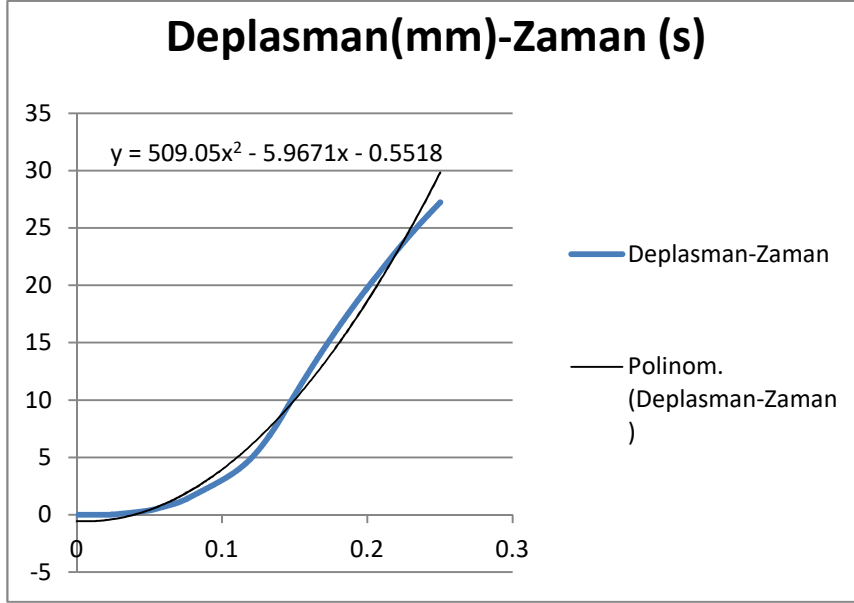
$$F = k \cdot x \quad (8.1)$$

İş-Enerji Denklemleri Eşitliğinden;

Potansiyel Enerji= Kinetik Enerji

$$mgh + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mV^2 + 0 \quad (8.2)$$

Elde edilen veriler yerine yazıldığında, yay sabiti; $k \approx 15 \text{ kN/m}$ olarak bulunur. 5,1 cm yüksekte tam elastik çarpışma sırasında her düşümde uygulanan toplam kinetik enerji, 1200 J (joule)'dür.



Şekil 8.4. Maksimum kapasiteside tam elastik çarpışmada deplasman-zaman grafiği

$$y = 509,05x^2 - 5,9671x - 0,5518 \quad (8.3)$$

Eş.8.3'teki denklemin türevi alınırsa,

$$\frac{dy}{dx} = 1018,1x - 5,9671 \quad (8.4)$$

Eş.8.4'teki tam türevi alınan denklemde x değişkeninin katsayısı parabole çizilen teğetin eğimidir ve yaklaşık 10^3 'e eşittir.



Şekil 8.5. Yükseklik-şekil değiştirme hızı grafiği

Eş.8.4'teki gibi hesaplamalar yapılarak yaklaşık 2,5 cm özdeş aralıklarla yapılan düşümlerde elde edilen tam elastik çarpışmadaki şekil değiştirme hızları Şekil 8.5'te görüldüğü gibidir. Böylece, deneyler için geliştirilen makine prototipi Şekil 2.10'daki genelleştirilmiş test cihazları kategorisine göre düşük yüksekliklerde hem kısmi(quasi) statik deneyler yapılabilmekte, hem de büyük yüksekliklerde ise sert çarpma etkilerini(kaya düşmeleri, depremler, patlayıcı etkiler ve füze saldırıları gibi) simule eden deneyler yapılabilmektedir.

8.5. Beton Numunelerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler

8.5.1. Çimento

ÇİMSA Süper Beyaz - CEM I 52,5 R Beyaz Portland Çimentosu yüksek dayanımlı beton üretimi için ana malzeme olarak temin edilmiştir. (Bkz. Resim 8.1). Numune sayısı ile doğru orantılı olarak kullanılacak çimento miktarı beton karışım hesaplarına göre fazla miktarda depolanmıştır. Kullanılan Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile basınç dayanımı aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 8.1. Çimento'nun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Çimento Kalıntı (%)	0,2	Cl ⁻ (%)	0,008
SiO ₂ (%)	21,6	C ₃ S (%)	53,92
Al ₂ O ₃ (%)	4,1	C ₂ S (%)	25,81
Fe ₂ O ₃ (%)	0,3	C ₃ A (%)	11,21
CaO (%)	65,6	C ₄ AF (%)	1,05
MgO (%)	1,03	2 günlük Dayanım (mPa)	37,7
SO ₄ (%)	3,3	7 günlük Dayanım (mPa)	51,9
Kızdırma Kaybı (%)	3,2	28 günlük Dayanım (mPa)	63,7
Na ₂ O (%)	0,17	Yoğunluk (g/cm ³)	3,03
K ₂ O (%)	0,46	Yüzey Alanı (cm ² /g)	4550



Resim 8.6. Çimsa süper beyaz- CEM I 52,5 R beyaz portland çimentosu

8.5.2. Agrega

Üretilen betonlarda agrega olarak İstanbul/Şile’de ÇELİKTAŞ A.Ş. tarafından üretilen AFS 40-45 kodlu silis kumu kullanılmıştır. Kullanılan silis kumunun kimyasal ve elek analizleri Çizelge 8.2 ve Şekil 8.5’deki gibidir.

Çizelge 8.2. Silis kumunun kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Analiz	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃ ve Diğerleri
Maksimum %	98,85	0,32	0,015	0,03	0,054	0,771	1,187
Minimum %	98,02	0,11	0,01	0,018	0,03	0,048	0,39

Elek Boyutu (µm)	Üretim Aralığı %	Analiz Sonucu %	
+ 1000	0-1	0.1	
710-1000	1-8	1.7	
500-710	7-25	9.7	
355-500	10-35	28.2	
250-355	25-45	41.5	
180-250	5-30	16.7	
125-180	0-7	1.7	
90-125	0-1	0.3	
0-90	0-0,3	0.0	
43,0 AFS			

Şekil 8.6. Silis kumunun elek analizi ve fiziksel görünüşü

8.5.3. Kimyasal katkı malzemesi-süper akışkanlaştırıcı

Bu çalışmada kimyasal katkı malzemesi olarak BASF firmasına ait polikarboksilit eter esaslı, yüksek oranda su azaltan, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan hazır beton ve prekast endüstrisi için geliştirilmiş, yeni nesil süper-akışkanlaştırıcı “MasterGlenium51” ürünü kullanılmıştır. Bu süper-akışkanlaştırıcı yüksek oranda su azaltırken beton işlenebilirliğini en üst seviyede tutmakta ve betonun priz süresinde herhangi bir gecikmeye neden olmamaktadır. Ayrıca, üretimin ardından son

performans yüksek olmaktadır. Betonun karbonatlaşma, klor iyonu atağına karşı direnç, agresif kimyasallara dayanıklılık, rötre ve sünme gibi mekanik özelliklerini iyileştirirken düşük su/çimento oranına sahip, ayrışma ve kasma riski az, reoplastik beton elde edilir.

8.5.4. Karışım ve kür suyu

Deneysel çalışmaların tamamında karışım ve kür suyu olarak Ankara ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Kür suyunun sıcaklığı 20 °C olarak sabit tutulmuştur.

8.6. Yüksek Dayanımlı Betonun Üretilmesi

8.6.1. Beton karışım oranları

Bu çalışmadaki çimento dozajı 1000 kg/m³ 'tür. Yüksek dayanımlı betonların üretilmesi için su/çimento oranı 0,20 olarak düşük seçilmiştir. Beton karışım oranı belirlenirken, 20 döküm ve 60 numune üzerinde önçalışma yürütülmüş ve prizini alan numuneler 7 günlükken kırılarak dayanım açısından mükemmel ve hassas bir karışım oranı bulunmuştur. Beton Karışım oranları Çizelge 8.3'te verildiği gibidir.

Çizelge 8.3. Beton karışım oranları

Çimento (kg/m ³)	Agrega(Silis Kumu) (kg/m ³)	Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	S/Ç
1000	900	30	200	0,20

8.6.2. Betonun hazırlanışı

Kesintisiz üretim yapılması için her seferinde kalıplara dökülecek beton miktarından biraz fazlası emniyetli tarafta kalınarak hesaplanmış ve karıştırılmıştır. Bunun için,

1. Öncelikle çimento ve silis kumu tamamen homojen görünüme kavuşana kadar kuru olarak beton mikserinin en yavaş modunda karıştırılmıştır.

2. İkinci aşamada, uygun miktarlarda tartılan karışım suyu ve süper akışkanlaştırıcı karıştırma işlemi devam ederken sırasıyla ortalama 2,5 mililitre/saniye ve 0,5 mililitre/saniye debiyle karışım boyunca (yaklaşık 5 dakika) eklenmiştir.
3. Beton mikserinin orta hız modunda karışım devam ettirilerek toplam 15 dakikada sonlandırılmıştır.

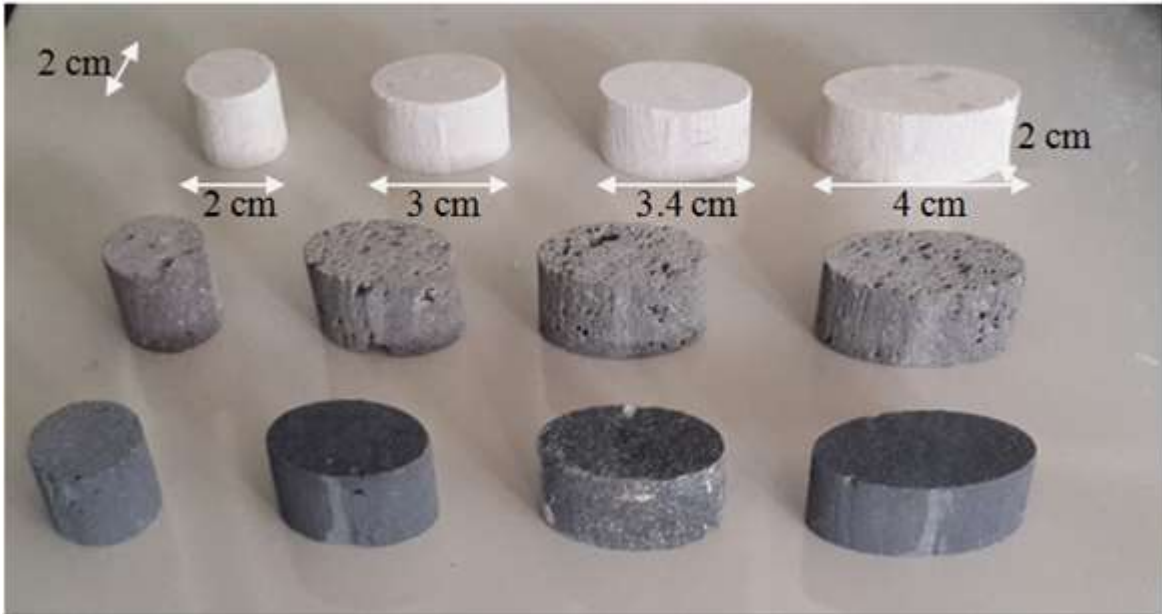
Ardından, hazırlanan yüksek dayanımlı beton karışımı önceden kalıp yağıyla ince bir film tabakası halinde yağlanan çelik kalıplara aynı anda dökülmüştür. Beton dökme işlemi tamamlandıktan sonra kalıplara kauçuk tokmakla titreşim uygulanarak betonun yerleşmesi ve olası hava boşluklarının numune içinde bulunmasının önlenmesi amaçlanmıştır. Çelik kalıpların terazisinde olmasına özen gösterilmiştir. 90 dakikada (oda şartlarında) priz almaya başlayan numunelerin 1 gün boyunca priz alması beklenerek, 24 saat sonunda kalıplardan alınmış ve kür havuzuna konulmuştur. 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilen her numune, daha sonra havuzdan çıkarılarak deney anına kadar laboratuvar şartlarında saklanmıştır. Üretilen beton numunelerin her birinin dayanımlarının tasarımı minimum 120 mPa olacak şekilde yapılmıştır. Hazırlanan karışımların bu dayanıma sahip olmasına merkezlerine yerleştirilecek olan yapay agregaların dayanımları arasında kalması açısından özen gösterilmiştir ki oluşacak kırılma çatlaklarının gelişimi incelenebilsin.

8.7. Beton Numuneler

4 farklı geometride, 3 farklı doğrultuda ve 3 farklı petrografik tipte olmak üzere yapay agrega yüksek dayanımlı betonların merkezlerine yerleştirilerek, toplamda 30 adet $100 \times 400 \times 20 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki prizmatik yüksek dayanımlı beton numunelere genişliklerinin yarısından olmak üzere karşılıklı 1,5 cm derinliğinde 3mm kalınlığında çentikler beton kesme makinesi yardımıyla açılmıştır. Bu çentiklerin agregaların merkezine denk gelmesi önem taşımaktadır zira açılan çentikler sayesinde oluşacak çatlak ve kırılmanın önceden belirlenmiş bir kesitte gözlenebilmesi amaçlanmıştır. Bu numunelerin, çarpma etkisi altındaki performansı incelenmiş, agrega ve beton arayüzeyindeki kırılma çatlaklarının yörüngeleri izlenmiştir. Deneylere kontrol numunesi olması amacıyla 3 adet daha agregasız kiriş numunesi eklenmiştir. Dayanım kontrolü amacıyla hazırlanan küp numuneler($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$) ve daha küçük boyutlardaki ($150 \times 50 \times 20$ ve $25 \times 25 \times 100 \text{ mm}^3$) prizmatik kiriş numunelerle birlikte toplam numune adedi 148'dir.

8.8. Çarpma Deneylerinde Yapay Agregalar

Deneylerde 2 cm kalınlıkta andezit, beyaz kireç taşı(limra) ve siyah bazalt olmak üzere 3 farklı doğal taştan agreg, Ankara Yuva Köyü Mermerciler Sitesinden temin edilerek İvedik Organize Sanayi Bölgesinde Bilgisayarlı Su Jeti yardımıyla 4 farklı geometride kestirilmiştir. Bu doğal taşların $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 'lük basınç dayanımları (Andezit İçin Port:78,2 mPa ve Bazalt İçin Port:165,5 mPa, Kireçtaşı için Port: 55 mPa) olarak üreticiden alınmıştır. Agreg geometrisi sırasıyla boyuna kesitte çapı 2 cm dairesel; 2cm-3cm, 2cm-3,4cm; 2cm-4cm eliptik kesit olarak seçilmiştir. Bu agregaların merkezi beton şerit numunelerin köşegenlerinin tam kesiştiği noktaya yerleştirildiğinden, 3 farklı doğrultuda (0° - 45° - 90°) kullanılmaya yetecek kadar asıl 30 adet olmak üzere yedeklerle birlikte agreg kestirilmiştir.



Resim 8.7. Deneylerde kullanılan kireç taşı, andezit ve bazalt yapay agregalar

8.9. Şerit Beton Numunelerin Adlandırılması ve Kodlanması

Bütün numunelerdeki yüksek dayanımlı beton özdeş olduğundan değişkenlik gösteren yapay agregalara göre adlandırma tercih edilmiştir. Bu yapay agregalar her şerit betonun merkezinde yer alacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu kodlandırma Çizelge 8.4'deki metodolojiye göre yapılmıştır.

Çizelge 8.4. Kodlandırma şeması

		ANDEZİT				KİREÇ TAŞI(LİMRİ)				SİYAH BAZALT			
Çap (cm)		2:2	2:3	2:3.4	2:4	2:2	2:3	2:3.4	2:4	2:2	2:3	2:3.4	2:4
AÇI	0°	A1-1	A1-1,5a	A1-1,7a	A1-2a	K1-1	K1-1,5a	K1-1,7a	K1-2a	B1-1	B1-1,5a	B1-1,7a	B1-2a
	45°		A1-1,5b	A1-1,7b	A1-2b		K1-1,5b	K1-1,7b	K1-2b		B1-1,5b	B1-1,7b	B1-2b
	90°		A1-1,5c	A1-1,7c	A1-2c		K1-1,5c	K1-1,7c	K1-2c		B1-1,5c	B1-1,7c	B1-2c

Çizelge 8.5. Döküm sırası kodlandırması

Numune Adı	Döküm Tarihi
Referanslar-1	18.03.2016
D1	15.04.2016
D2	18.04.2016
D3	19.04.2016
D4	20.04.2016
D5	25.04.2016
D6	27.04.2016
D7	28.04.2016
D7b	29.04.2016
D8	01.05.2016
D9	02.05.2016
D9b	03.05.2016
D10	04.05.2016
D (2-9) (b-c)	11.06.2016

Çizelge 8.5'teki döküm kodlarında; (b), (c) gibi ekstra harflerle adlandırma yapılmasının nedeni esas dökümler yapıldıktan sonra, numuneler kalıptan alınırken veya alındıktan sonra laboratuvar kazalarının yaşanması ve bundan ötürü numune sayısının tamamlanması açısından yeniden aynı beton karışımıyla numune hazırlanması için döküm yapılmıştır. Bu dökümlere ait basınç dayanımı sonuçları için Çizelge 8.6'ya bakılabilir.

8.10. Eğilme Deneyi Cihazı

Üretilen $2,5 \times 2,5 \times 10 \text{ cm}^3$ 'lük kare prizma yüksek dayanımlı betondan kirişler için 100 kN yük kapasiteli, yük uygulanırken 0,005 mm/s deplasman hassasiyeti bulunan, deformasyon kontrollü bir yükleme cihazı (Shimadzu-Tensile Tester-Universal Testing Machines-AG-X Series) kullanılmıştır. Bu cihazda, yardımcı aparatlar sayesinde hem basınç hem de 3 ve 4 noktalı eğilme deneyleri yapılabilir. Bu cihazda yapılan bütün eğilme testleri 0,03 mm/dk deney hızıyla yapılmıştır. (Bkz. Resim 8.8)



Resim 8.8. Eğilme deneylerinde kullanılan test cihazı

8.11. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Bütün dökümlerden üçer adet $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 'lük küp numuneler alınmıştır. Bu numunelerin standart basınç mukavemetleri ve yük –zaman grafikleri, 2000 kN yük kapasiteli hidrolik press test makinesi yardımıyla tespit edilmiştir. (Bkz. Resim 8.8, Resim 8.9, EK-3, Çizelge 8.5)

Beton basınç mukavemetleri 28 gün kürde bekletilmiş ve deney gününe kadar yüzey kuru olarak saklanmış küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Tüm numunelere ait küp basınç deney sonuçları Çizelge 8.6'da mevcuttur.

Çizelge 8.6. Küp beton numunelerin basınç dayanımları

Küp Beton Numune Sonuçları	Numune Kodu veya Adı		Döküm No	Numune (1) (MPa)	Numune (2) (MPa)	Numune (3) (MPa)	Ortalama (MPa)
	18.03.2016						
	Referans-1		İLK	131,76	153,96	---	142,86
	A1-1		D1	127,96	110,92	53,12	97,33
	B1-1						
	K1-1						
	A1-1,5 b,c		D2	160,92	129,24	76	122,05
	K1-1,5 a,b,c		D3	158,24	131,08	171,68	153,67
	B1-1,5 a,b,c		D4	163,56	164,12	181,8	169,83
	A1-1,7 a,b,c		D5	175,08	148,04	129,44	150,85
	K1-1,7 a,b,c		D6	147,56	138,52	142,52	142,87
	B1-1,7 a,c		D7	167,92	164,44	170,52	167,63
	B1-1,7 b		D7b	146,88	163,28	134,76	148,31
	A1-2 a,b,c		D8	155,2	140,56	171,04	155,6
	K1-2 b,c		D9	158,52	167,72	165,28	163,84
	K1-2a		D9b	167,64	168	173,56	169,73
	K1-2a	A1-1,5a	D9c(EK) D2b(EK)	128,28	148,72	161,12	146,04
	B1-2 a,b,c		D10	164,92	158,32	176,08	166,44

Referans-1 Numune (3)'ten ölçüm alınamamıştır. Bu yüzden betonlar, özel bir beton laboratuvarında iki ayrı etapta, sonuçların güvenilirliğinden emin olunduktan sonra, 1,4 MPa/s gerilme testi hızıyla kırılmıştır. Bütün serilerin ortalaması alındığında, 149,8 MPa olarak bulunmuştur. Serilerde ortalamaya katılan 120 MPa'dan küçük numune dayanımlarının (D2 (3), D1 (3) numuneleri) elde edilmesinde, numunelerin tek seferde kırılmaması etkili olmuştur. Serinin standart sapması; 20,2 olarak bulunmuştur.

Burada beton tasarımı yapılırken hedeflenen ana nokta, beton dayanımının seçilen doğal taş yapay agrega numunelerin (kireç taşı, andezit ve bazalt), basınç dayanımlarının arasında kalmasıyla beton içerisinde kırılma mekanizmasını gözlemlemektir.



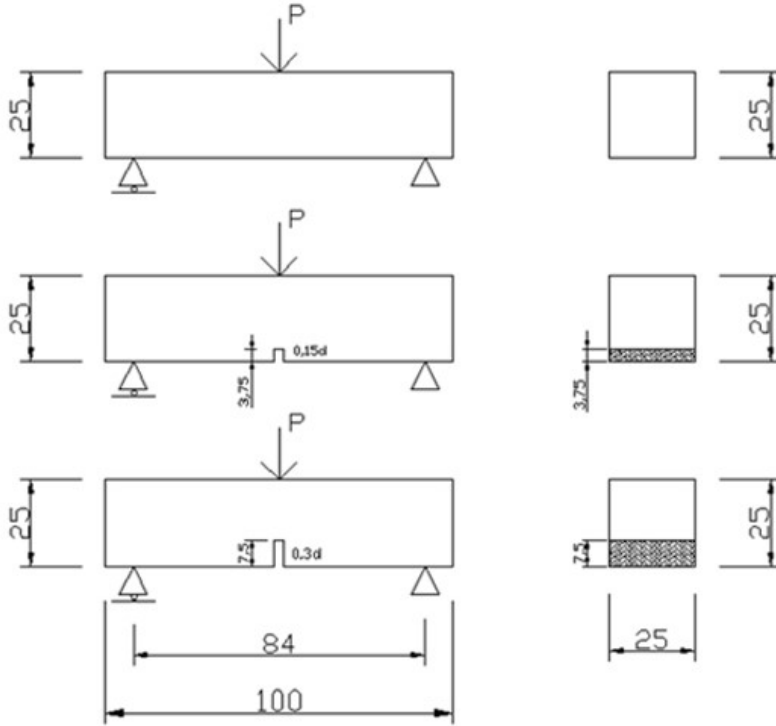
Resim 8.9. Standart küp basınç deneyi



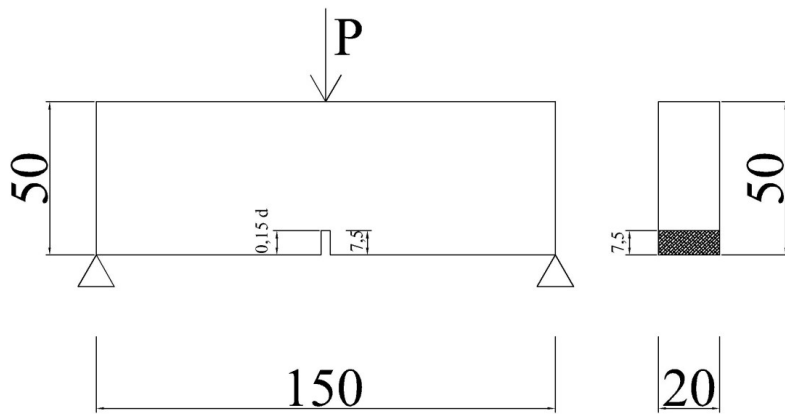
Resim 8.10. Basınç deneyi sonrası beton küp numune

8.12. Üç Noktalı Eğilme Deneyleri ve G_F Kırılma Enerjisinin Bulunması

Numunelerin eğilme dayanımını ve kırılma enerjilerini bulabilmek amacıyla her dökümde üçer adet olmak üzere 2,5x2,5x10 cm boyutlarında ve 2x5x15 cm boyutlarında dökülen kiriş numunelere boyutları oranında farklı çentikler açılmış ve üzerlerinde üç noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. (Bkz. Şekil 8.6, Şekil 8.7). Daha sonra elde edilen grafiklerin altında kalan alandan G_F kırılma enerjisi hesaplanacaktır.



Şekil 8.7. Eğilme deneyi uygulanan birincil kiriş numunelerin kesitleri (mm) [113]



Şekil 8.8. Eğilme deneyi uygulanan ikincil kiriş numunelerin kesitleri (mm)

8.13. Çarpma Deneyleri

Beton numunelere çarpma deneyleri uygulanmadan önce aynı özellikte fazladan dökülmüş deneme ve pilot döküm numuneleri üzerinde düşü yüksekliğine karar verilmeye çalışılmıştır. Bu düşü yüksekliği, numunede tekrarlı deneye yol açsın veya açmasın önceden açılmış karşılıklı çift çentikler arasında göçme yaratacak minimum yükseklik yani enerjinin tespit edilmesi açısından önem taşımaktaydı. Bu yüzden, öncelikle, numuneye 2,3 cm yüksekinden şahmerdan çarpma kuvveti uygulayacak biçimde deneye başlanmıştır. 20 kez düşüm gerçekleştirildikten sonra düşü yüksekliği arttırılmış ve 3,5 cm'den deney tekrarlanmıştır. Dolayısıyla, yine 20 kez yapılan düşümler sonucunda numunelerde göçme gerçekleşmemiştir. Daha sonra, üçüncü aşamada numuneye 5,1 cm yüksekinden, 28 cm sıkıştırılmış yay yardımıyla, teçhizatlandırılmış şahmerdan, kurma kolu yardımıyla ayarlanarak çarpma deneyi gerçekleştirilmiştir ve numunelerin farklı düşü sayılarında kırılabildiği görülmüştür. Devamında bütün deneye esas teşkil eden numuneler özel geliştirilen deney makinesi kullanılarak aynı düşü aralığından kırılmıştır. Kullanılan ölçüm teçhizatı sayesinde şahmerdanın çarptığı anda uyguladığı kuvvet, hız ve deplasmanlar bulunmuştur. Ancak, çatlama anının ve yörüngesinin seyrini daha detaylı spektral özelliklerde inceleyebilmek, yüksek hızlı kamera yokluğundan mümkün olmamıştır. Bu açıdan, alınan yüksek çözünürlüklü fotoğraflarda netleştirilerek belirlenmiş ve kıyaslanacaktır. Aynı açılı ve boyuttaki her numune için grafik özellikleri kullanılarak elde edilen çatlak yörüngeleri birleştirilmiştir. (Birleşik çatlak yörüngeleri için bkz. EK-2)

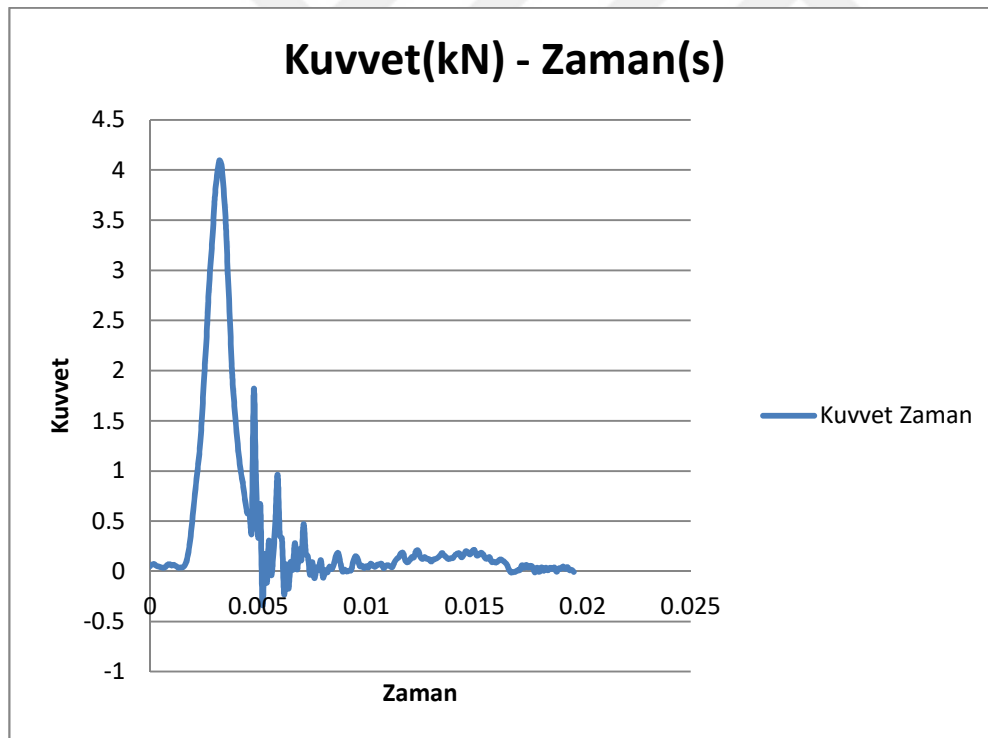
9. DENEYLERİN SONUÇLARI

Bu bölümde deneyler sonucunda bulunan veriler tek tek ve karşılaştırmalı olarak gösterilecek, elde edilen verilerin ışığında sayısal hesaplamalar yapılarak kıyaslanacaktır. Değerlendirmeye geçmeden önce, Çizelge 8.4'deki kodlandırma şemasının hatırlanmasında fayda vardır.

9.1. Çarpma Deneyleri'nde Çatlak Yörüngeleri ve Göçmeye Ait Sonuçlar

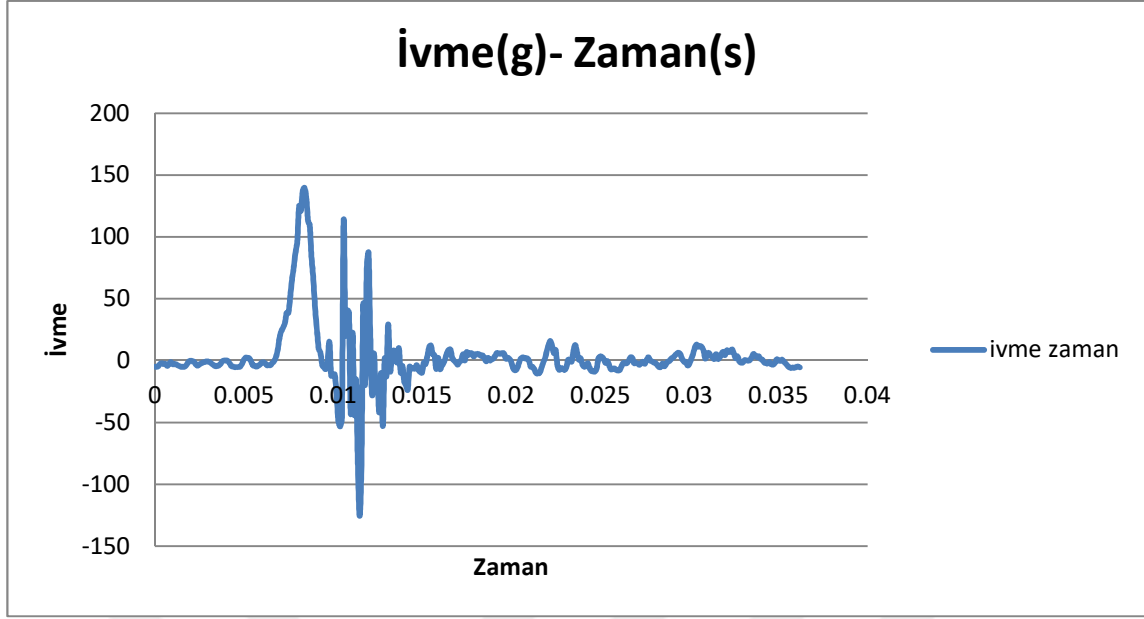
A1-1 numunesi

20 kez 2,3 cm yüksekten üzerinde çarpma deneyi uygulanan numunede göçme gerçekleşmemiştir. Bu deneylerle ilgili ortalama elde edilen grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 9.1. 2,3 cm'de çarpma deneyinin ortalama kuvvet zaman grafiği

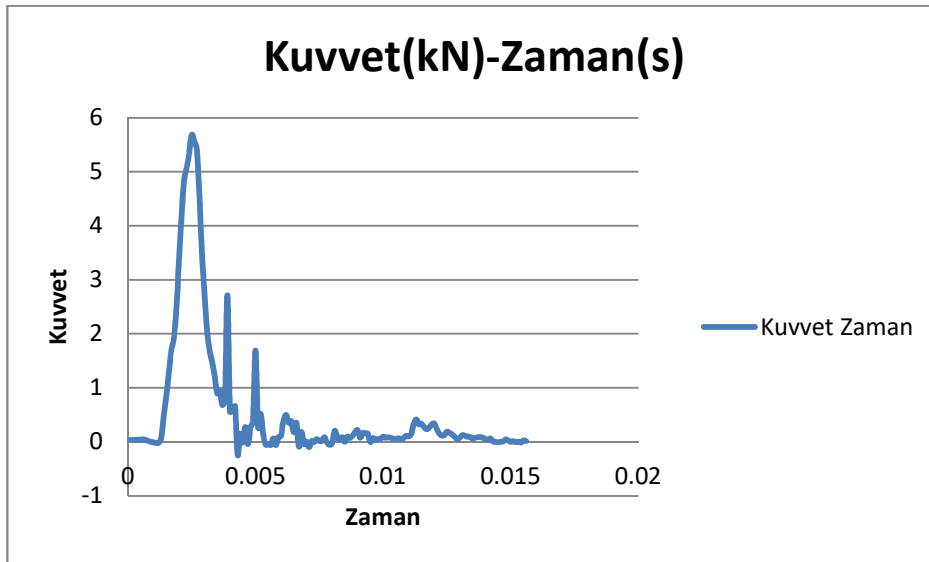
Şekil 9.1'deki, Kuvvet (kN) cinsinden olup, zaman ise milisaniye cinsindendir. Üretilen maksimum çarpma kuvveti 4,09 kN olmuştur.



Şekil 9.2. 2,3 cm’de çarpma deneyinin ortalama ivme zaman grafiği

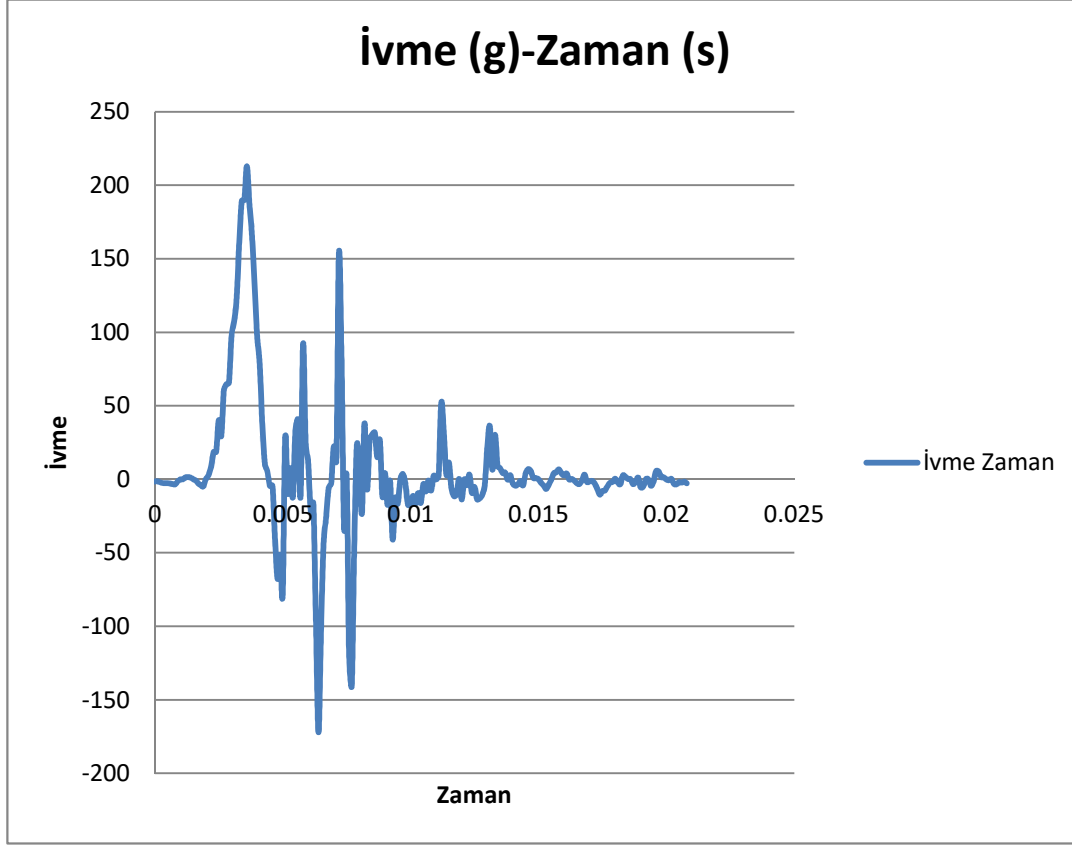
Şekil 9.2’deki İvme, (g) yerçekimi ivmesi cinsinden olup zaman ise milisaniye cinsindendir. Şahmerdanın ürettiği maksimum 139, 85 g ve minimum 125,48 g arasında değişmekte olup maksimum kırılma enerjisini üretmeye yetmemiştir.

20 kez 3,5 cm yüksekte üzerinde çarpma deneyi uygulanan numune göçme gerçekleşmemiştir. Bu deneylerle ilgili ortalama elde edilen grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 9.3. 3,5 cm’de çarpma deneyinin ortalama kuvvet-zaman grafiği

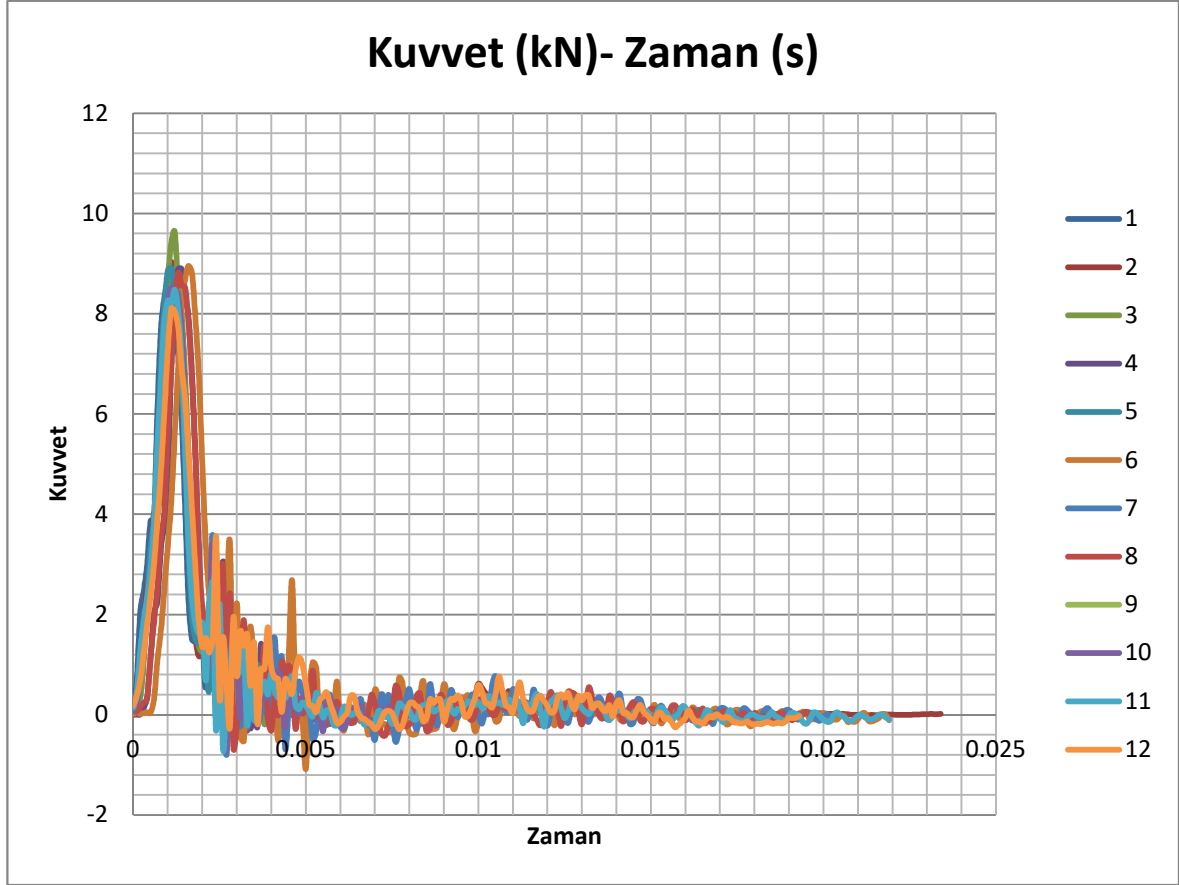
Şekil 9.3'teki, Kuvvet (kN) cinsinden olup, zaman ise milisaniye cinsindendir. Üretilen maksimum çarpma kuvveti 5,68 kN olmuştur.



Şekil 9.4. 3,5 cm'de çarpma deneyinin ortalama ivme-zaman grafiği

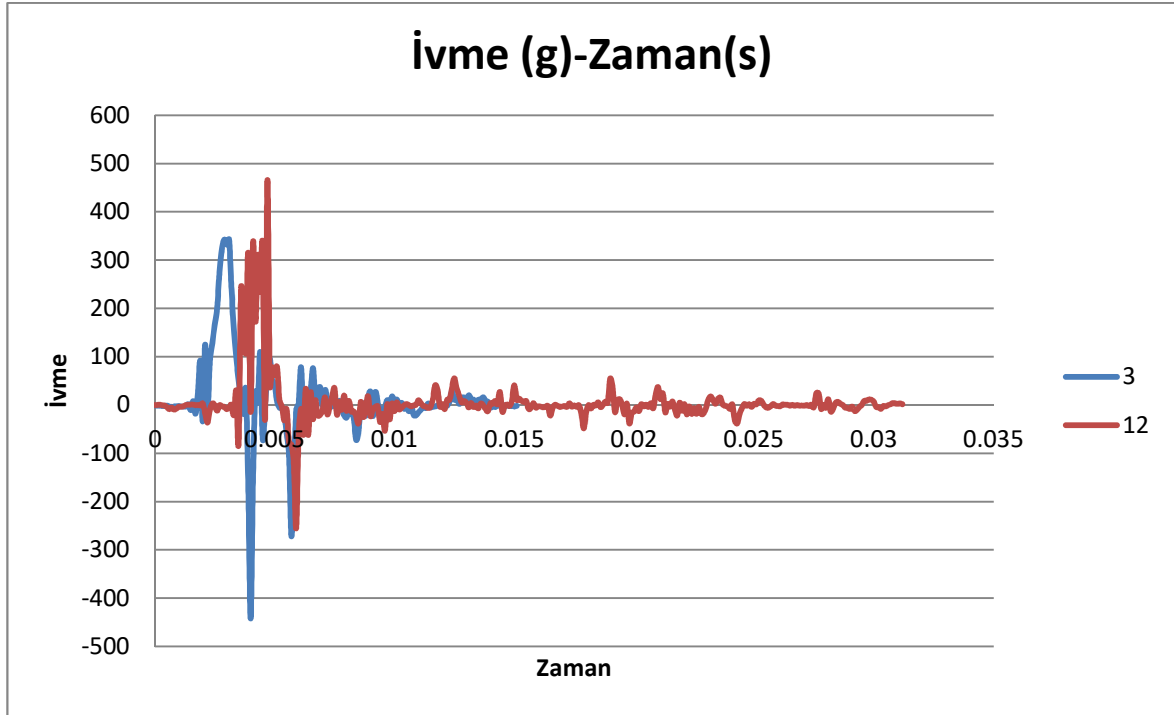
Şekil 9.4'teki İvme, (g) yerçekimi ivmesi cinsinden olup zaman ise milisaniye cinsindendir. Şahmerdanın ürettiği maksimum 212, 78 g ve minimum 172,01 g arasında değişmekte olup maksimum kırılma enerjisini üretmeye yetmemiştir.

5,1 cm yüksekten üzerinde çarpma deneyi uygulanan numunede göçme 12. düşümde gerçekleşmiştir. Bu deneylerle ilgili elde edilen grafikler aşağıdaki gibidir.



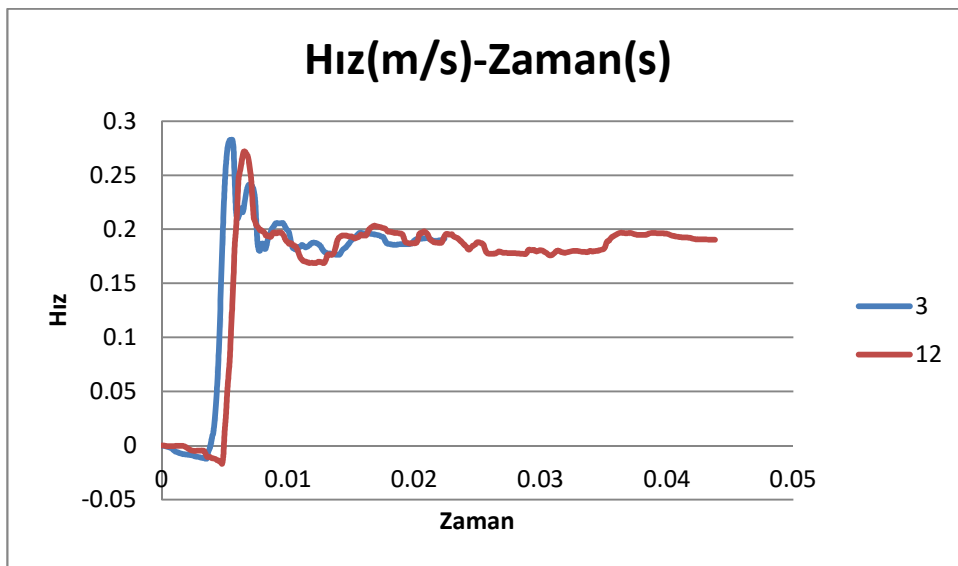
Şekil 9.5. A1-1 numunesine ait kuvvet-zaman grafiği

Şekil 9.5'te 12 düşüme ait kuvvet-zaman grafiği görülmektedir. Bu grafiklerden bazıları temas anının şiddetine ve veri elde edilen programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir. Uygulanan çarpma kuvvetlerinden maksimum kuvvet 9,63 kN ile üçüncü düşü sırasında gerçekleşmiş ancak, numune 12. düşümde görece minimum çarpma kuvvetinde 8,10 kN'da meydana gelmiştir. Bu açıdan, üçüncü ve on ikinci düşümlere ait ivme-zaman, hız zaman grafikleri ve on ikinci düşüme ait deplasman zaman grafiğine bakmakta fayda vardır.



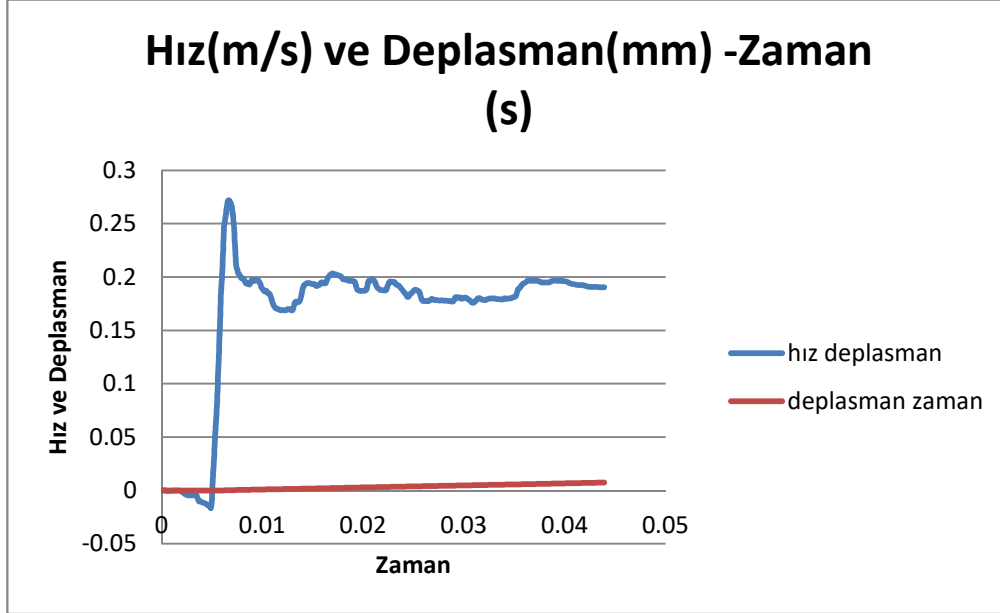
Şekil 9.6. A1-1 numunesine ait 3 ve 12. düşümlerin ivme-zaman grafiği

Şekil 9.6'da 3 ve 12 düşümüne ait ivme-zaman grafiği görülmektedir. Bu grafikler programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir. Uygulanan çarpmalarda 3. düşüme ait maksimum ivme 342,44 (g) ile minimum 441,78 (g) olarak gerçekleşmiş, numune 12. düşümde görece daha büyük ivmeyle maksimum 465,27 (g) ve minimum 255,05 (g) meydana gelmiş ve kırılmıştır.



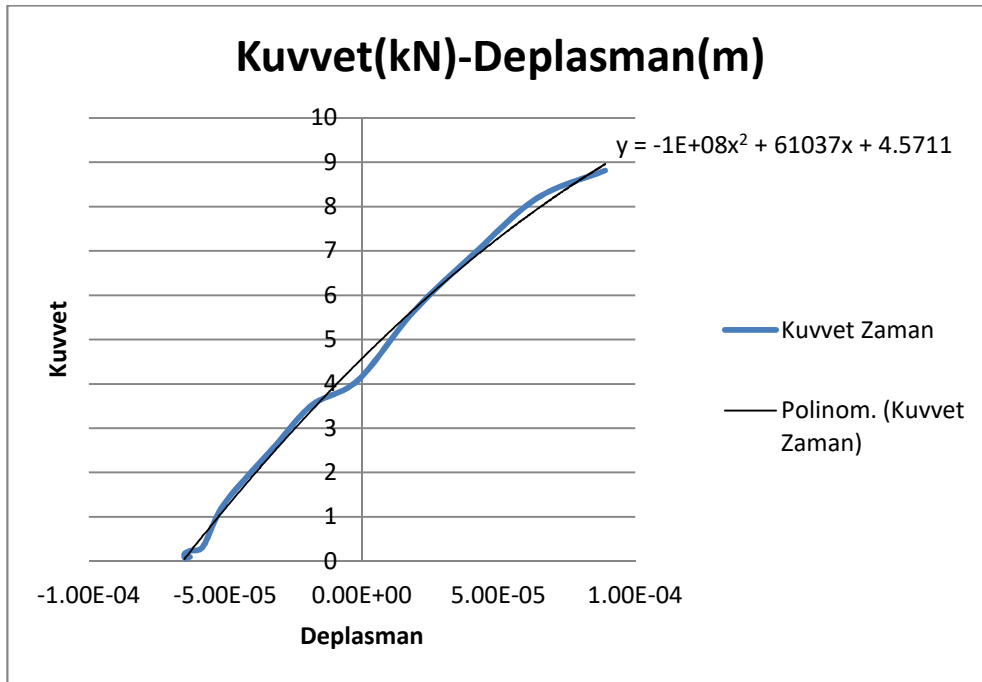
Şekil 9.7. A1-1 numunesine ait 3 ve 12. düşümlerin hız-zaman grafiği

Bütün düşümlerde, hız zaman grafiğinin maksimum değeri çarpma anında 0,25-0,30 m/s arasında gerçekleşmiştir.



Şekil 9.8. A1-1 numunesine ait 12. düşümün hız-zaman ve deplasman zaman grafiği

12. düşümde temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,32$ mm gerçekleştiği görülür.



Şekil 9.9. A1-1 numunesinde sekizinci düşüme ait kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 9.9'da görüldüğü gibi her numunede her düşüme ait kuvvet-deplasman grafiği çizdirilerek elde edilen eğrinin ikinci dereceden denklemi, ilk eğriye en yakın ve en uygun eğri olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu eğrinin altında kalan alan belirli integral alınarak her düşüme ait numunenin absorbe ettiği enerji bulunmuştur. Buradan da toplam enerji hesaplanarak numunelerin tokluğu hesaplanmıştır.

$$\int y \cdot dx = \int_{-6,5 \times 10^{-5}}^{0,00021} (-10^8 x^2 + 61037x + 4,5711) \cdot dx \quad (9.1)$$

$$-10^8 \frac{x^3}{3} + 61037 \frac{x^2}{2} + 4,5711x \quad (9.2)$$

Eş.9.2'deki denklemde belirli integralin sınır şartları yerine yazıldığında örnek sekizinci düşüm için hesaplanan enerji 21,54 joule olmaktadır. Böylelikle, tüm düşümler ve tüm numuneler için hesaplanan enerjiler ve toplam enerjiler bu çözümde olduğu gibi hesaplanmıştır.

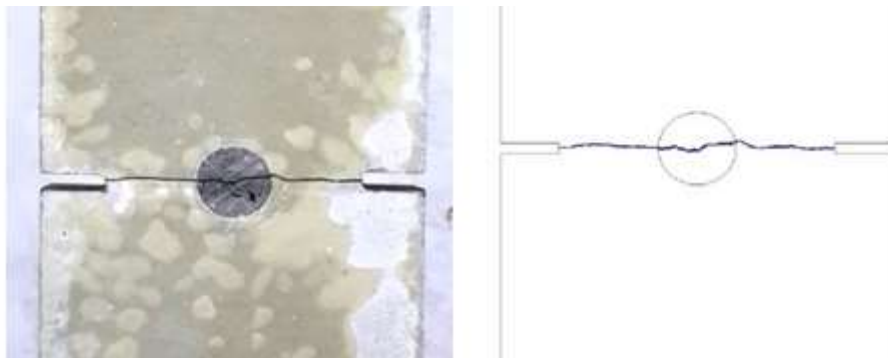
A1-1 numunesi için hesaplanan enerjiler,

$$\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + E_8 + E_9 + E_{10} + E_{11} + E_{12} \quad (9.3)$$

$$\Sigma E = 18,2 + 37,6 + 25,6 + 63 + 49 + 24,75 + 27,51 + 34,37 + 21,54 + 32,51 + 19,70 + 12 + 23,16 \quad (9.4)$$

$$\Sigma E = 388,94 \text{ joule} \quad (9.5)$$

Eş.9.5'te görüldüğü gibi A1-1 numunesinin toplam kırılma tokluğu 388,94 joule'dür.

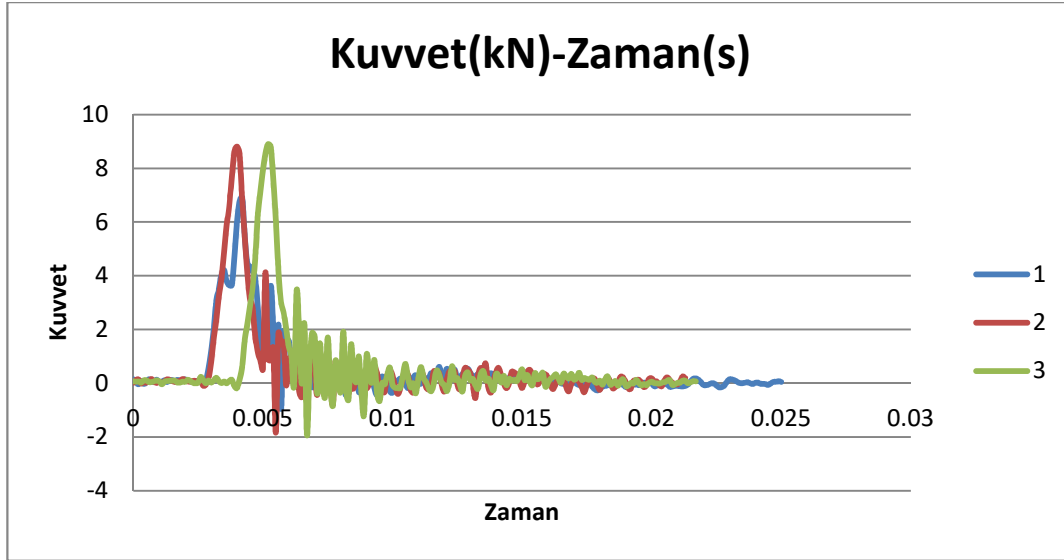


Resim 9.1. A1-1 numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.1'de görüldüğü gibi 12. düşüm sonunda A1-1 numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın içerisinde ilerleyerek çentik köklerinden gerçekleşecek biçimde kırılmaya yol açmıştır.

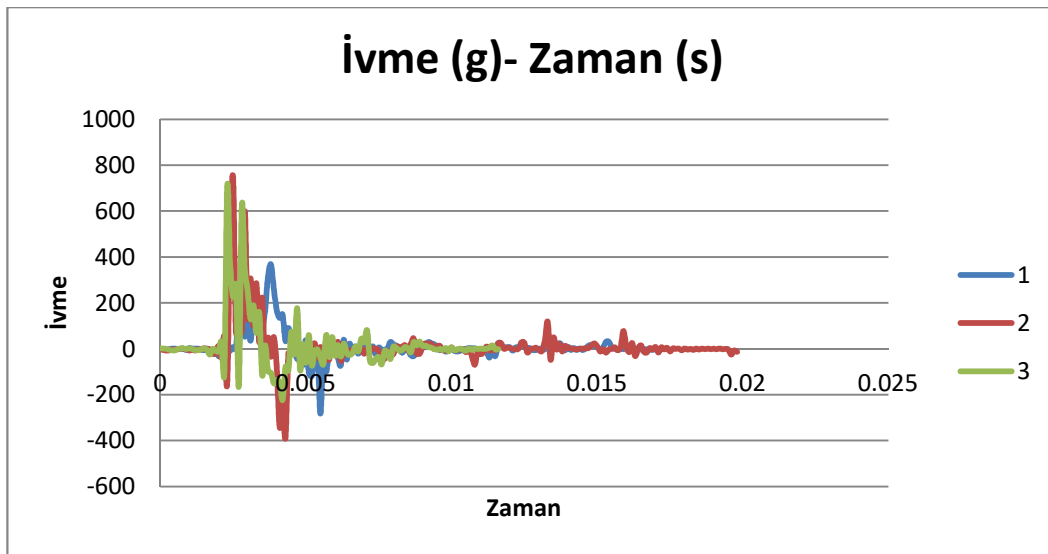
K1-1 numunesi

Bütün numunelerde olduğu gibi K1-1 numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. Bu çarpma deneyleri, numunede göçme yaratana kadar devam ettirilmiştir. K1-1 numunesi 3. düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 9.10. K1-1 numunesine ait 3 düşümün kuvvet-zaman grafiği

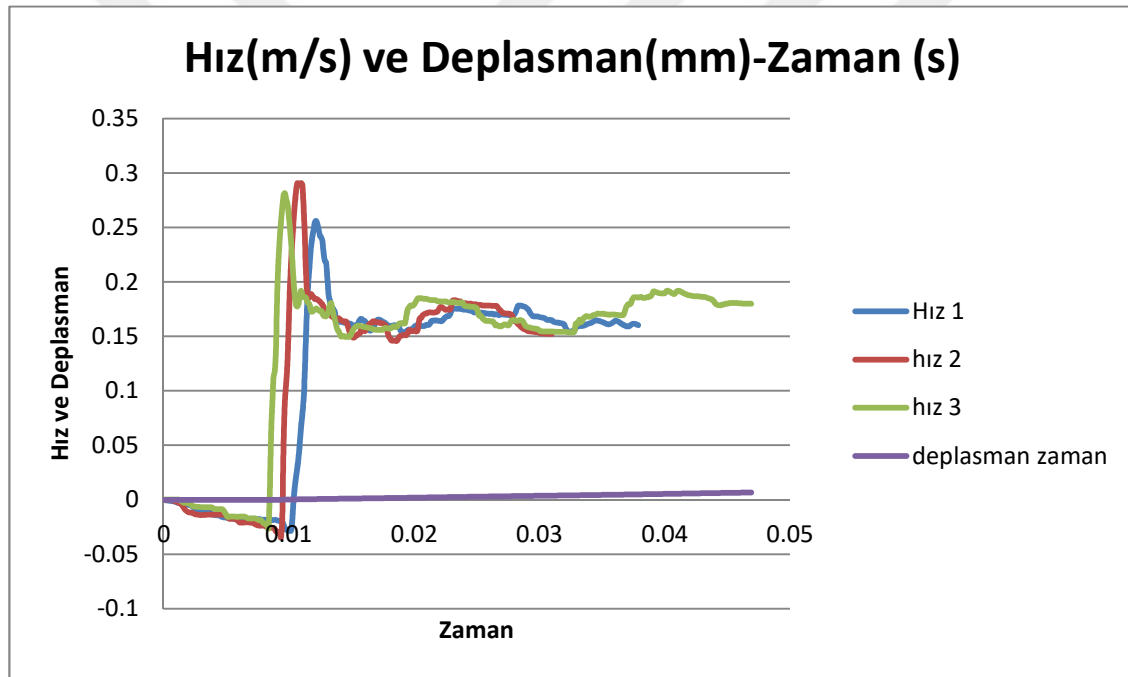
Uygulanan maksimum kuvvetler, ilk düşümde 6,90 kN, ikinci düşümde 8,81 kN, üçüncü düşümde 8,90 kN ile gerçekleşmiş ve üçüncü düşümde numune kırılmıştır.



Şekil 9.11. K1-1 numunesine ait 3 düşümün ivme-zaman grafiği

Şekil 9.11’de üç düşümü de ait ivme zaman grafiği sırasıyla gösterilmiştir. Minimum ivmelerin pik değerleri birinci düşümde 367,89 (g) ve -282,56 (g) olarak gerçekleşmiştir, maksimum ivmelerin pik değerleri ise ikinci düşüme ait olup 746,08 (g) ve -387,60 (g) olarak ölçülmüştür. Ancak, numune üçüncü düşümde kırıldığında bu değerler 708,50 (g) ve -223,46 (g) olarak grafikten okunur. Düşük sayıda düşümde kırıldığından, hız zaman ve üçüncü düşüme ait deplasman zaman grafiği Şekil 9.12’deki gibidir. Görüldüğü gibi kırılma anına ve düşümlere ait veriler uyumluluk içerisinde. Üç düşümde de çarpma temas hızları 0,25-0,30 m/s arasında gerçekleşmiştir.

3. düşümde, temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,28$ mm gerçekleştiği görülür.



Şekil 9.12. K1-1 numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

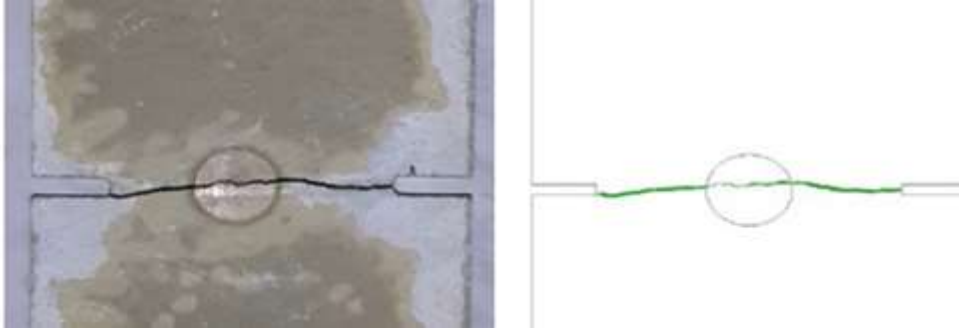
K1-1 numunesi için hesaplanan enerjiler,

$$\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (9.6)$$

$$\Sigma E = 23,02 + 50,1 + 88,13 \quad (9.7)$$

$$\Sigma E = 161,25 \text{ joule} \quad (9.8)$$

Eş. 9.8’de görüldüğü gibi K1-1 numunesinin toplam kırılma tokluğu 161,25 joule’dür.

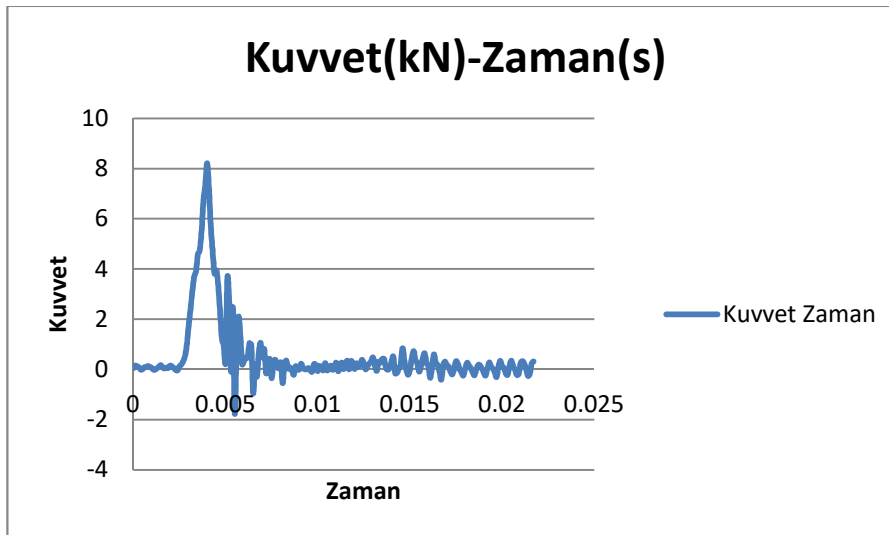


Resim 9.2. K1-1 numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.2’de görüldüğü gibi 3. düşüm sonunda K1-1 numunesinde çatlak yörüngesi beton ve kireç taşı agreganın ortasından ilerleyerek çentik köklerinden gerçekleşecek biçimde kırılmaya yol açmıştır. Bunun nedeni, çatlağın minimum enerji harcanacak yolu seçerek betonun içindeki kireç taşı üzerinden kırılmasıdır.

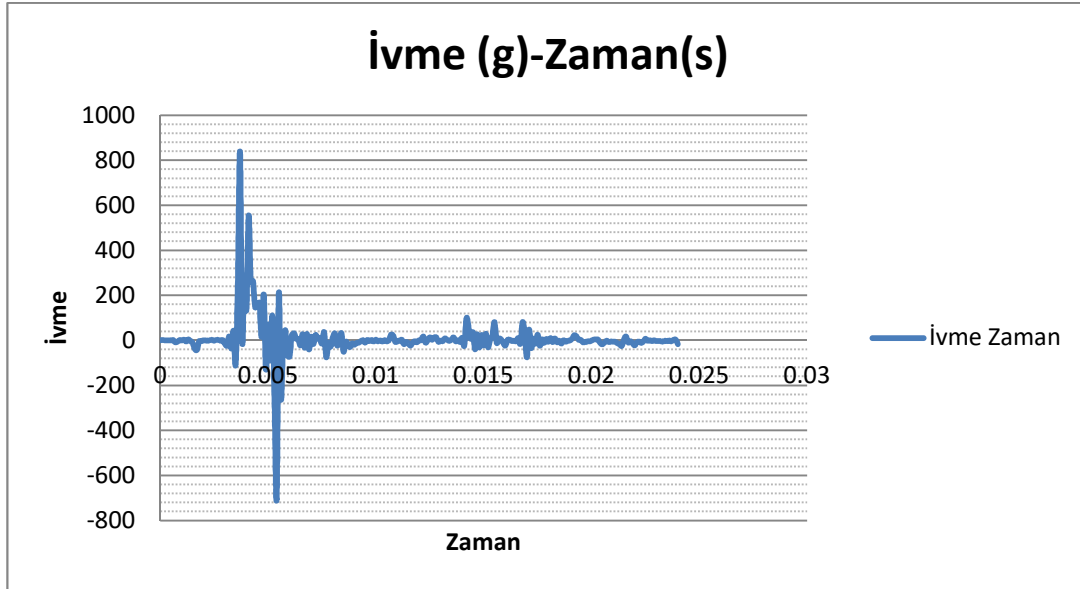
B1-1 numunesi

B1-1 numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. B1-1 numunesi ilk düşümde kırılmıştır.



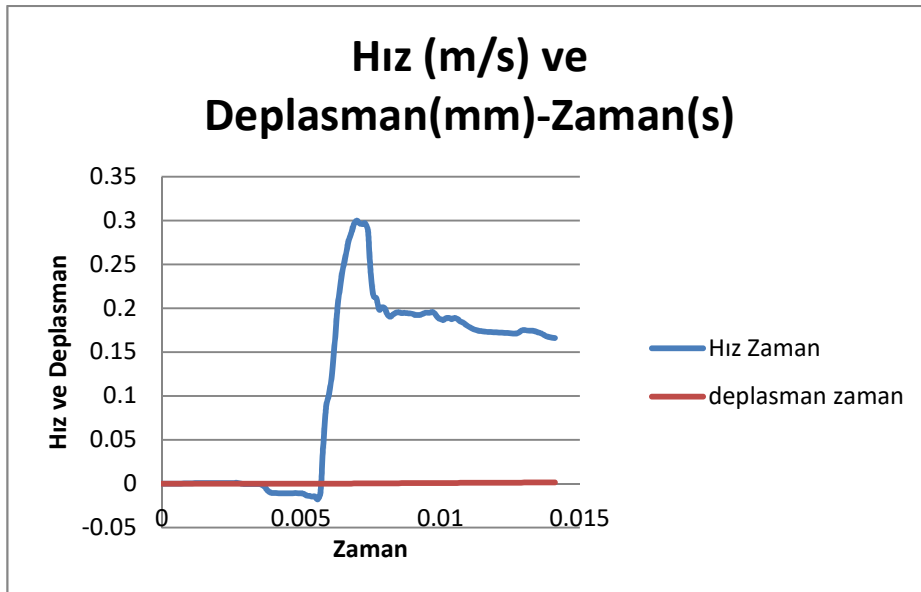
Şekil 9.13. B1-1 numunesine ait tek düşümün kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan maksimum kuvvet, ilk düşümde 8,21 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



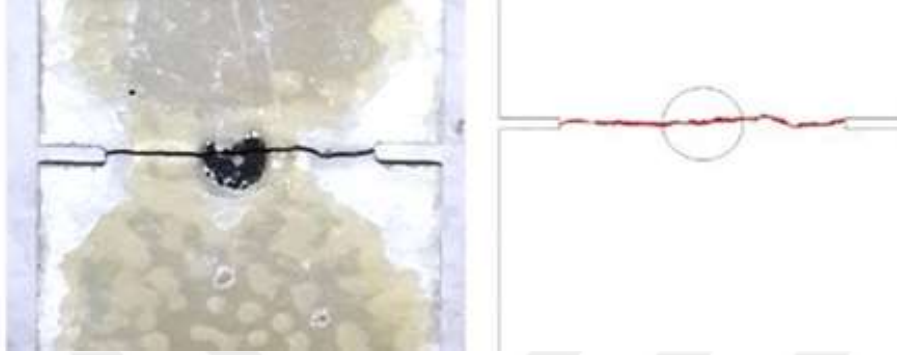
Şekil 9.14. B1-1 numunesine ait tek düşümün ivme-zaman grafiği

Şekil 9.14'te tek düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 835,79 (g) ve -701,33 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Düşük sayıda düşümde numune kırıldığından, hız zaman ve deplasman zaman grafiği Şekil 9.15'teki gibidir. Burada, numunenin tek seferde kırılmasının nedeninin sadece uygulanan kuvvete değil şahmerdanın ivme aralığına da bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Çarpma temas hızı 0,30 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.15. B1-1 numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,31$ mm gerçekleştiği görülür. B1-1 numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=194,69$ joule olarak hesaplanmıştır.

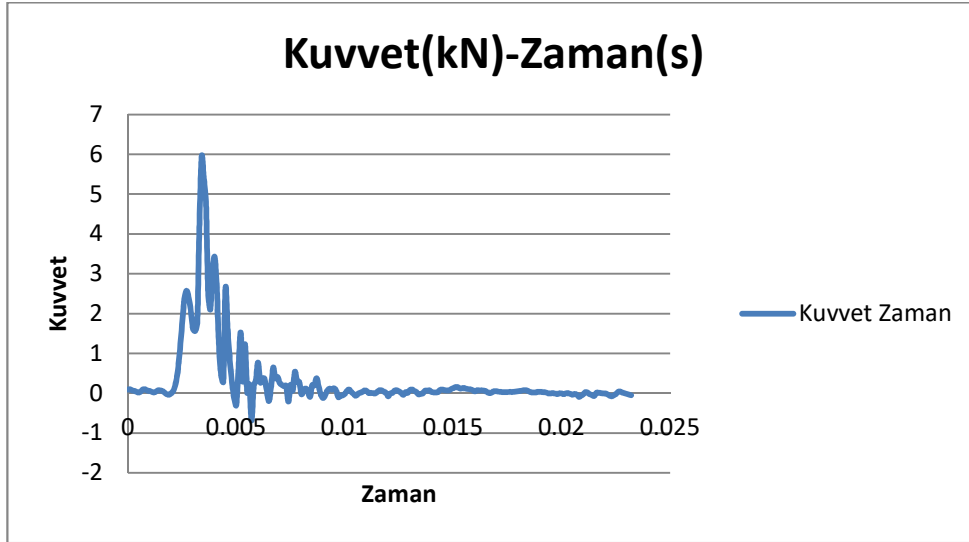


Resim 9.3. B1-1 numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.3'te görüldüğü gibi tek düşümde B1-1 numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın ortasından ilerleyerek çentik köklerinden gerçekleşecek biçimde kırılmaya yol açmıştır. Bunun nedeni, çarpma etkisi altında yüksek ivme ve hız altında çok ani şok etkisiyle çatlağın boyutları oranı 1 olan numunenin ortasından minimum enerji harcanacak yolu seçerek betonun içindeki bazalt taşı üzerinden kırılmasıdır.

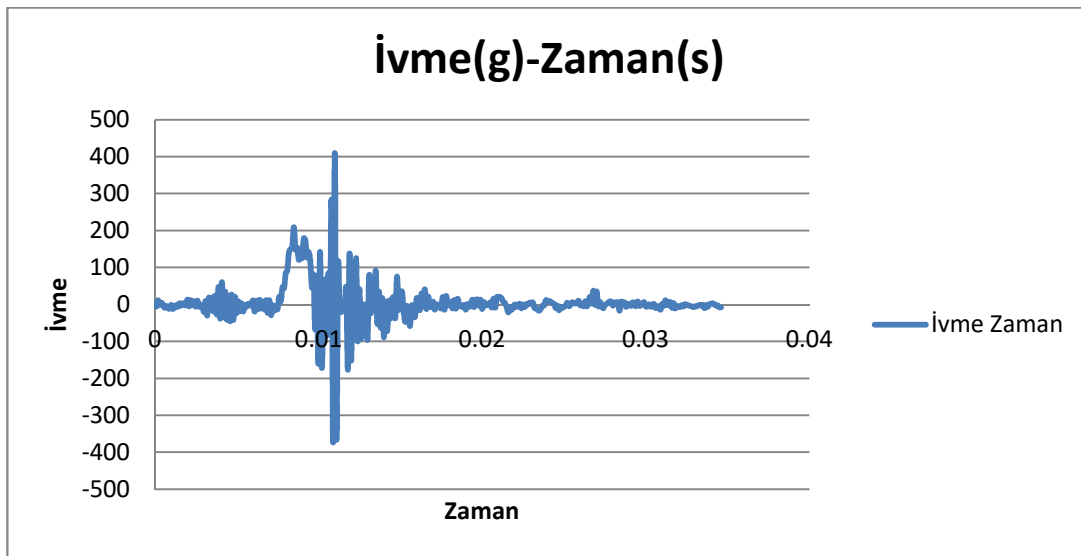
A1-1,5a numunesi

A1-1,5a numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. A1-1,5a numunesi ilk düşümde kırılmıştır.



Şekil 9.16. A1-1,5a numunesine ait kuvvet-zaman grafiği

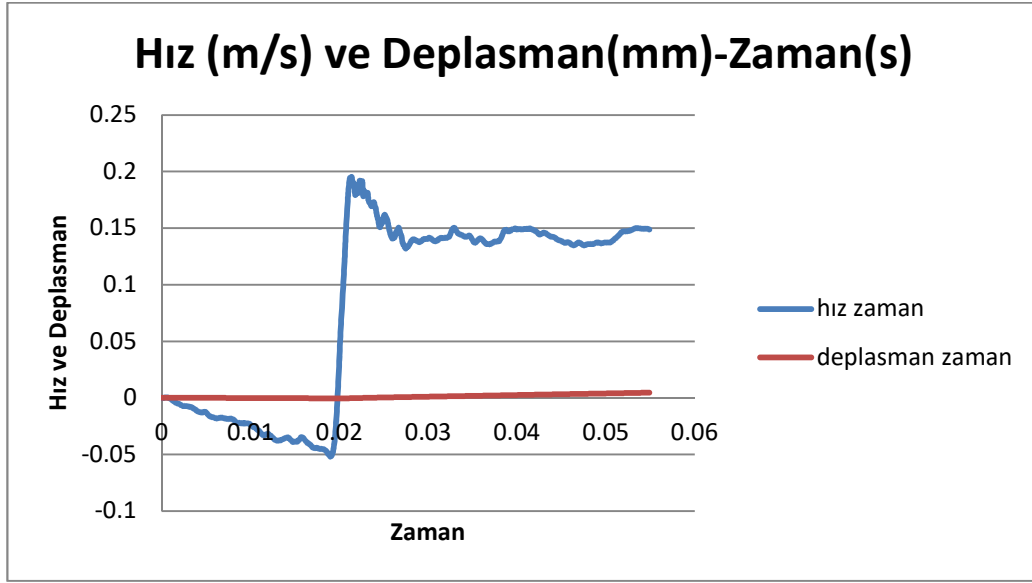
Uygulanan maksimum kuvvet, ilk düşümde 5,94 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



Şekil 9.17. A1-1,5a numunesine ait ivme-zaman grafiği

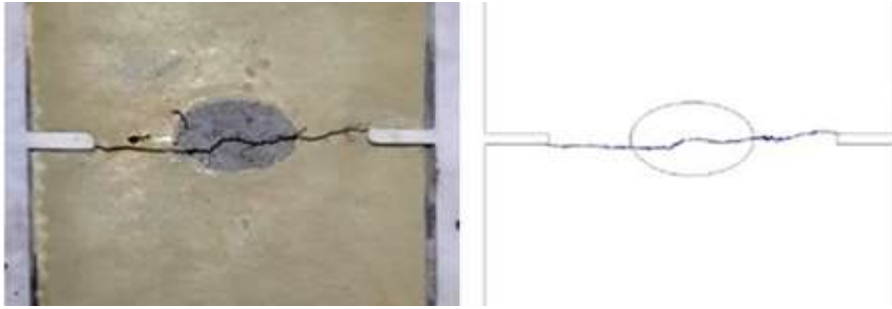
Şekil 9.17’de tek düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri 409,35 (g) ve -372,79 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Düşük sayıda düşümde numune kırıldığından, hız zaman ve deplasman zaman grafiği Şekil 9.18’deki gibidir.

Burada, numunenin tek seferde kırılmasının nedeninin sadece uygulanan kuvvete değil şahmerdanın ivme aralığına da bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Çarpma temas hızı 0,2 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.18. A1-1,5a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,14$ mm olarak gerçekleştiği görülür. A1-1,5a numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=247,1$ joule olarak hesaplanmıştır.

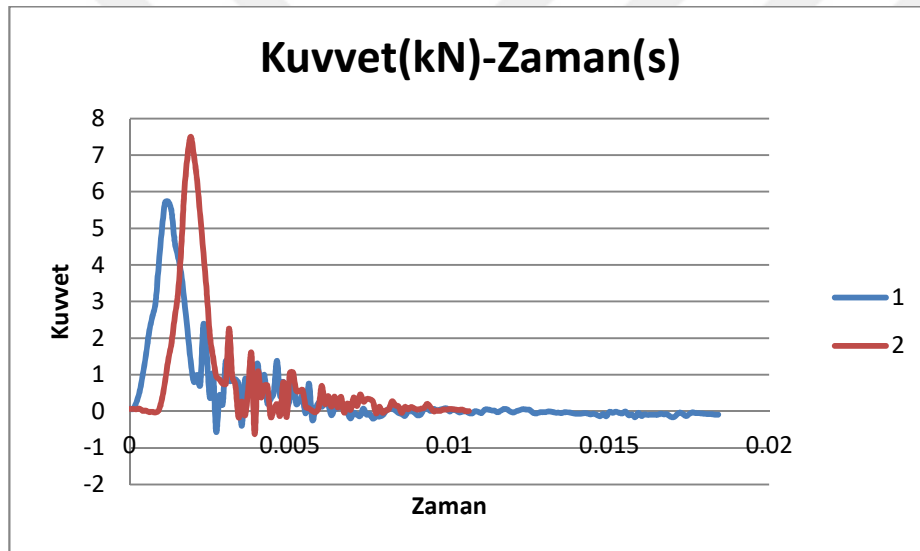


Resim 9.4. A1-1,5a numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.4'te görüldüğü gibi tek düşümde A1-1,5a numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın ortasından ilerleyerek çentik köklerinden gerçekleşecek biçimde kırılmaya yol açmıştır. Bunun nedeni, çarpma etkisi altında çatlakların minimum enerji harcanacak yolu seçerek betonun içindeki andezit taşı üzerinden kırılmasıdır.

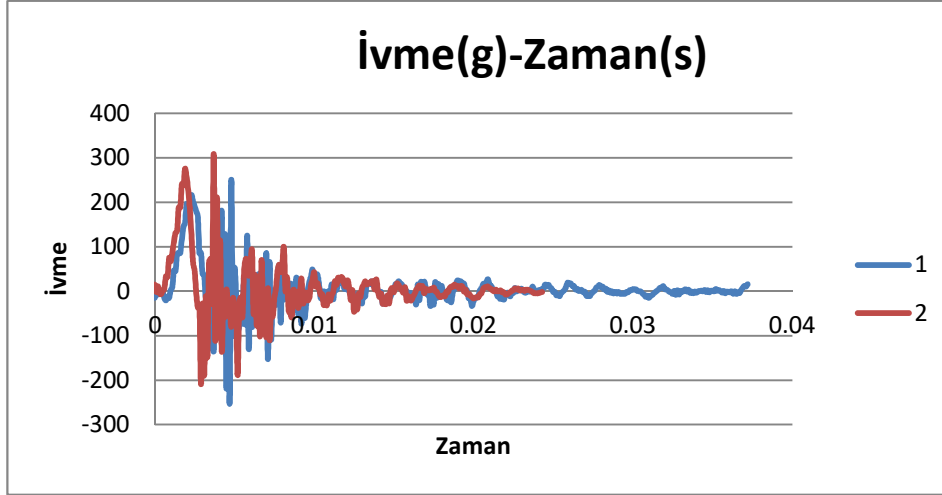
K1-1,5a numunesi

K1-1,5a numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-1,5a numunesi ikinci düşümde kırılrsa da düşüm sayısı açısından andezit barındıran numuneye göre belirgin bir farklılık taşımamaktadır.



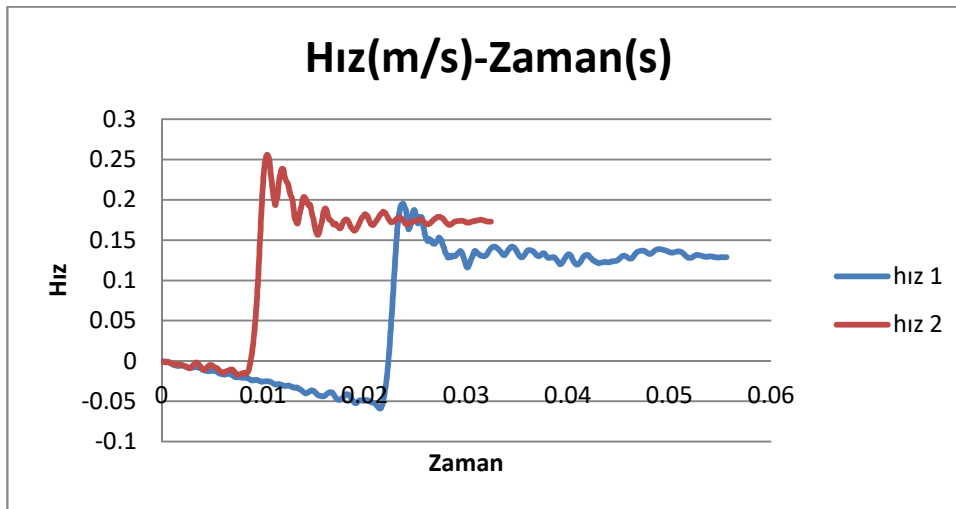
Şekil 9.19. K1-1,5a numunesine ait iki düşümün kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan maksimum kuvvetler, ilk düşümde 5,72 kN olarak ölçülmüş ve ikinci düşümde K1-1,5 numunesi 7,50 kN kuvvet olarak kırılmıştır. Bu değerlere göre, A1-1,5a numunesinin kırılmasına neden olan kuvvet ortalama olarak K1-1,5a numunesinin aldığı kuvvetler arasında kalmıştır ve farklılık olduğundan söz edilemez. Bu grafikler programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.

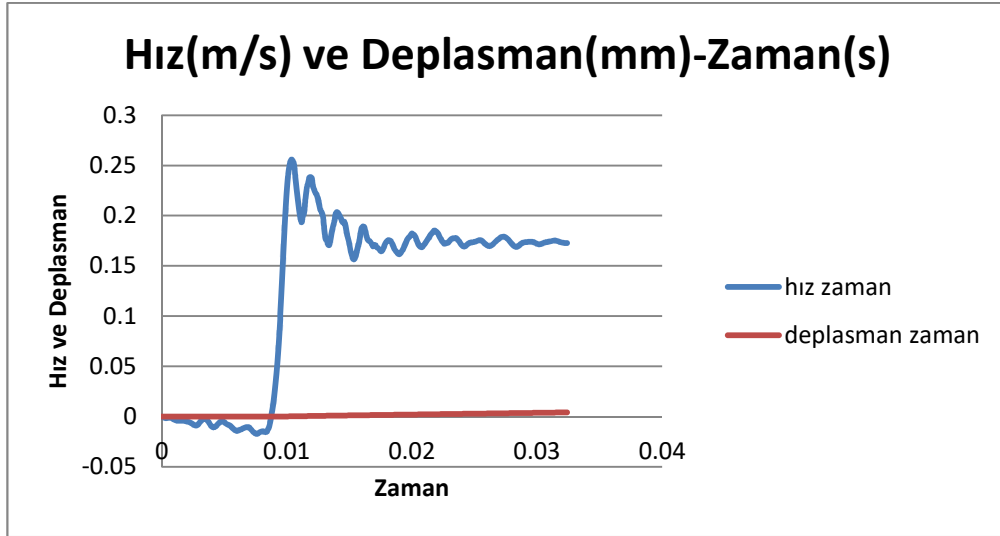


Şekil 9.20. K1-1,5a numunesine ait iki düşümün ivme-zaman grafiği

Şekil 9.20'de iki kez yapılan düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşüm için 249,20 (g) ve -252,81 (g) olarak ölçülmüştür, ikinci düşüm için ise pik ivmeler 308,13 (g) ve 209,23 (g) olarak grafiklerden okunur ve ikinci düşümde numune kırılmıştır. Düşük sayıda düşümde numune kırıldığından, hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.21 ve Şekil 9.22'deki gibidir. Burada, numunenin iki düşümde kırılması beklendiği gibi kireç taşının betonun içinde düşük mukavemette bir yapı teşkil etmekte olmasından kaynaklanmakta, ayrıca; sadece uygulanan kuvvete değil şahmerdanın ivme aralığına da bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Çarpma temas hızları ilk düşümde 0,2 m/s, ikinci düşümde 0,26 m/s olarak gerçekleşmiştir.

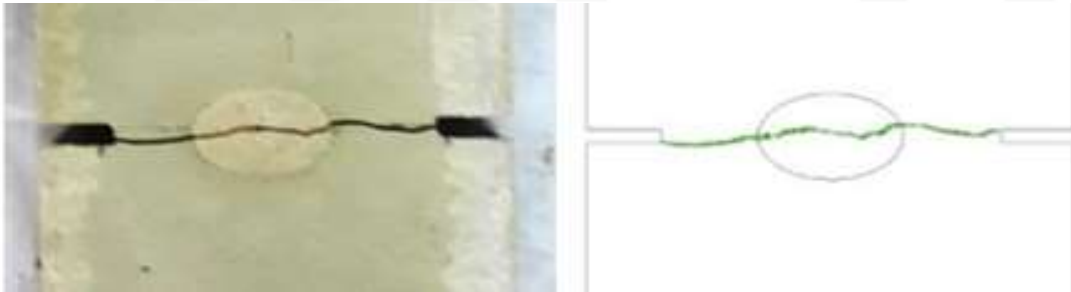


Şekil 9.21. K1-1,5a numunesine ait hız-zaman grafikleri



Şekil 9.22. K1-1,5a numunesinin 2. düşümünün hız ve deplasman-zaman grafikleri

İkinci düşümde kırılan numunede, temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,24$ mm olarak gerçekleştiği görülür. K1-1,5a numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=60,74+268,3=329,04$ joule olarak hesaplanmıştır.

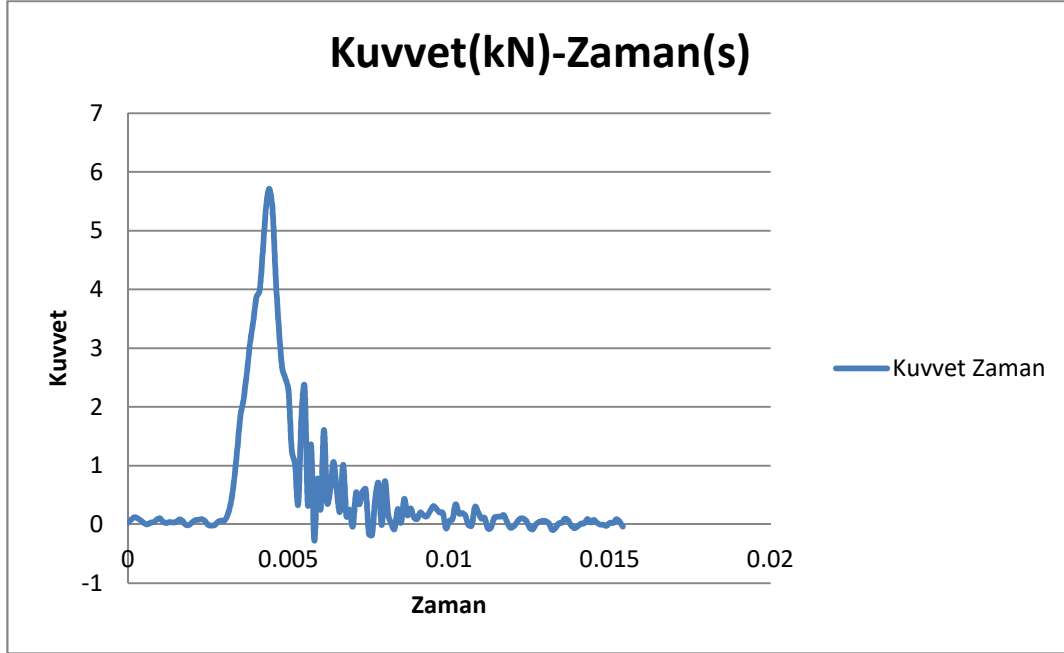


Resim 9.5. K1-1,5a numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.5'te görüldüğü gibi ikinci düşümde K1-1,5a numunesinde çatlak yörüngesi beton ve kireç taşı agreganın ortasından ilerleyerek ilk çentik kökünün altından son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek eğilme tipi kırılmaya yol açmıştır. Bunun nedeni, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha düşük dayanıma sahip kireç taşının içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

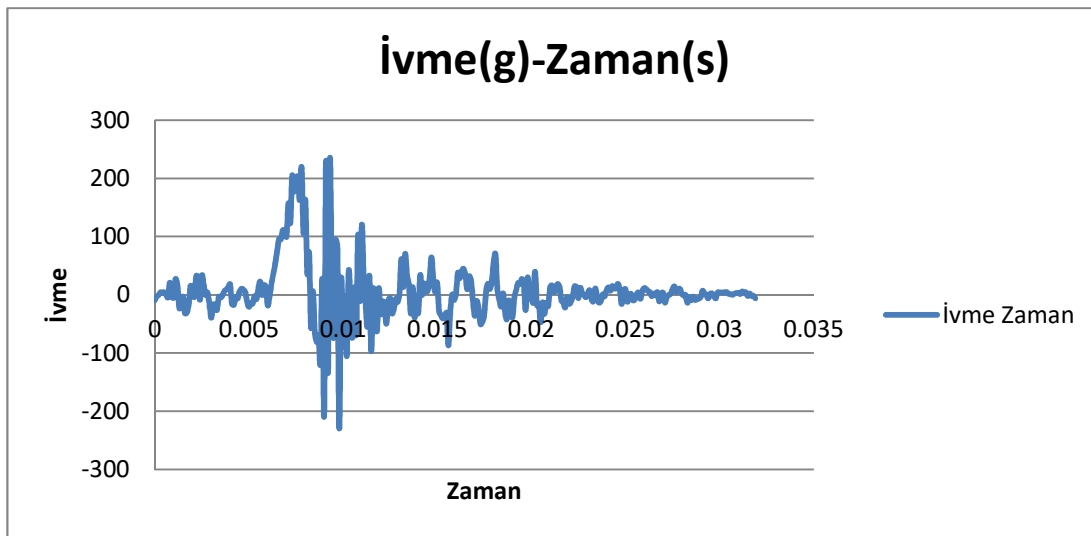
B1-1,5a numunesi

B1-1,5a numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. B1-1,5a numunesi ilk düşümde kırılmıştır.



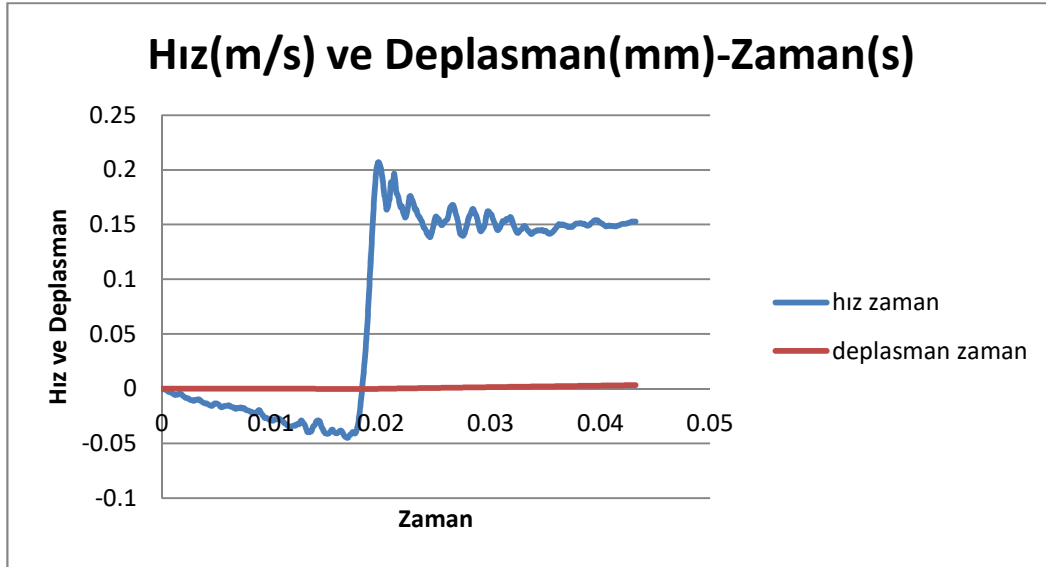
Şekil 9.23. B1-1,5a numunesine ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan maksimum kuvvet, ilk düşümde 5,71 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



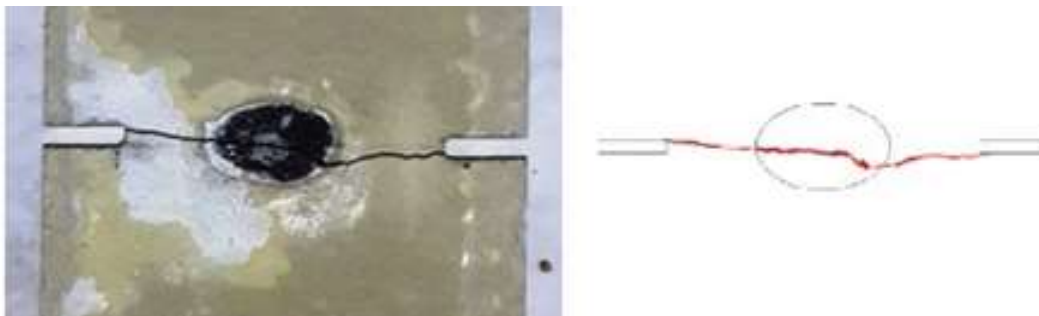
Şekil 9.24. B1-1,5a numunesine ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.24'te tek düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri 232,14 (g) ve -229,51 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Düşük sayıda düşümde numune kırıldığından, hız zaman ve deplasman zaman grafiği Şekil 9.25'teki gibidir. Çarpma temas hızı 0,21 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.25. B1-1,5a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,20$ mm olarak gerçekleştiği görülür. B1-1,5a numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=294,9$ joule olarak hesaplanmıştır.



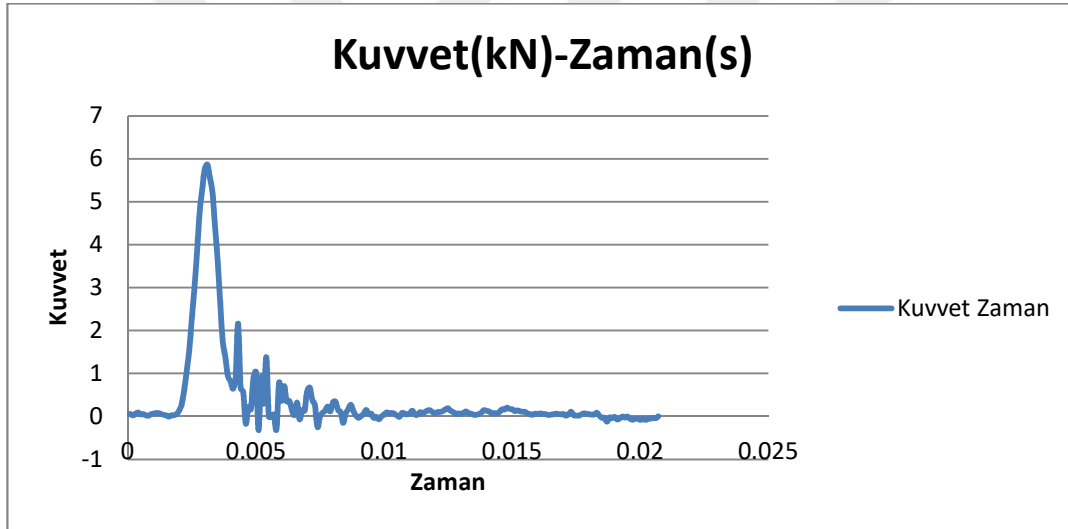
Resim 9.6. B1-1,5a numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.6'da görüldüğü gibi ilk düşümde B1-1,5a numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın ortasından ilerleyerek ilk çentik kökünün üst, son çentik kökünün alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek eğilme tipi kırılmaya yol açmıştır. 0°'lik açılarda, (a) koduna sahip beton numunelerde çarpma etkisi altında, çatlak yörüngelerinin

birbirinden farklı yörüngeler izlemediği görülmüştür. Bazalt bulunan numunede de bu tip bir kırılma olması hem açının hem de beton dayanımının önem taşıdığını göstermektedir. D4 kodlu dökümün ortalama basınç dayanımı bazalt basınç dayanımından görece, standart sapma değerinden daha küçük olmak üzere, daha yüksek bulunmuştur. Dolayısıyla, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha düşük dayanıma sahip bazalt taşının içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

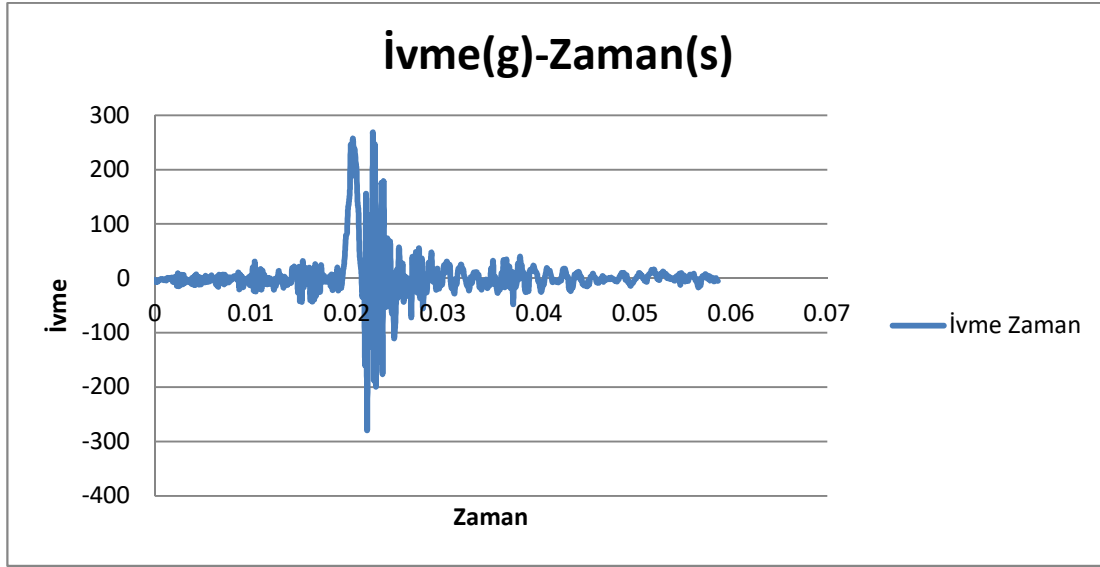
A1-1,5b numunesi

A1-1,5b numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. A1-1,5b numunesi ilk düşümde kırılmıştır.



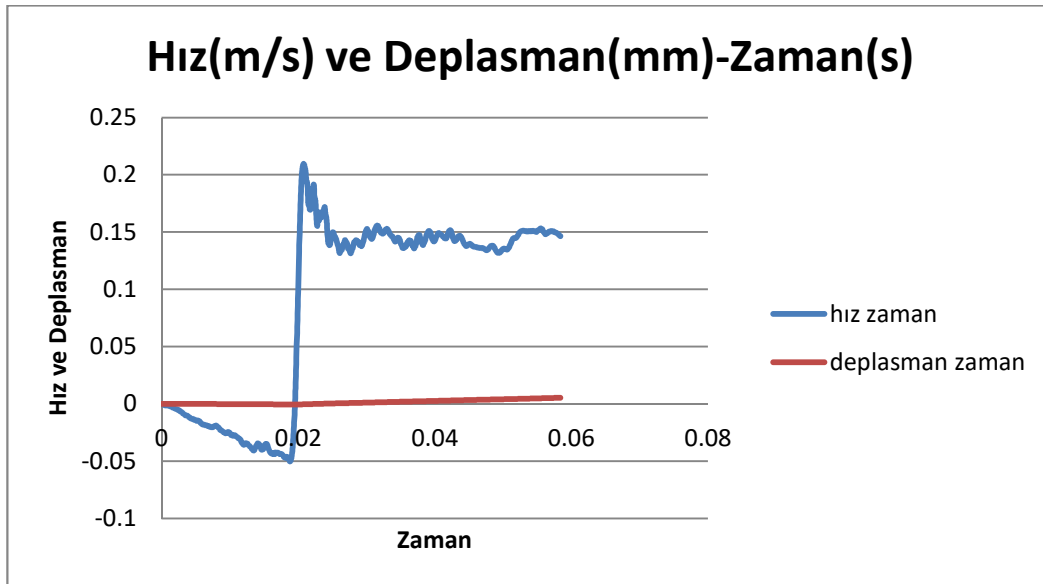
Şekil 9.26. A1-1,5b numunesine ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan maksimum kuvvet, ilk düşümde 5,86 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



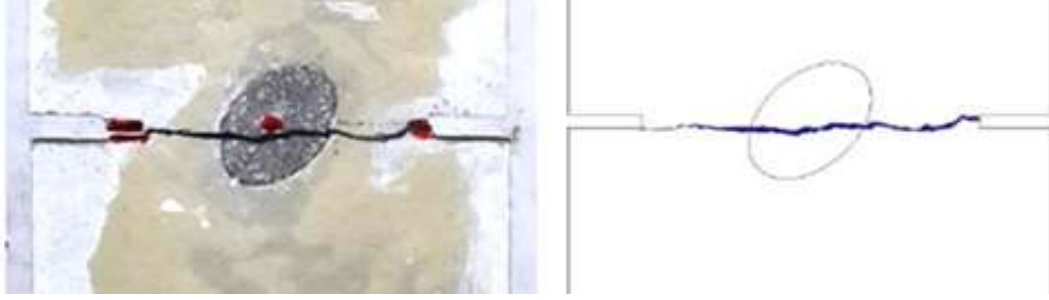
Şekil 9.27. A1-1,5b numunesine ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.27’de tek düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri 267,60 (g) ve -278,12 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Düşük sayıda düşümde numune kırıldığından, hız zaman ve deplasman zaman grafiği Şekil 9.28’deki gibidir. Çarpma temas hızı 0,21 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.28. A1-1,5b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,26$ mm olarak gerçekleştiği görülür. A1-1,5b numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=171,8$ joule olarak hesaplanmıştır.

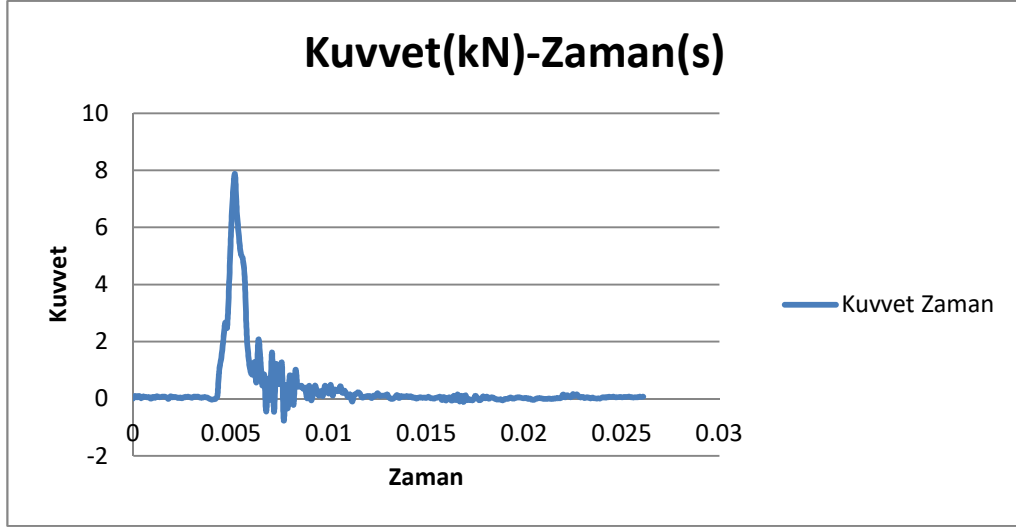


Resim 9.7. A1-1,5b numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.7’de görüldüğü gibi ilk düşümde A1-1,5b numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın ortasından ilerleyerek ilk çentik kökünün altından ve son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek eğilme tipi kırılmaya yol açmıştır. A1-1,5a numunesinin taşıdığı verilerle ortak özellik taşıyan bu kırılmaya bakıldığında 45°’lik açının andezit numunede bir farklılık yaratmadığı gözlenmiştir. Ayrıca, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha düşük dayanıma sahip andezitin içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

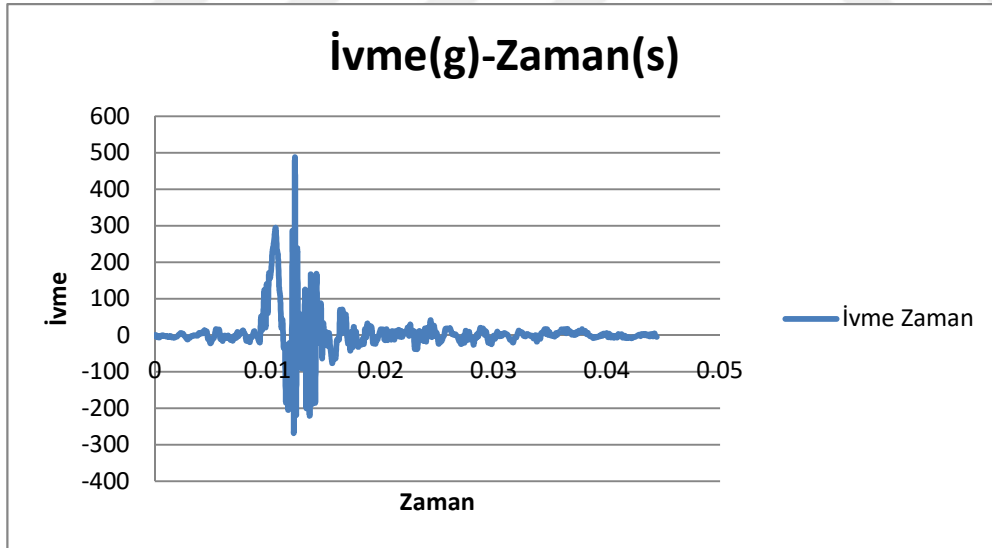
K1-1,5b numunesi

K1-1,5b numunesine de diğer tüm çarpma deneylerinde olduğu gibi; 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-1,5b numunesi tek düşümde kırılmış olup düşüm sayısı açısından A1-1,5b kodlu andezit barındıran numuneye ve K1-1,5a kodlu numuneye göre belirgin bir farklılık göstermemiştir. Numunede uygulanan deneylerle ilgili verilere göz atıldığında da aynı sonuca varılacaktır.



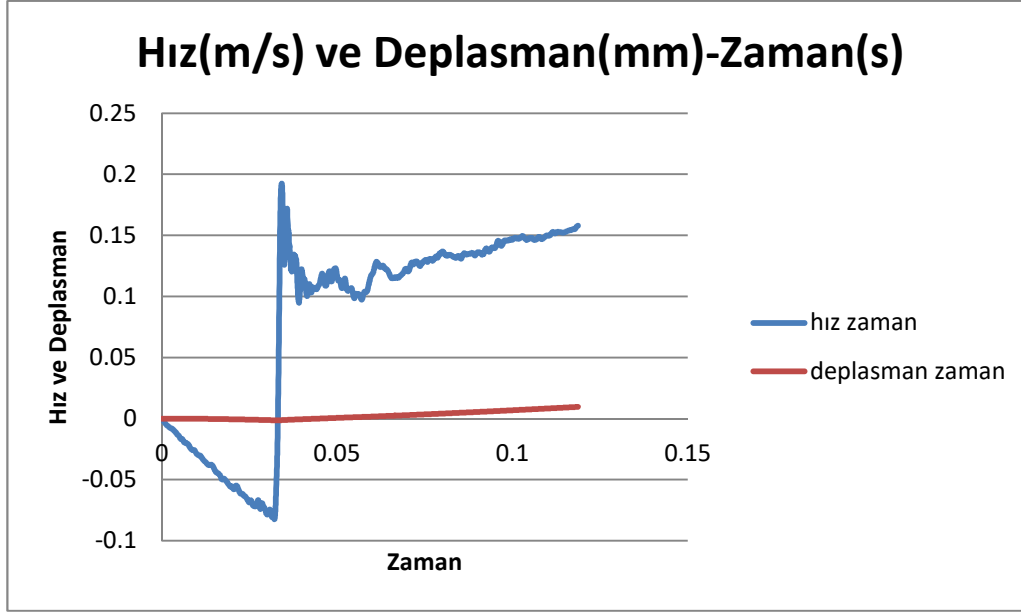
Şekil 9.29. K1-1,5b numunesine ait tek düşümün kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan maksimum kuvvetler, tek düşümde 7,86 kN olarak ölçülmüş, K1-1,5a numunesinde ise 7,50 kN kuvvet kırılmıştır. Ayrıca bu değerlere göre, K1-1,5a ve K1-1,5b numunelerinin kırılmasına neden olan kuvvetler birbirine yakındır ve aralarında çok farklılık olduğundan söz edilemez.



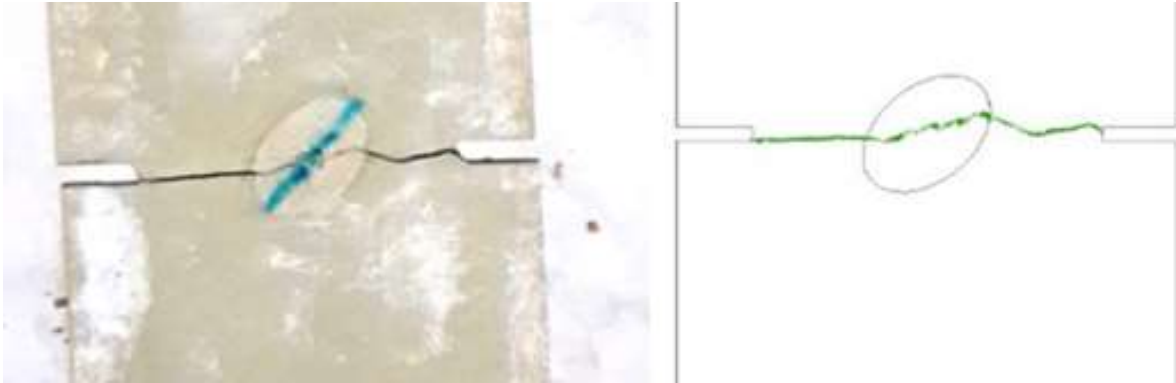
Şekil 9.30. K1-1,5b numunesine ait tek düşümün ivme-zaman grafiği

Şekil 9.30'da tek düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri 487,53 (g) ve -267,06 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Düşük sayıda düşümde numune kırıldığından, hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.31'deki gibidir. Çarpma temas hızı 0,19 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.31. K1-1,5b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

Tek düşümde kırılan numunede, temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,24$ mm olarak gerçekleştiği görülür. K1-1,5b numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=230$ joule olarak hesaplanmıştır.



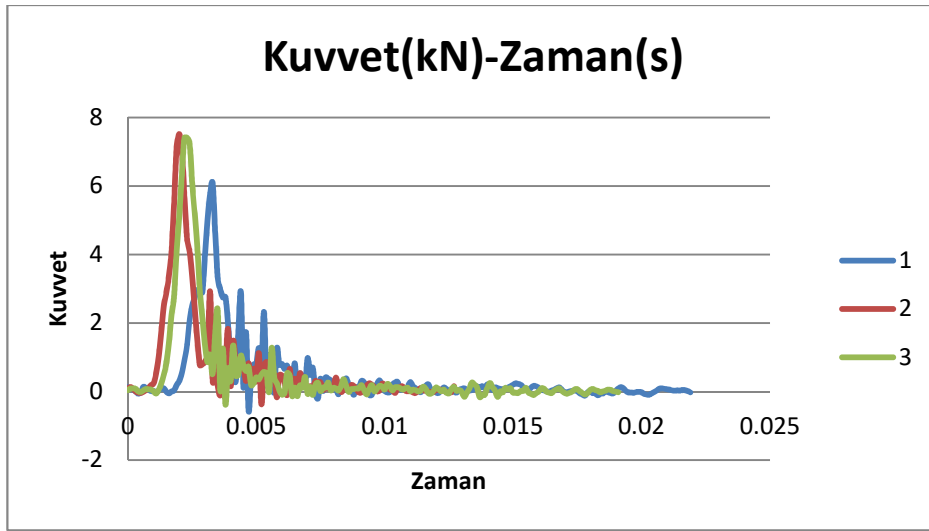
Resim 9.8. K1-1,5b numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.8’de görüldüğü gibi ilk düşümde K1-1,5b numunesinde çatlak yörüngesi beton ve kireç taşı agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün altından ve son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek eğilme tipi kırılmaya yol açmıştır. Ancak, kireç taşının içerisine ulaştığında çatlaklar 45° ’lik açıyla yerleştirilmiş kireç taşıyla aynı doğrultuya yakın güzergâhla hissedilir biçimde ilerlemiş tekrar beton malzemeye geçtiğinde yeniden çentik köküne doğru yol izleyecek biçimde açı yaparak kırılmaya neden olmuştur. Ayrıca, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha

düşük dayanıma sahip kireç taşının içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

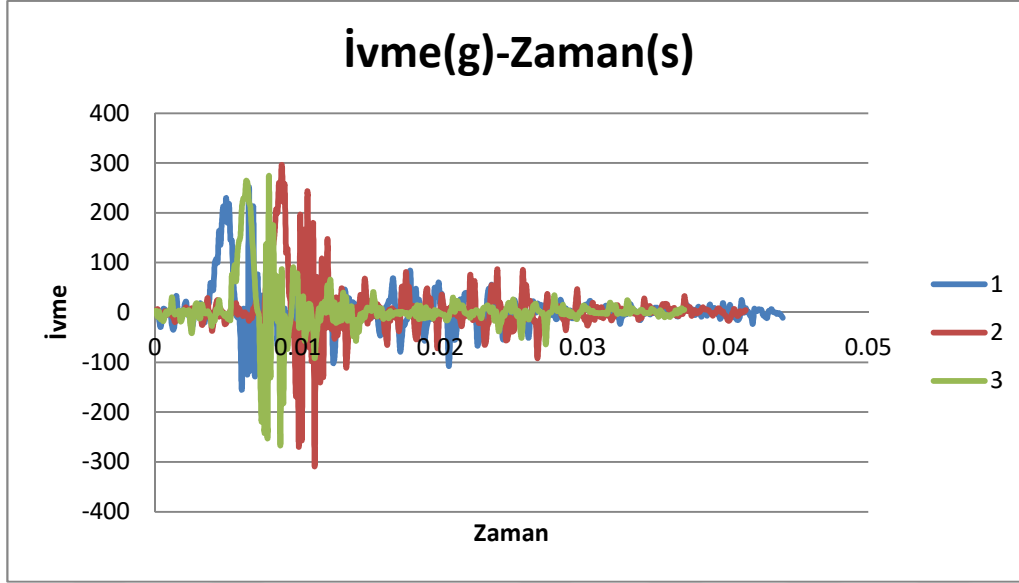
B1-1,5b numunesi

Bütün numunelerde olduğu gibi B1-1,5b numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. Bu çarpma deneyleri, numunede göçme yaratana kadar devam ettirilmiştir. B1-1,5b numunesi 3. düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 9.32. B1-1,5b numunesine ait 3 düşümün kuvvet-zaman grafiği

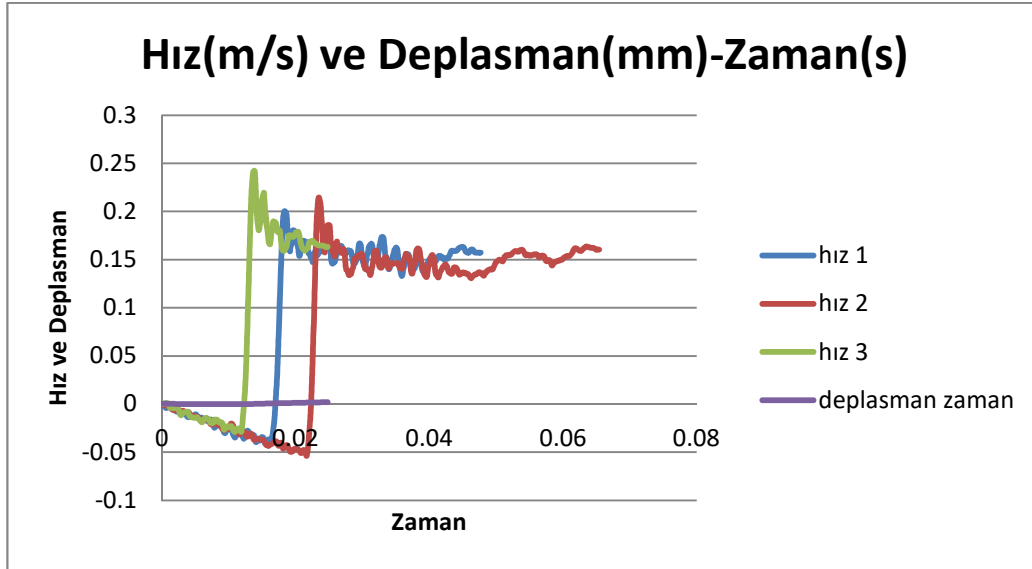
Uygulanan maksimum kuvvetler, ilk düşümde 6,08 kN, ikinci düşümde 7,51 kN, üçüncü düşümde 7,41 kN ile gerçekleşmiş ve üçüncü düşümde numune kırılmıştır.



Şekil 9.33. B1-1,5b numunesine ait 3 düşümün ivme-zaman grafiği

Şekil 9.33'te üç düşüme de ait ivme zaman grafiği sırasıyla gösterilmiştir. Minimum ivmelerin pik değerleri birinci düşümde 251,71 (g) ve -154,74 (g) olarak gerçekleşmiştir, maksimum ivmelerin pik değerleri ise ikinci düşüme ait olup 296,16 (g) ve -308,09 (g) olarak ölçülmüştür. Ancak, numune üçüncü düşümde kırıldığından bu değerler arasındaki ivmelerde kalarak 273,88 (g) ve -267,15 (g) olarak ölçüm alınmıştır. Düşük sayıda düşümde kırıldığından, hız-zaman ve üçüncü düşüme ait deplasman-zaman grafiği Şekil 9.34'teki gibidir. Görüldüğü gibi kırılma anına ve düşümlere ait veriler uyumluluk içerisinde. Üç düşümde de çarpma temas hızları 0,20-0,25 m/s arasında gerçekleşmiştir.

3. düşümde, 0,24 m/s temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,30$ mm gerçekleştiği görülür.



Şekil 9.34. B1-1,5b numunesinin düşümlerine ait hız ve deplasman-zaman grafikleri

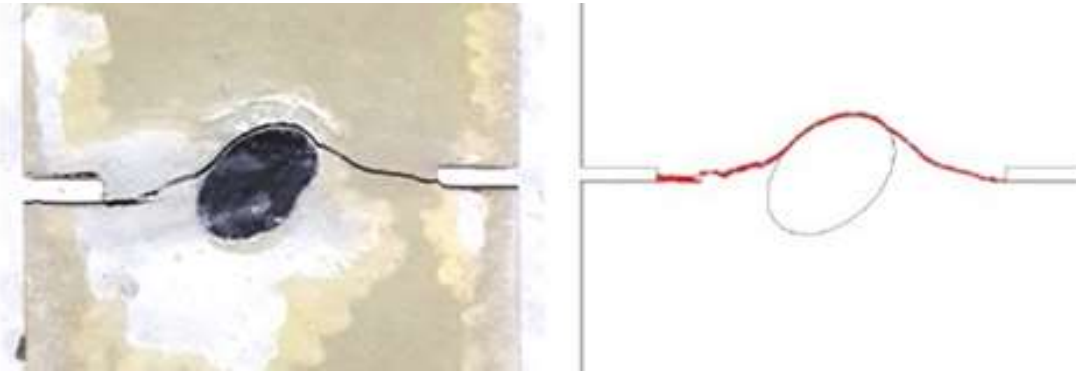
B1-1,5b numunesi için hesaplanan enerjiler,

$$\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (9.9)$$

$$\Sigma E = 21,69 + 120 + 181 \quad (9.10)$$

$$\Sigma E = 322,69 \text{ joule} \quad (9.11)$$

Eş.9.11’de görüldüğü gibi B1-1,5b numunesinin toplam kırılma tokluğu 322,69 joule’dür.



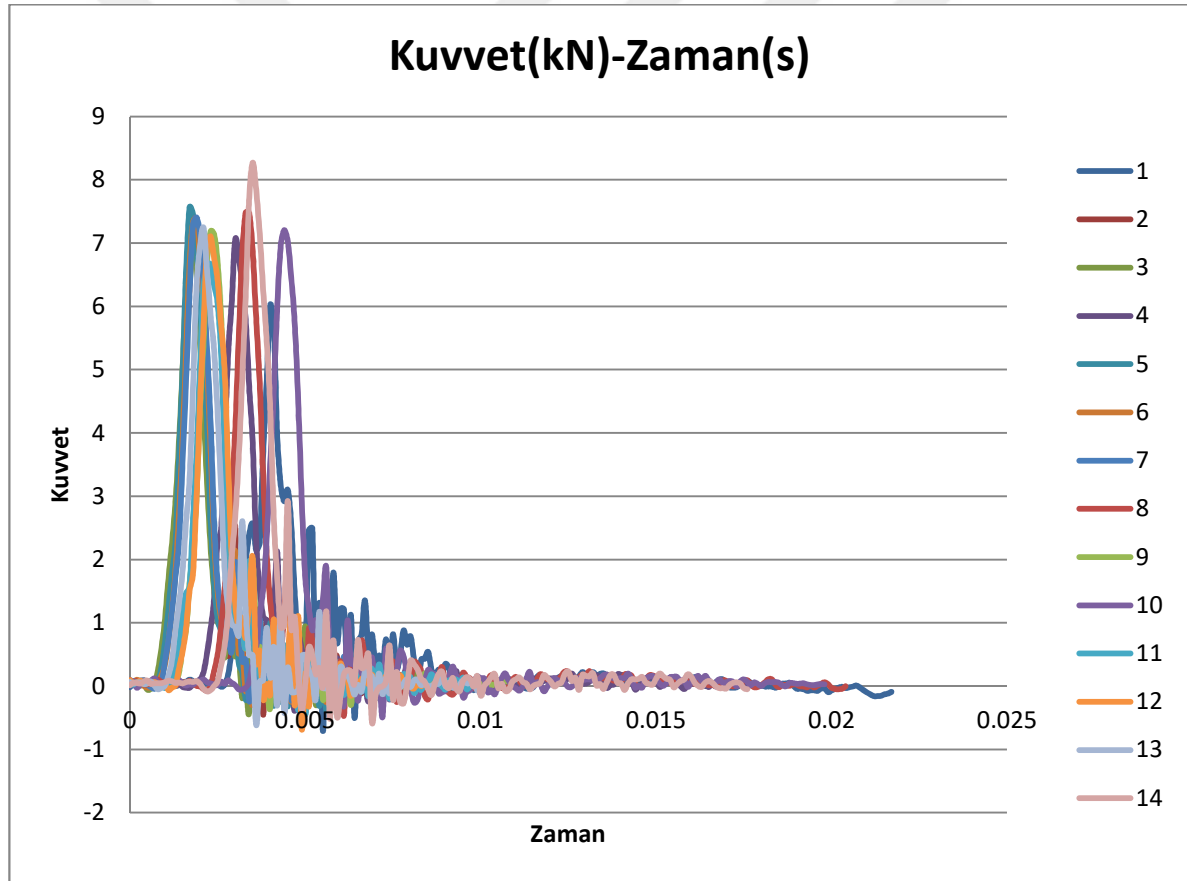
Resim 9.9. B1-1,5b numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.9’da görüldüğü gibi üçüncü düşümde fark edilebilir bir düşü sayısıyla yani enerji gerektirerek kırılan B1-1,5b numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın ara yüzeyinden ilerleyerek ilk çentik kökünün altından ve son çentik kökünün yine alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. Ancak, 45°’lik açıyla yerleştirilmiş bazalt taşına ulaştıktan sonra çatlak bazalt agreganın dar yüzeyine ulaştığında

yeniden çentik köküne doğru yol izleyecek biçimde açığı yaparak kırılmaya neden olmuştur. Ayrıca, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha yüksek dayanıma sahip bazaltın dış yüzeyini takip ederek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

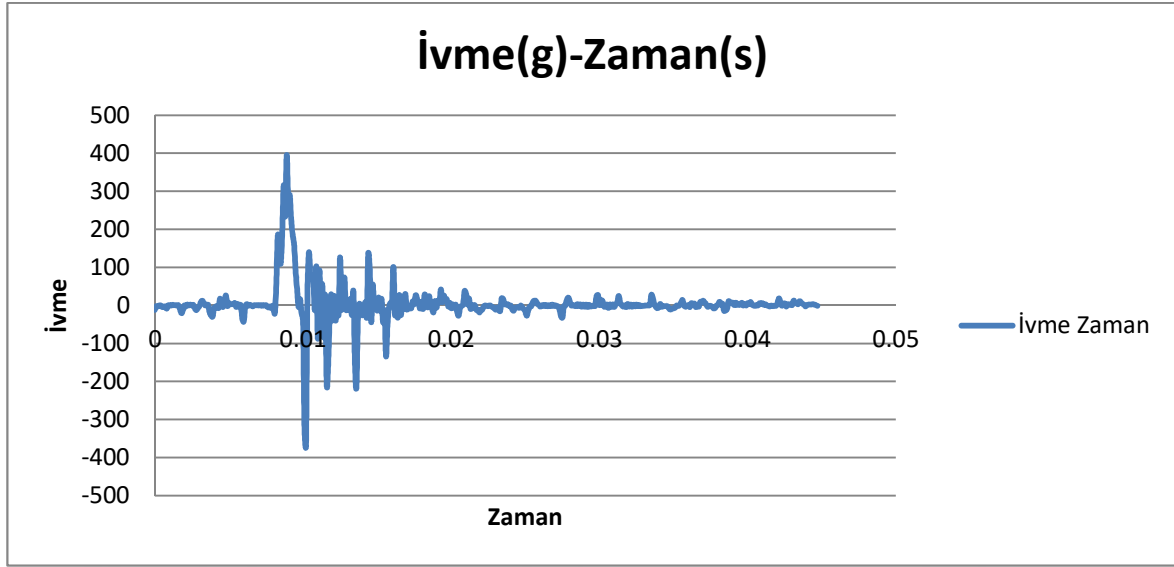
A1-1,5c numunesi

Bütün numunelerde olduğu gibi A1-1,5c numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. Bu çarpma deneyleri, numunede göçme yaratana kadar devam ettirilmiştir. A1-1,5c numunesi 14. düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



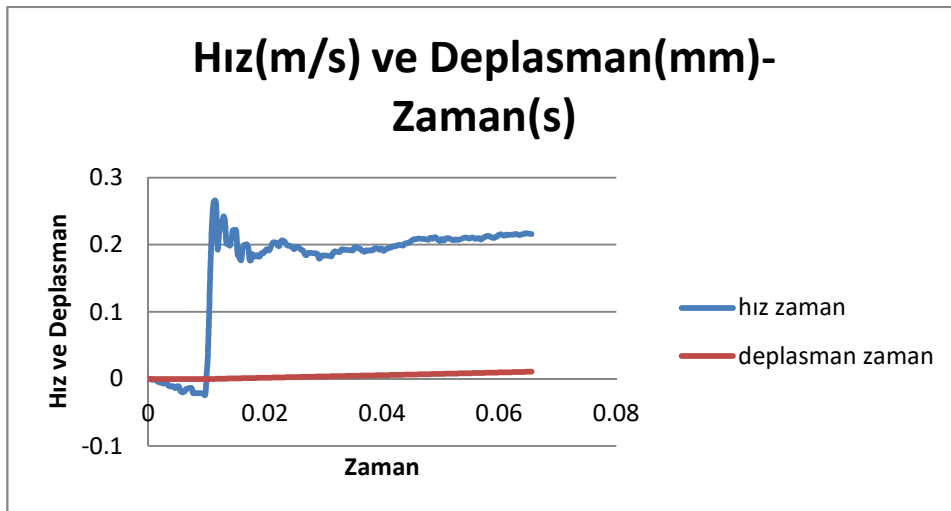
Şekil 9.35. A1-1,5c numunesinde yapılan düşümlere ait kuvvet-zaman grafikleri

Uygulanan kuvvetlerden, minimum ilk düşümde 6,06 kN ve 12. düşümde 6,64 kN gerçekleşmiş ancak, 14. Düşümde genelde uygulanan kuvvetlerin aksine numune 8,27 kN kuvvet alarak kırılmıştır. Bu yüzden, kayda değer en büyük ivme son düşümde gerçekleşmiştir.



Şekil 9.36. A1-1,5c numunesine ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.36’da kırılma anına ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. Maksimum ivmelerin pik değerleri son düşümde 395,16 (g) ve -369,29 (g) olarak ölçülmüştür. Hız-zaman deplasman-zaman grafiği Şekil 9.37’deki gibidir. Görüldüğü gibi kırılma anına ve düşümlere ait veriler uyumluluk içerisinde. Bütün düşümlerde çarpma temas hızları 0,20-0,30 m/s arasında gerçekleşmiş ancak kırılmaya söz konusu çarpma temas hızı 0,27 m/s’dir.



Şekil 9.37. A1-1,5c numunesinin 14. düşümüne ait hız ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,30$ mm gerçekleştiği görülür.

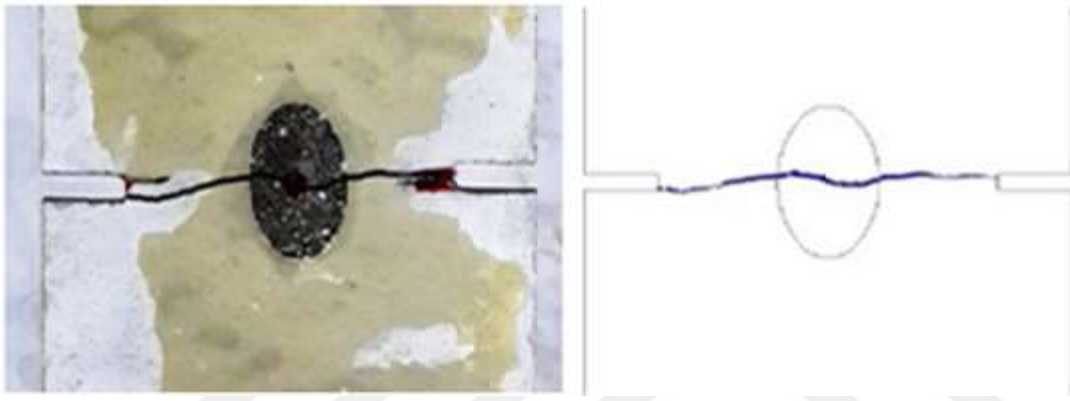
A1-1,5c numunesi için hesaplanan enerjiler,

$$\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + E_8 + E_9 + E_{10} + E_{11} + E_{12} + E_{13} + E_{14} \quad (9.12)$$

$$\Sigma E = 21,98 + 40,37 + 65,41 + 57,47 + 38,1 + 40,4 + 56 + 61,52 + 56,2 + 38,5 + 77,9 + 71,75 + 49,7 + 183 \quad (9.13)$$

$$\Sigma E = 858,3 \text{ joule} \quad (9.14)$$

Eş.9.14’de görüldüğü gibi A1-1,5c numunesinin toplam kırılma tokluğu 858,3 joule’dür.

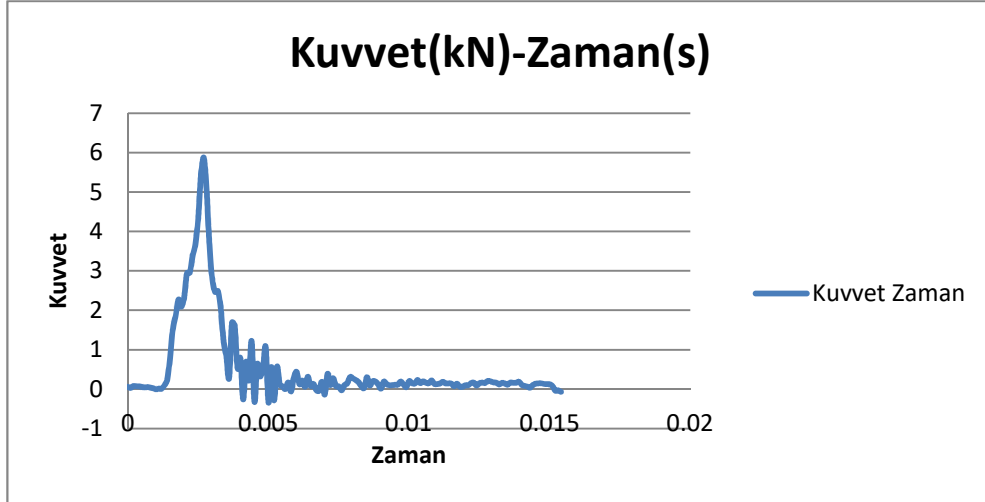


Resim 9.10. A1-1,5c numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.10’da görüldüğü gibi 14. düşümde A1-1,5c numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın içerisinden ilerleyerek ilk çentik kökünün altından ve son çentik kökünün alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. Yüksek düşüm sayısında yani yüksek enerji harcanarak numunenin göçme nedeninin yükleme doğrultusuyla, andezit agreganın atalet momentinin yüksek olduğu doğrultunun çakışık olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 90°’lik açıya sahip andezit agregası çatlak açılmasını yavaşlatmıştır. Numune boyutu arttıkça bu etki azalmaktadır. Ayrıca, en nihayetinde, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha düşük dayanıma sahip andezitin içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

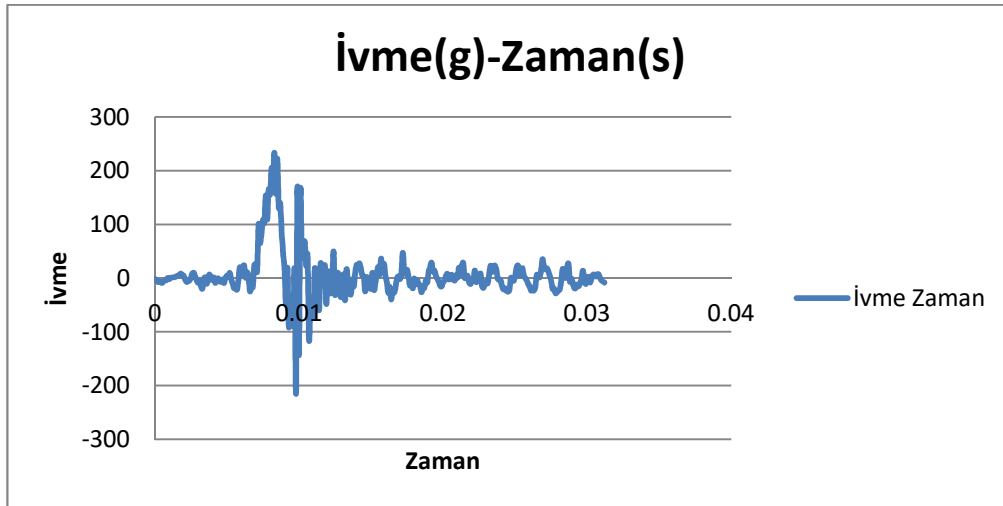
K1-1,5c numunesi

K1-1,5c numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-1,5c numunesi ilk düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 9.38. K1-1,5c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

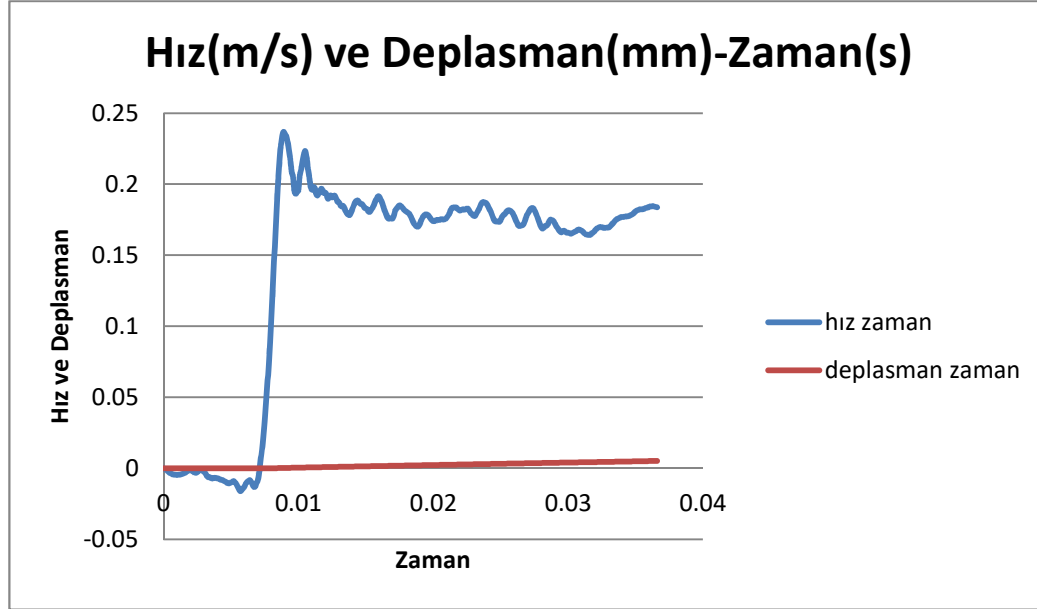
Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 5,87 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



Şekil 9.39. K1-1,5c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği

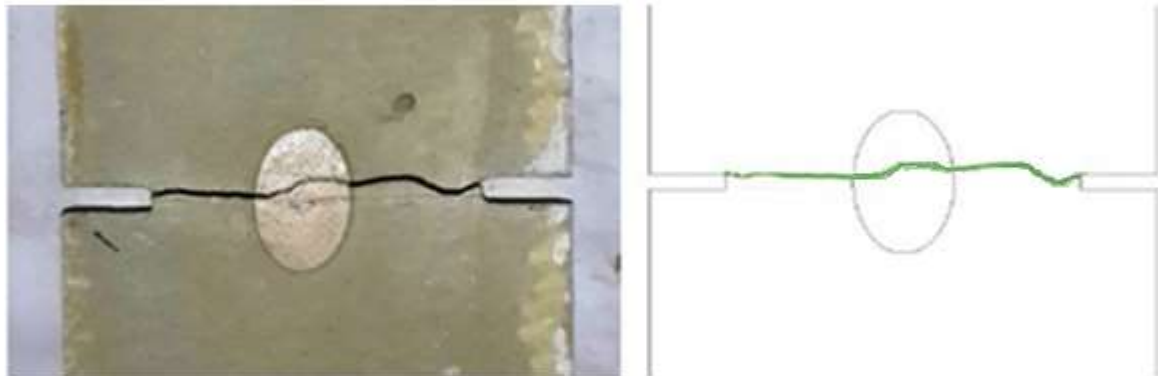
Şekil 9.39’da ilk düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 233,37 (g) ve -213,55 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.40’taki gibidir. Burada, numunenin tek seferde

kırılmasının nedeninin kireç taşı bulunan numunelerin tamamı düşünüldüğünde ve bütünsel davranışlar göz önüne alındığında, kireç taşının düşük dayanımından ötürü çarpma dayanımına az katkıda bulunduğudır. Çarpma temas hızı 0,24 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.40. K1-1,5c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

0,24 m/s temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,37$ mm olduğu görülür. K1-1,5c numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=85,75$ joule olarak hesaplanmıştır.

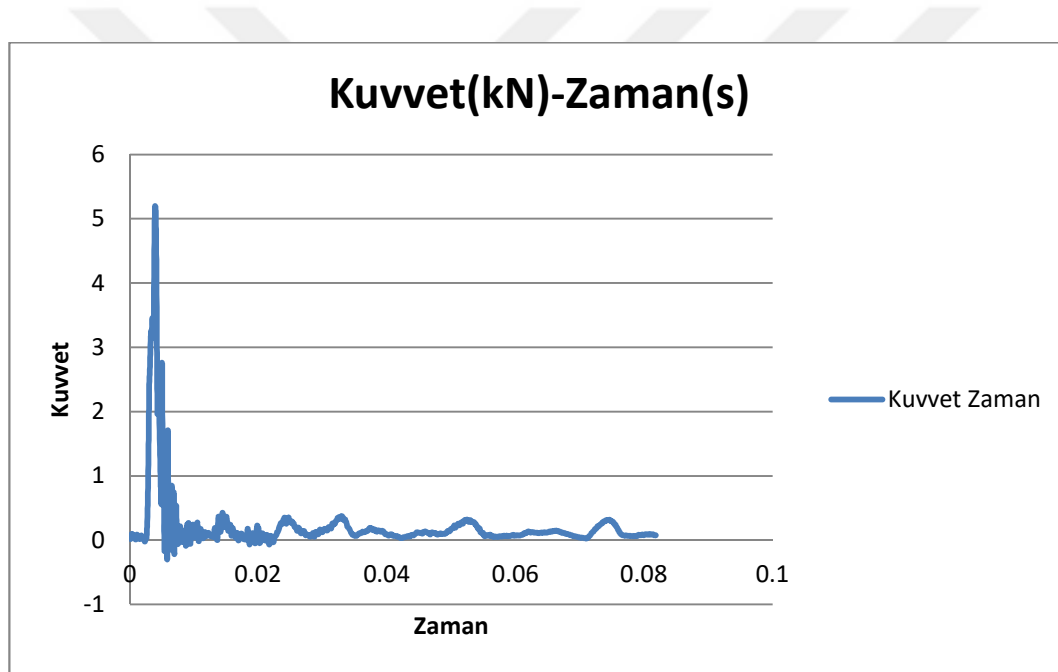


Resim 9.11. K1-1,5c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.11’de görüldüğü gibi ilk düşümde K1-1,5c numunesinde çatlak yörüngesi beton ve kireç taşı agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün üst ucundan başlayarak son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. Ayrıca, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha düşük dayanıma sahip kireç taşının içerisinde geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

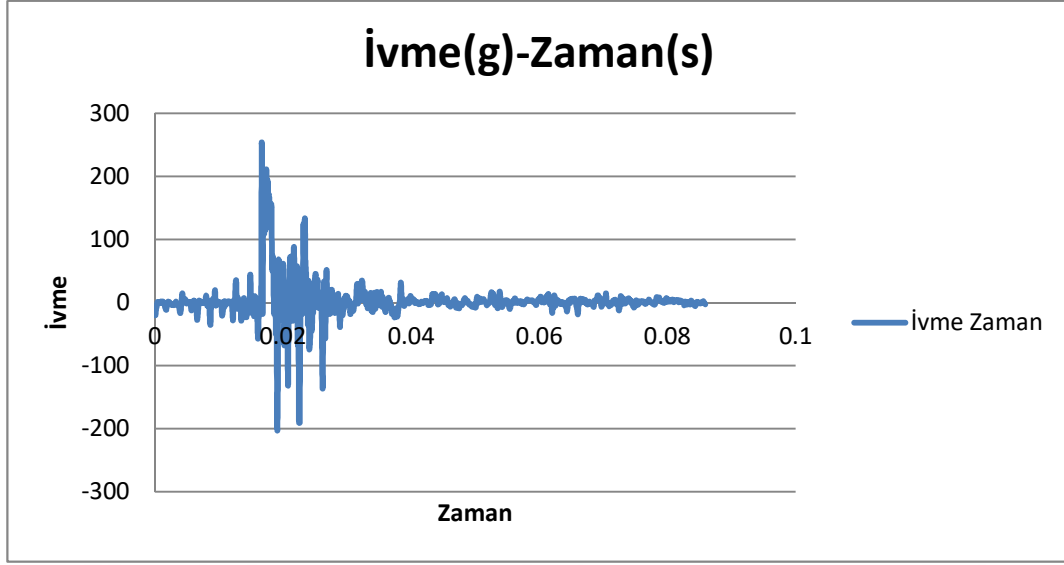
B1-1,5c numunesi

B1-1,5c numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. B1-1,5c numunesi ilk düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



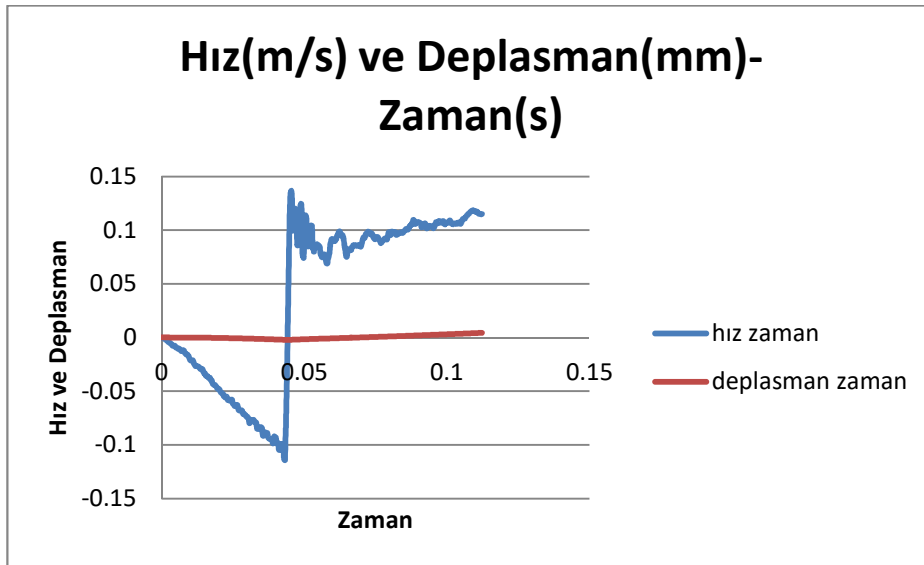
Şekil 9.41. B1-1,5c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 5,19 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



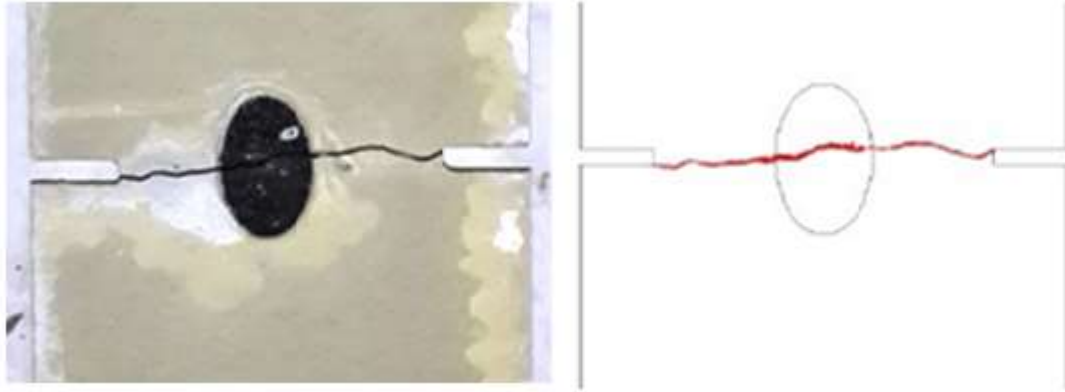
Şekil 9.42. B1-1,5c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.42’de ilk düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 253,45 (g) ve -200,46 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.43’teki gibidir. Burada, numunenin tek seferde kırılmasının nedeninin B1-1,5b göz önünde bulundurulduğunda bazaltın 90°’lik açıyla beton içerisine yerleştirilmesinin ve D4 kodlu dökülen beton basınç dayanımının bazalttan yüksek olabileceğinin etkisi olduğu düşünülmektedir. Çarpma temas hızı minimum 0,11 m/s maksimum 0,14 m/s olarak gerçekleştiği görülmektedir. Hız değişimi yine 0,25 m/s olmaktadır.



Şekil 9.43. B1-1,5c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,23$ mm olduğu görülür. B1-1,5c numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=66,40$ joule olarak hesaplanmıştır.

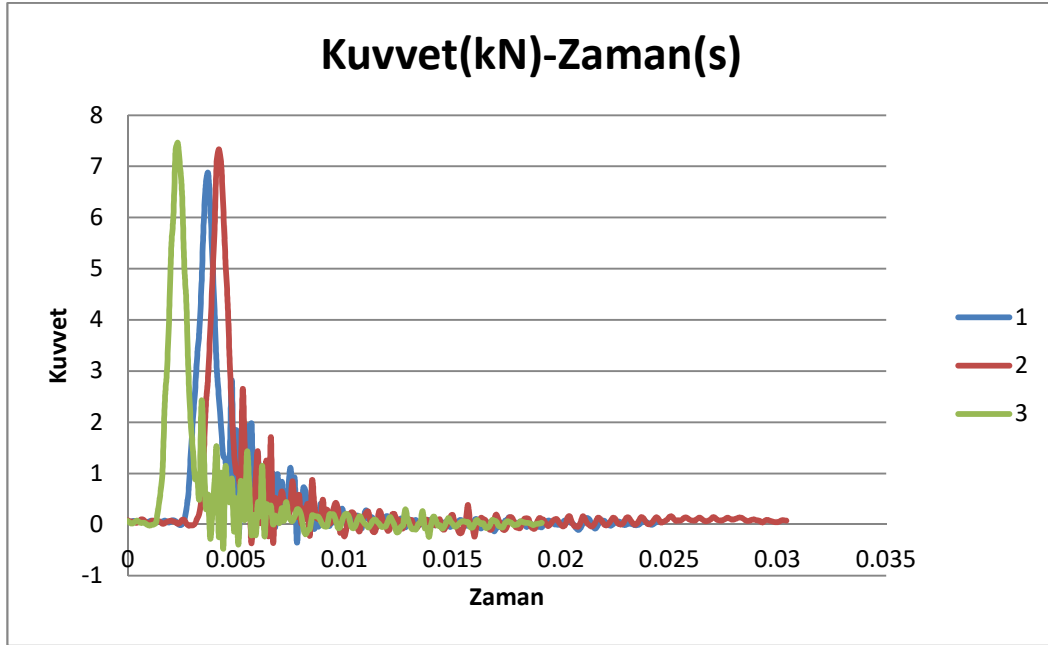


Resim 9.12. B1-1,5c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.12’de görüldüğü gibi ilk düşümde B1-1,5c numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün alt ucundan başlayarak son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyip kırılmaya yol açmıştır. 90°’lik açıyla yerleştirilmiş bazalt agregası ve beton ara yüzeyinden ilerlemek yerine çatlak doğrudan doğruya agreganın içinden geçerek karşı çentiğe ulaşmıştır böylece minimum enerji gerektiren çatlak ilerleme yolunun agregası içerisinde gerçekleştiği anlaşılır.

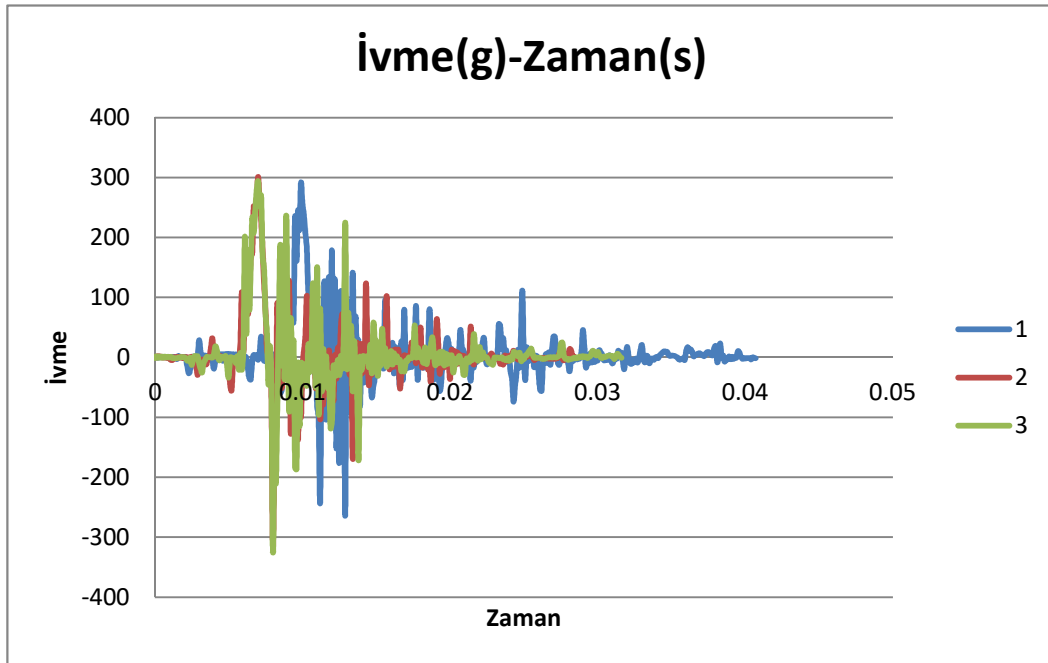
A1-1,7a numunesi

Bütün numunelerde olduğu gibi A1-1,7a numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. Bu çarpma deneyleri, numunede göçme yaratana kadar devam ettirilmiştir. A1-1,7a numunesi 3. düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 9.44. A1-1,7a numunesine ait 3 düşümün kuvvet-zaman grafiği

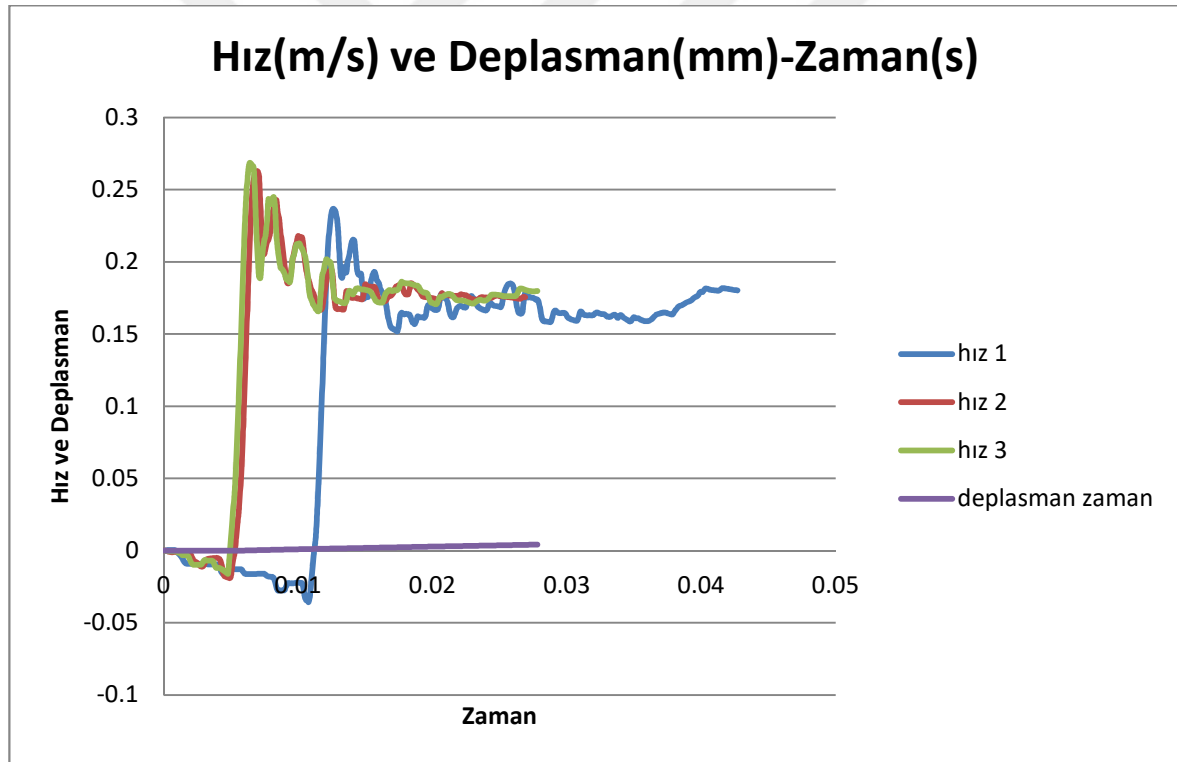
Uygulanan maksimum kuvvetler, ilk düşümde 6,87 kN, ikinci düşümde 7,33 kN, üçüncü düşümde 7,46 kN ile gerçekleşmiş ve üçüncü düşümde numune kırılmıştır. Bu grafiklerden bazıları temas anının şiddetine ve veri elde edilen programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.



Şekil 9.45. A1-1,7a numunesine ait 3 düşümün ivme-zaman grafiği

Şekil 9.45'te üç düşüme de ait ivme zaman grafiği sırasıyla gösterilmiştir. Minimum ivmelerin pik değerleri birinci düşümde 290,76 (g) ve -264,27 (g) olarak gerçekleşmiştir, maksimum ivmelerin pik değerleri ise ikinci ve üçüncü düşümde birbirine çok yakın değerler olup üst üste binmiştir. Ancak, en yüksek değerler üçüncü düşüme ait olup 293,09 (g) ve -324,06 (g) olarak ölçülmüştür. Numune, düşük sayıda düşümde kırıldığından, hız-zaman ve üçüncü düşüme ait deplasman-zaman grafiği Şekil 9.46'daki gibidir. Görüldüğü gibi kırılma anına ve düşümlere ait veriler uyumluluk içerisindedir. Üç düşümde de çarpma temas hızları 0,20-0,30 m/s arasında gerçekleşmiştir.

3. düşümde, 0,27 m/s temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,26$ mm gerçekleştiği görülür.



Şekil 9.46. A1-1,7a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

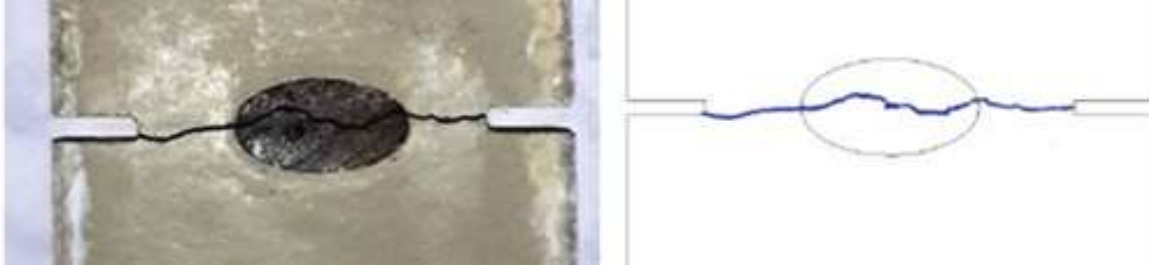
A1-1,7a numunesi için hesaplanan enerjiler,

$$\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (9.15)$$

$$\Sigma E = 37,92 + 53,8 + 66,2 \quad (9.16)$$

$$\Sigma E = 157,92 \text{ joule} \quad (9.17)$$

Eş.9.17’de görüldüğü gibi A1-1,7a numunesinin toplam kırılma tokluğu 157,92 joule’dür.

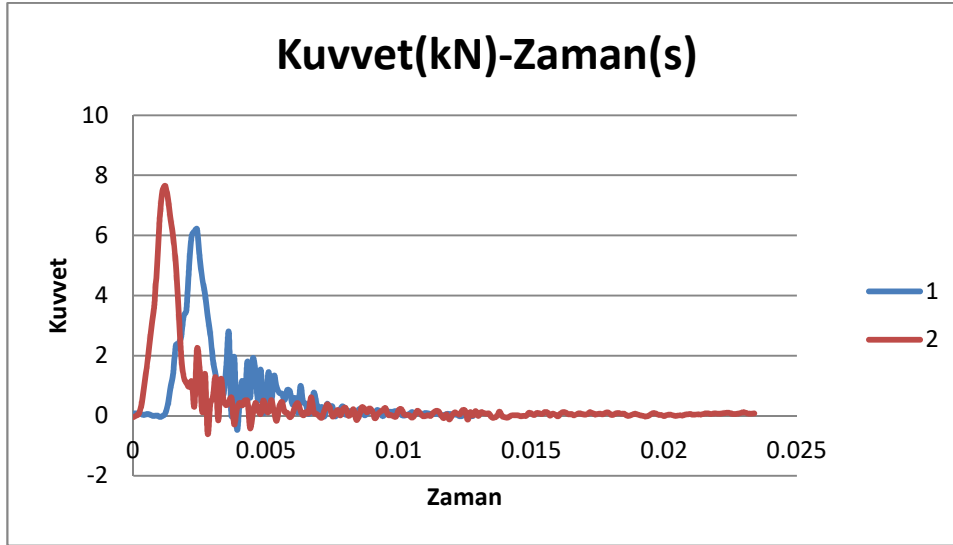


Resim 9.13. A1-1,7a numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.13’te görüldüğü gibi ilk düşümde A1-1,7a numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün alt ucundan başlayarak son çentik kökünün alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyip kırılmaya yol açmıştır. 0°’lik açıyla yerleştirilmiş andezit agregası boyutunun A1-1,5a numunesine göre büyüse de düşü sayısında fazla bir değişime neden olmamış ve kayda değer bir çarpma dayanımında değişikliğe yol açmamıştır. Çatlak doğrudan doğruya agreganın içinden geçerek karşı çentiğe ulaşmıştır böylece minimum enerji gerektiren çatlak ilerleme yolunun agregası içerisinde gerçekleştiği anlaşılmıştır.

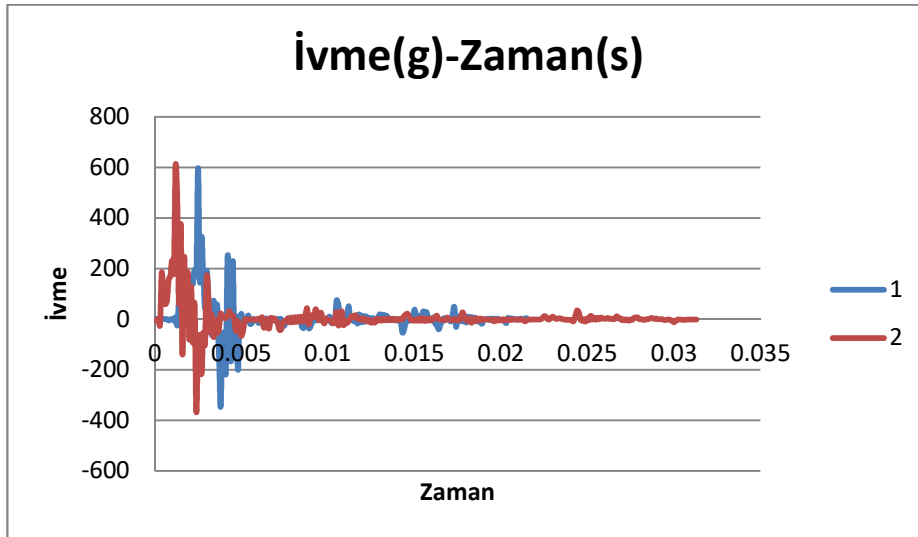
K1-1,7a numunesi

K1-1,7a numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-1,7a numunesi ikinci düşümde kırılrsa da düşüm sayısı açısından andezit barındıran numuneye ve K1-1,5a numunesine göre belirgin bir farklılık taşımamaktadır.



Şekil 9.47. K1-1,7a numunesine ait iki düşümün kuvvet-zaman grafiği

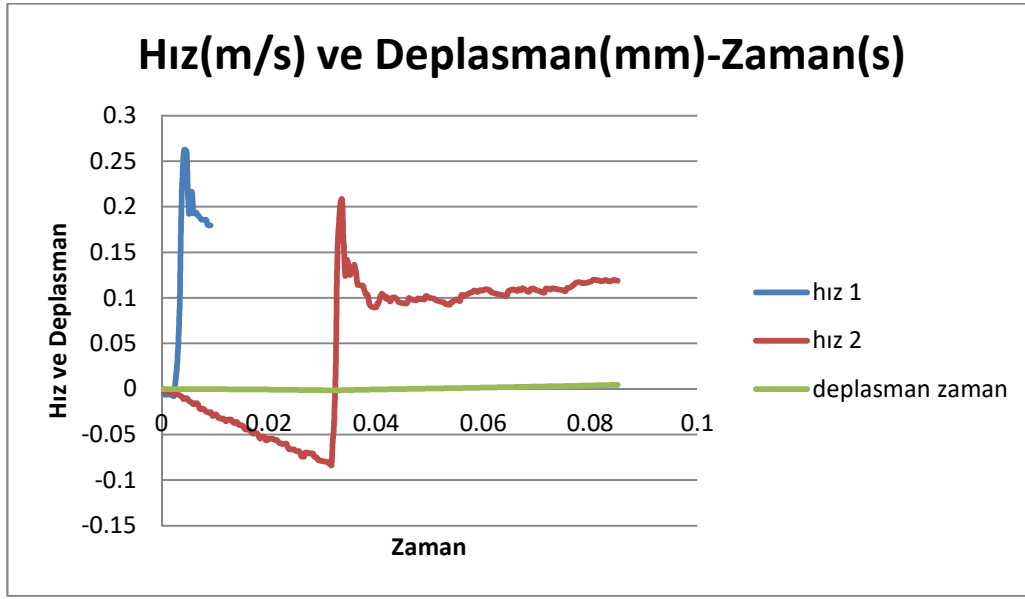
Uygulanan maksimum kuvvetler, ilk düşümde 6,21 kN olarak ölçülmüş ve ikinci düşümde K1-1,7a numunesi 7,65 kN kuvvet alarak kırılmıştır. Bu değerlere göre, K1-1,5a numunesinin kırılmasına neden olan kuvvet ortalama olarak K1-1,7a numunesinin aldığı kuvvetlere yakındır ve farklılık olduğundan söz edilemez. Bu grafikler programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.



Şekil 9.48. K1-1,7a numunesine ait iki düşümün ivme-zaman grafiği

Şekil 9.48’de iki kez yapılan düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşüm için 596,25 (g) ve -347,10 (g) olarak ölçülmüştür, ikinci düşüm için ise pik ivmeler 606,96 (g) ve -365,32(g) olarak grafiklerden okunur ve ikinci düşümde

numune kırılmıştır. Düşük sayıda düşümde numune kırıldığından, hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği 9.49'daki gibidir. Burada, numunenin iki düşümde kırılması beklendiği gibi kireç taşının betonun içinde düşük mukavemette bir yapı teşkil etmekte olmasından kaynaklanmakta, ayrıca; sadece uygulanan kuvvete değil şahmerdanın ivme aralığına da bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Çarpma temas hızları ilk düşümde 0,26 m/s, ikinci düşümde 0,21 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.49. K1-1,7a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

İkinci düşümde kırılan numunede, temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,25$ mm olarak gerçekleştiği görülür. K1-1,7a numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=38,5+93,8=132,3$ joule olarak hesaplanmıştır.

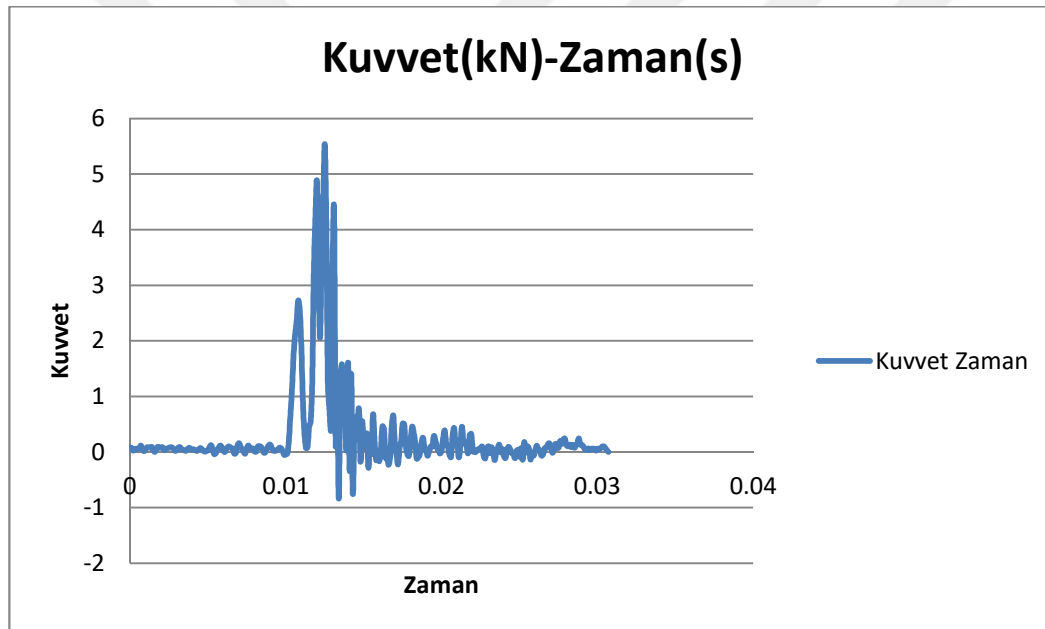


Resim 9.14. K1-1,7a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.14'te görüldüğü gibi ikinci düşümde K1-1,7a numunesinde çatlak yörüngesi beton ve kireç taşı agreganın ortasından ilerleyerek ilk çentik kökünün altından başlayarak son çentik kökünün ortasından çıkacak biçimde yörünge izleyip kırılmaya yol açmıştır. Bunun nedeni, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha düşük dayanıma sahip kireç taşının içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

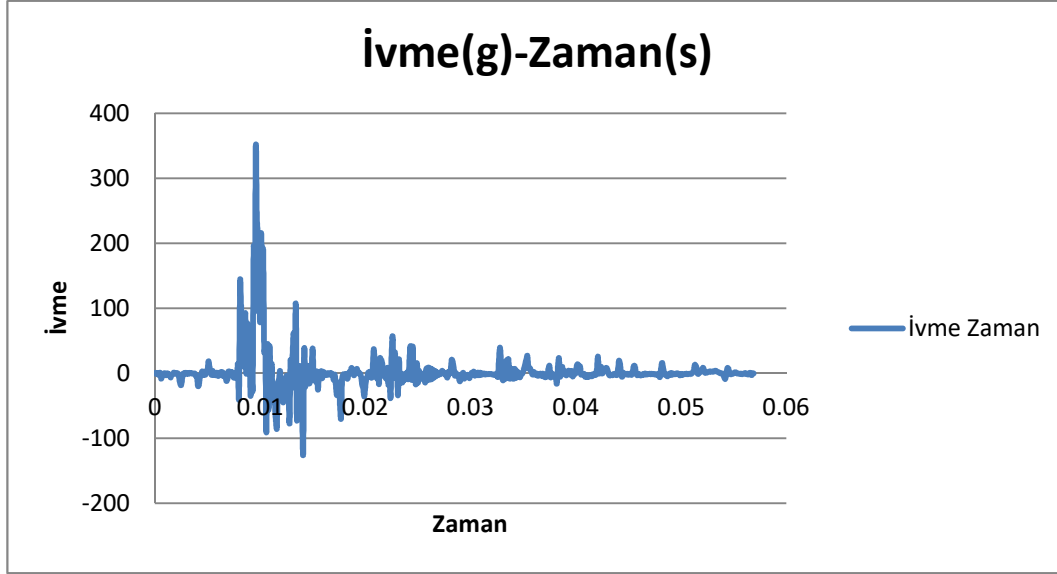
B1-1,7a numunesi

B1-1,7a numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. B1-1,7a numunesi, B1-1,5a numunesi gibi ilk düşümde kırılmıştır.



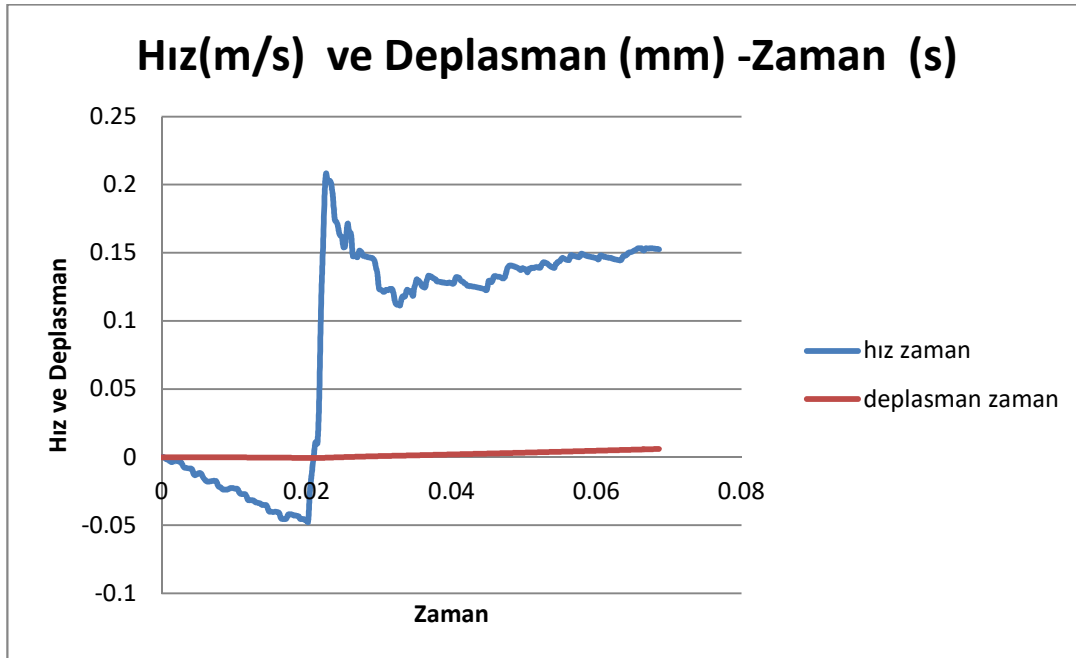
Şekil 9.50. B1-1,7a numunesine ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan maksimum kuvvet, ilk düşümde 5,53 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır. Numunenin aldığı kuvvet, B1-1,5a numunesinin kırıldığı kuvvete çok yakındır.



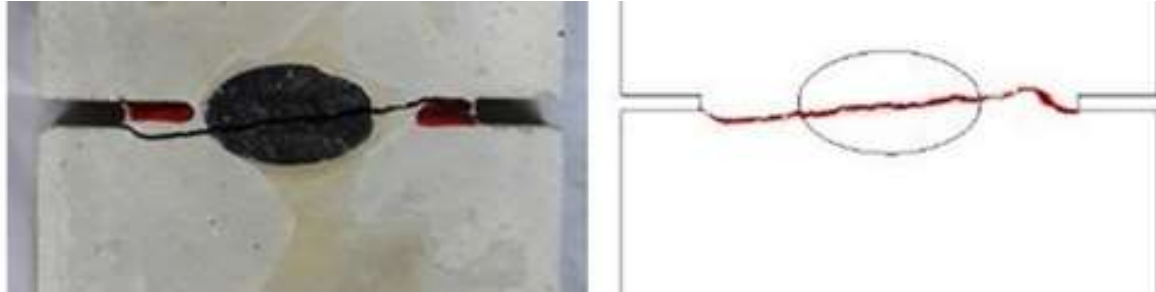
Şekil 9.51. B1-1,7a numunesine ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.51’de tek düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri 348,59 (g) ve -123,18 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.52’deki gibidir. Çarpma temas hızı 0,21 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.52. B1-1,7a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,21$ mm olarak gerçekleştiği görülür. B1-1,7a numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=80$ joule olarak hesaplanmıştır.

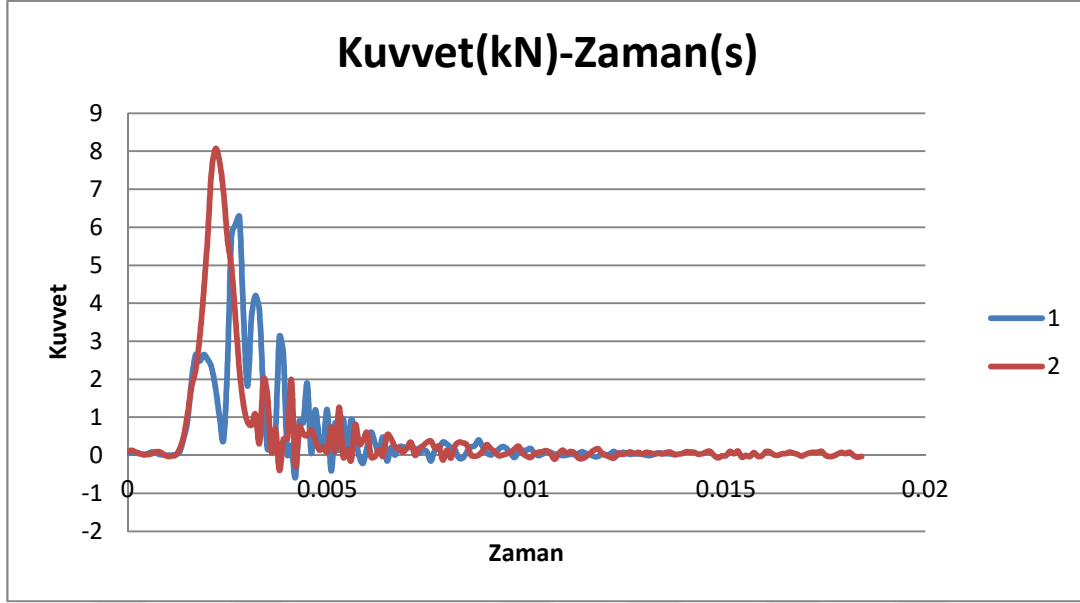


Resim 9.15. B1-1,7a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.15'te görüldüğü gibi ilk düşümde B1-1,7a numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın ortasından ilerleyerek ilk çentik kökünün alt, son çentik kökünün yine alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. 0° 'lik açılarda, (a) koduna sahip beton numunelerde çarpma etkisi altında, çatlak yörüngelerinin birbirinden farklı yörüngeler izlemediği görülmüştür. Bu numunede, çatlak açılar yaparak seyretmiş ve betonu terk ederken yine farklı bir açıyla kırılmaya neden olmuştur. Bazalt bulunan numunede de agrega içinden seyreden benzer bir kırılma olması yerleştirilme açısının ve beton dayanımının önem taşıdığını göstermektedir. Çatlaklar her zaman daha düşük kırılma enerjisine sahip kesitleri takip ederek, zayıf olan ve minimum enerji gerektiren yolu tercih etmiştir.

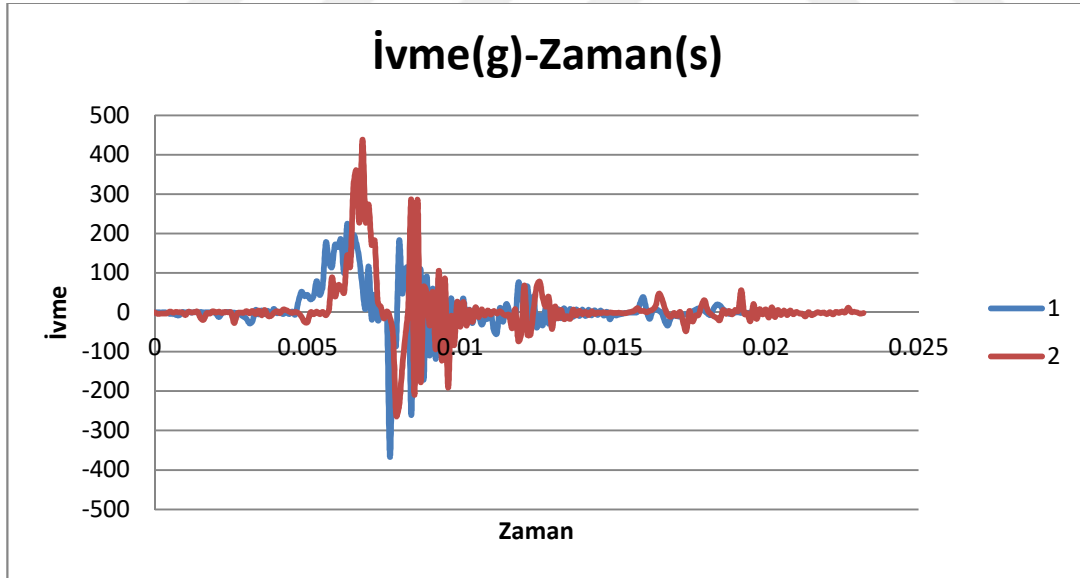
A1-1,7b numunesi

A1-1,7 numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. A1-1,7b numunesi iki düşümde kırılmıştır.



Şekil 9.53. A1-1,7b numunesine ait kuvvet-zaman grafiği

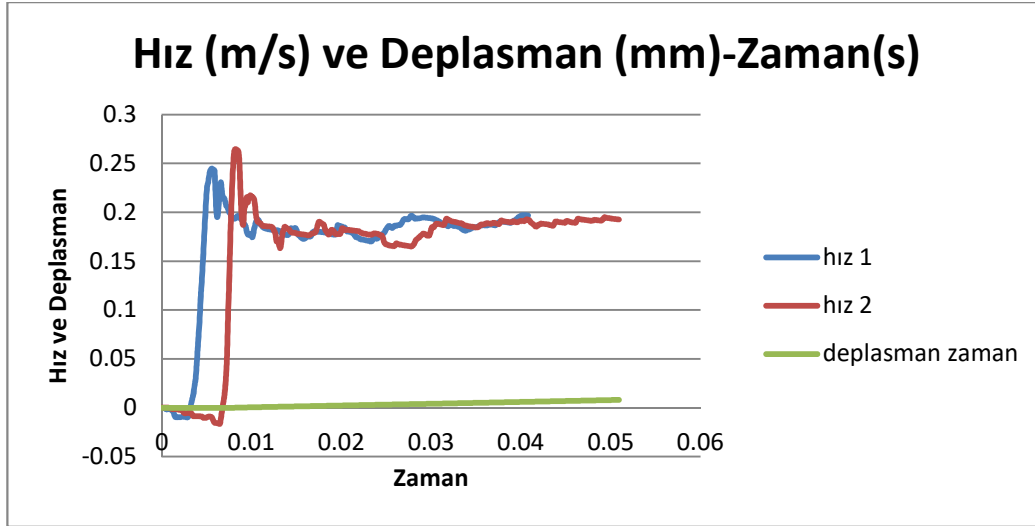
Uygulanan maksimum kuvvet, ilk düşümde 6,27 kN olarak gerçekleşmiş ve ikinci düşümde numune 8,06 kN alarak kırılmıştır.



Şekil 9.54. A1-1,7b numunesine ait ivme-zaman grafiği

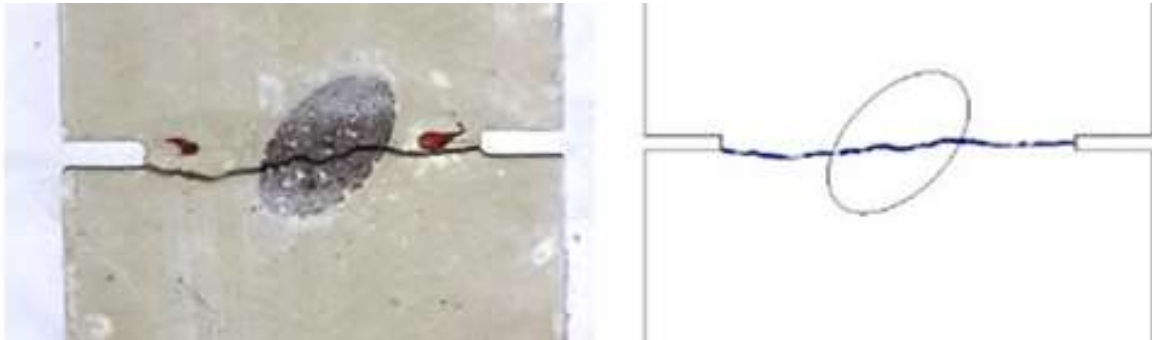
Şekil 9.54'te iki düşüme de ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşüm için 224,67 (g) ve -366,88 (g) olarak ölçülmüştür, ikinci düşüm için ise pik ivmeler 438,64 (g) ve -261,52 (g) olarak grafiklerden okunur ve ikinci düşümde numune kırılmıştır. Düşük sayıda düşümde numune kırıldığından, hız-zaman ve deplasman-zaman

grafiği Şekil 9.55'teki gibidir. Burada, numunenin iki düşümde kırılması A1-1,5b numunesine göre düşüm sayısında belirgin bir farklılık göstermemiştir. Ancak, numunenin tokluğunda az da olsa bir değişme gözlenmektedir. Ayrıca, bu değişimin sadece uygulanan kuvvete değil şahmerdanın ivme aralığına da bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Çarpma temas hızları ilk düşümde 0,24 m/s, ikinci düşümde 0,26 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.55. A1-1,7b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

İkinci düşümde temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,23$ mm olarak gerçekleştiği görülür. A1-1,7b numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=70,9+135,8=206,7$ joule olarak hesaplanmıştır.



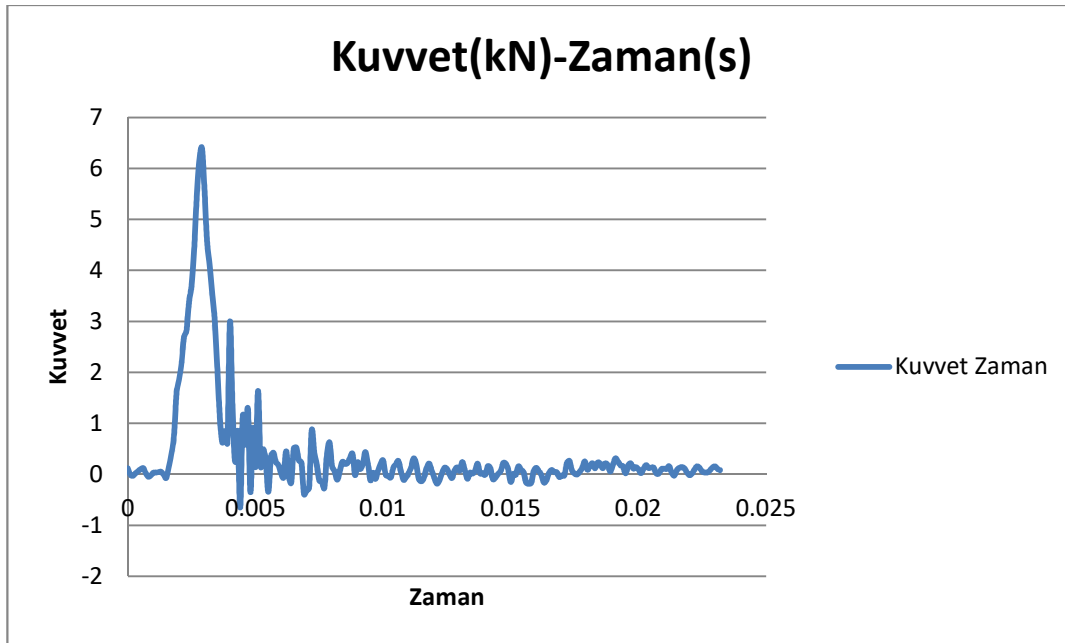
Resim 9.16. A1-1,7b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.16'da görüldüğü gibi ikinci düşümde A1-1,7b numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın ortasından ilerleyerek ilk çentik kökünün alt, son çentik kökünün alt kısmına kadar uzanmaktadır.

kökünün yine alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. Çarpma etkisi altında andezit agreganın 45°'lik açıya sahip olması çatlak yörüngesinde farklı bir değişime yol açmamaktadır. Çatlaklar her zaman daha düşük kırılma enerjisine sahip kesitleri takip ederek, zayıf olan ve minimum enerji gerektiren yolu tercih etmiştir.

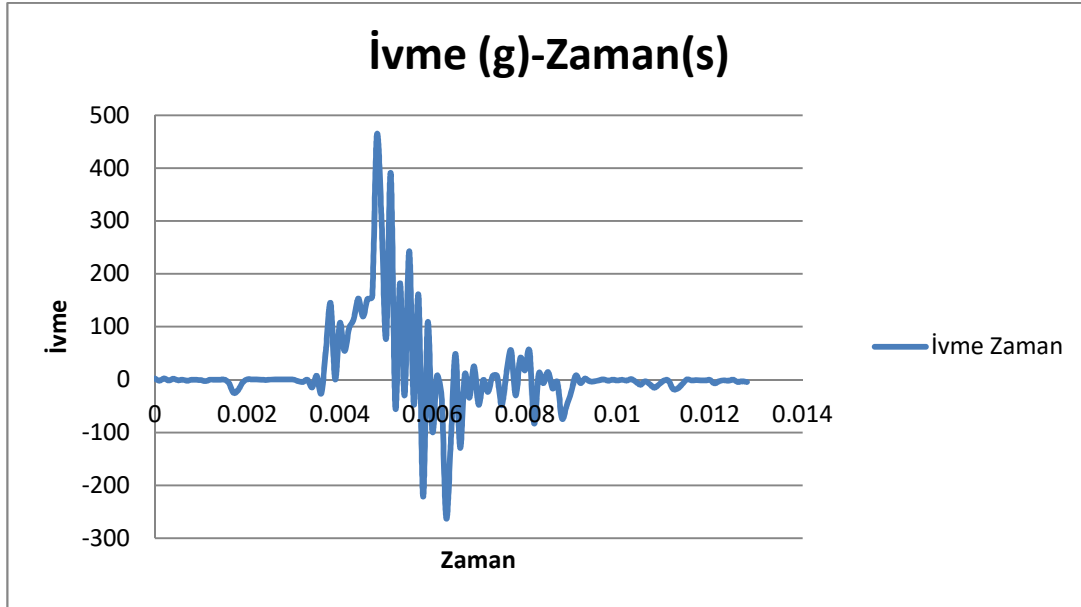
K1-1,7b numunesi

K1-1,7b numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-1,7b numunesi, K1-1,5b numunesi gibi ilk düşümde kırılmıştır.



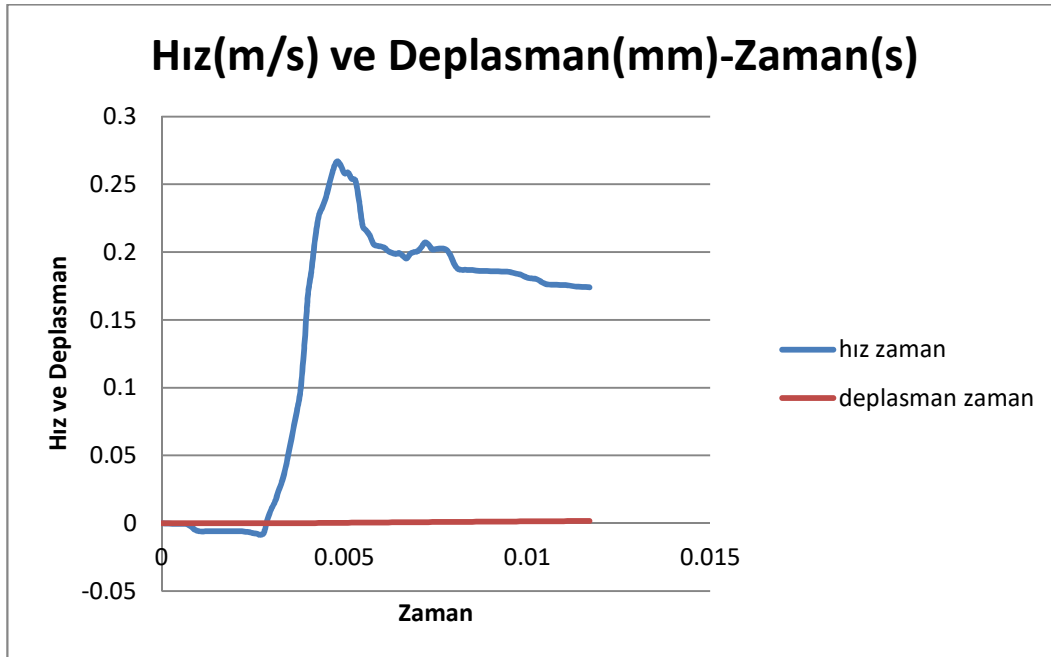
Şekil 9.56. K1-1,7b numunesine ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan maksimum kuvvet, ilk düşümde 6,40 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



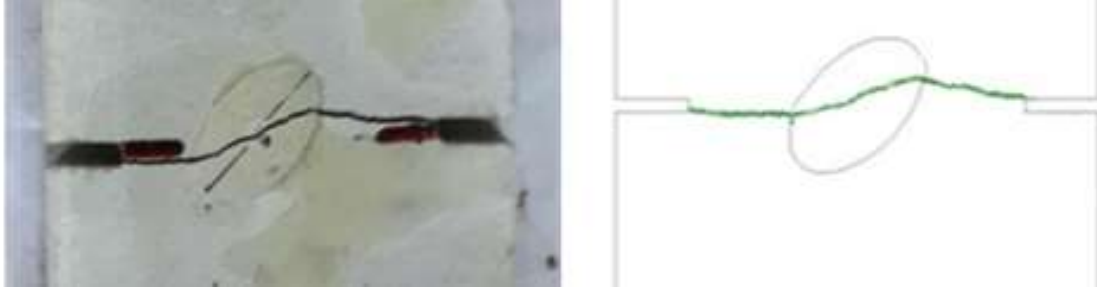
Şekil 9.57. K1-1,7b numunesine ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.57’de tek düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri 461,73 (g) ve -261,82 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.58’deki gibidir. Çarpma temas hızı 0,27 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.58. K1-1,7b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,13$ mm olarak gerçekleştiği görülür. K1-1,7b numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=84,28$ joule olarak hesaplanmıştır.

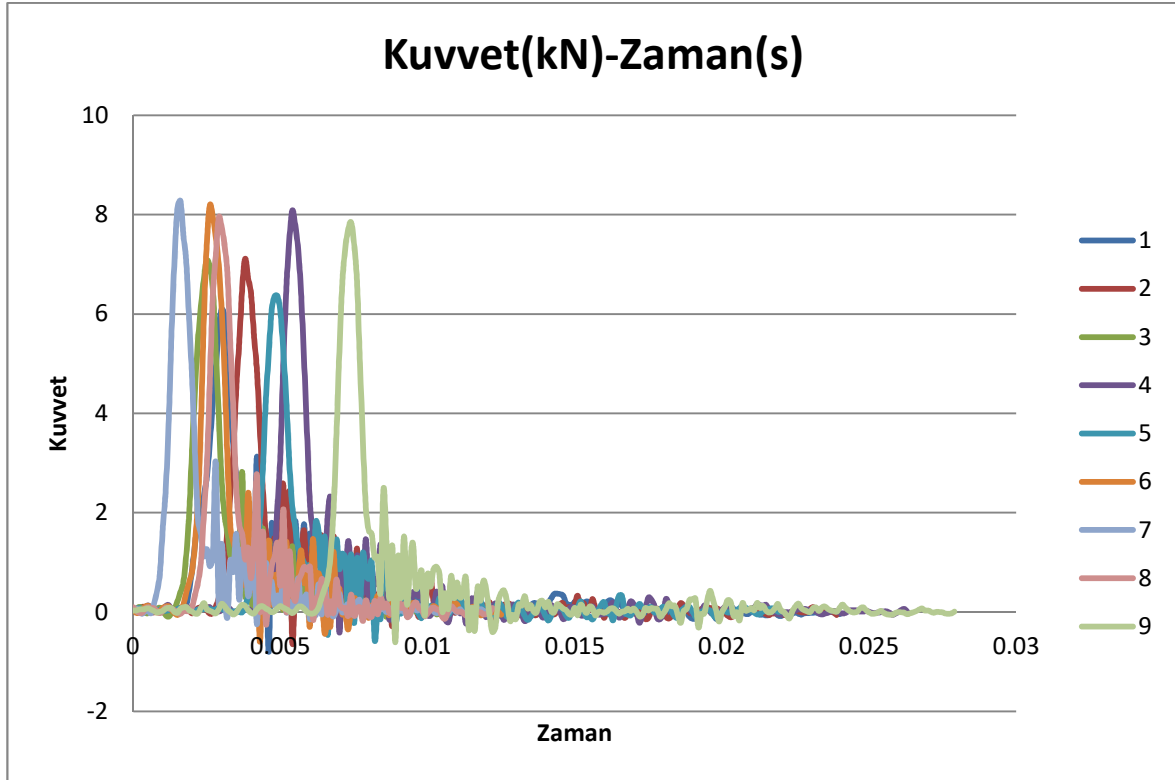


Resim 9.17. K1-1,7b numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.17’de görüldüğü gibi ilk düşümde K1-1,7b numunesinde çatlak yörüngesi beton ve kireç taşı agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün altından ve son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek eğilme tipi kırılmaya yol açmıştır. Ancak, kireç taşının içerisine ulaştığında çatlaklar 45° ’lik açıyla yerleştirilmiş kireç taşıyla aynı doğrultuya yakın güzergâhla farkedilir biçimde ilerlemiş tekrar beton malzemeye geçtiğinde yeniden çentik köküne doğru yol izleyecek biçimde açı yaparak kırılmaya neden olmuştur. Ayrıca, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha düşük dayanıma sahip kireç taşının içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

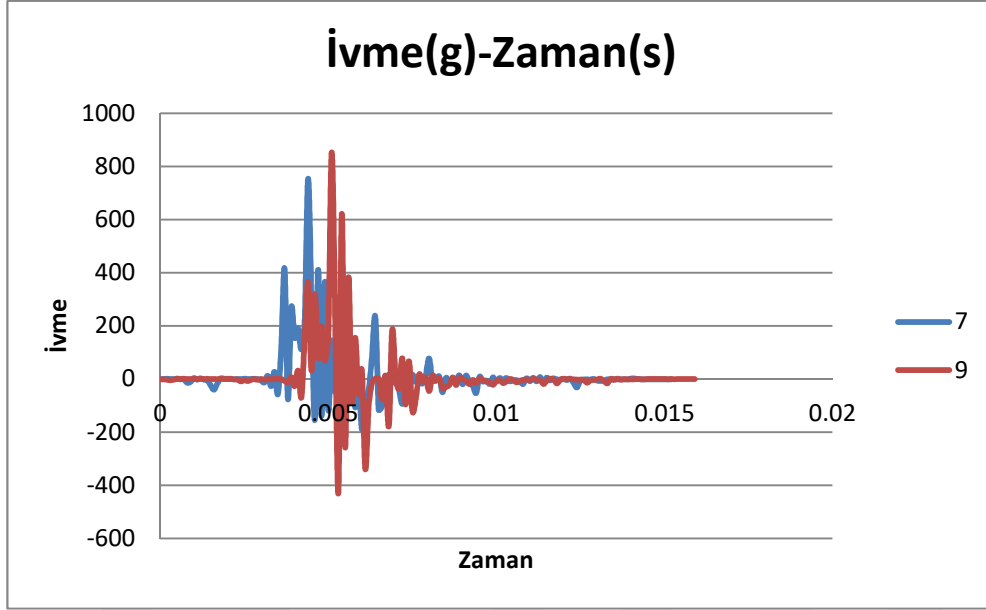
B1-1,7b numunesi

Bütün numunelerde olduğu gibi B1-1,7b numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. Bu çarpma deneyleri, numunede göçme yaratana kadar devam ettirilmiştir. B1-1,7b numunesi 9. düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



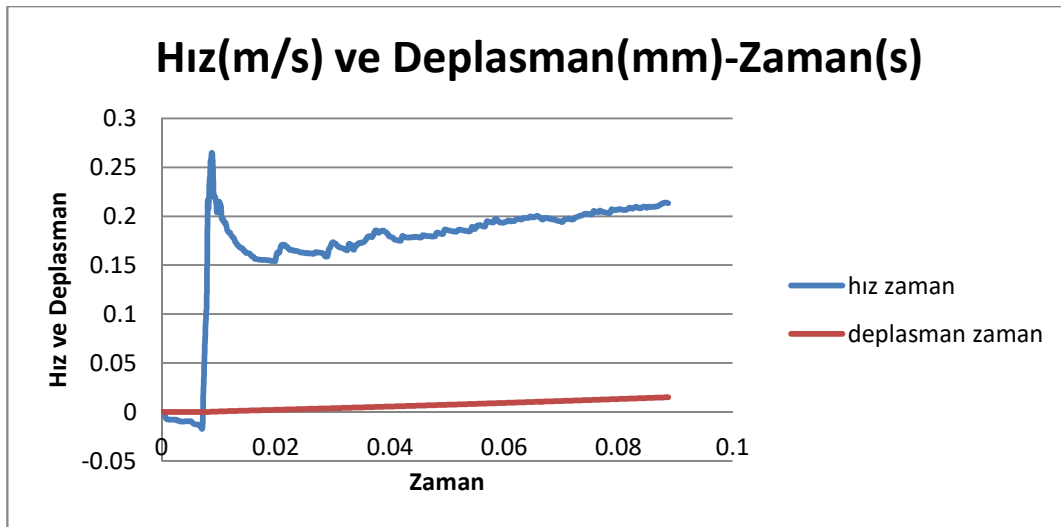
Şekil 9.59. B1-1,7b numunesinde yapılan düşümlere ait kuvvet-zaman grafikleri

Uygulanan kuvvetlerden, minimum gerçekleşen kuvvetler ilk düşümde 6,10 kN ve 5. düşümde 6,36 kN olarak ölçülmüş; maksimum kuvvet ise 7. düşümde 8,28 kN olmuştur. Ancak, 9. düşüme doğru uygulanan kuvvetler azalmışlar ve 9. düşümde 7,84 kN kuvvet olarak kırılmıştır. Bu yüzden, 9. Düşümde kırılmaya neden olan ivmeyle maksimum kuvvetin üretildiği 7. düşüme ait ivmelerin karşılaştırılması açısından şekil 9.59'a bakılmalıdır.



Şekil 9.60. B1-1,7b numunesinde yapılan düşümlere ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.60'ta görüldüğü gibi 7. ve 9. düşümlere ait ivme-zaman grafiği sırasıyla gösterilmiştir. Maksimum ivmelerin pik değerleri 7. düşümde 753,47 (g) ve -189,17 (g) olarak gerçekleşmiştir. Son düşümde (dokuzuncu) ise 852,04 (g) ve -426,49 (g) olarak ölçülmüş ve numune kırılmıştır. Burada, numuneyi kıran sadece ani şok kuvveti değil, kuvvetin ne kadar yüksek hızda üretildiğidir. Son düşüme ait, hız-zaman deplasman-zaman grafiği Şekil 9.61'deki gibidir. Görüldüğü gibi kırılma anına ve düşümlere ait veriler uyumluluk içerisindedir. Bütün düşümlerde çarpma temas hızları 0,25-0,30 m/s arasında gerçekleşmiş ancak kırılmaya söz konusu çarpma temas hızı 0,26 m/s'dir.



Şekil 9.61. B1-1,7b numunesinin 9. düşümüne ait hız ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,33$ mm gerçekleştiği görülür.

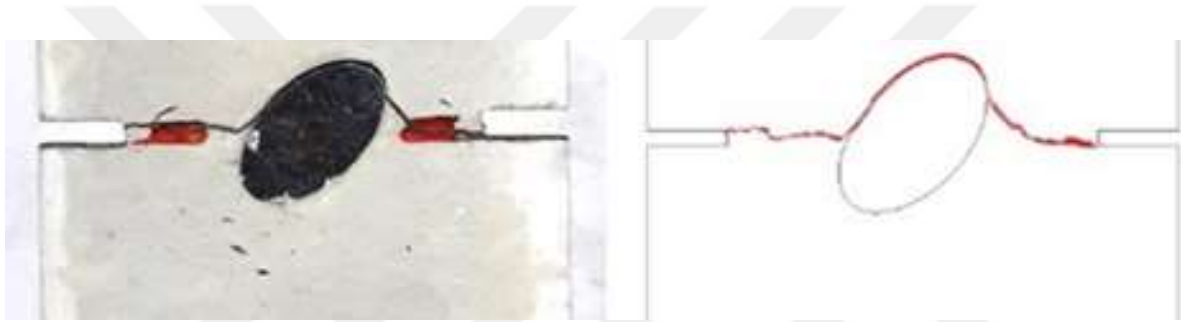
B1-1,7b numunesi için hesaplanan enerjiler,

$$\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + E_8 + E_9 \quad (9.18)$$

$$\Sigma E = 87,8 + 83,48 + 87,66 + 183 + 82,5 + 135 + 151,73 + 135,9 + 124,5 \quad (9.19)$$

$$\Sigma E = 1071,57 \text{ joule} \quad (9.20)$$

Eş. 9.20’de görüldüğü gibi B1-1,7b numunesinin toplam kırılma tokluğu 1071,57 joule’dür.

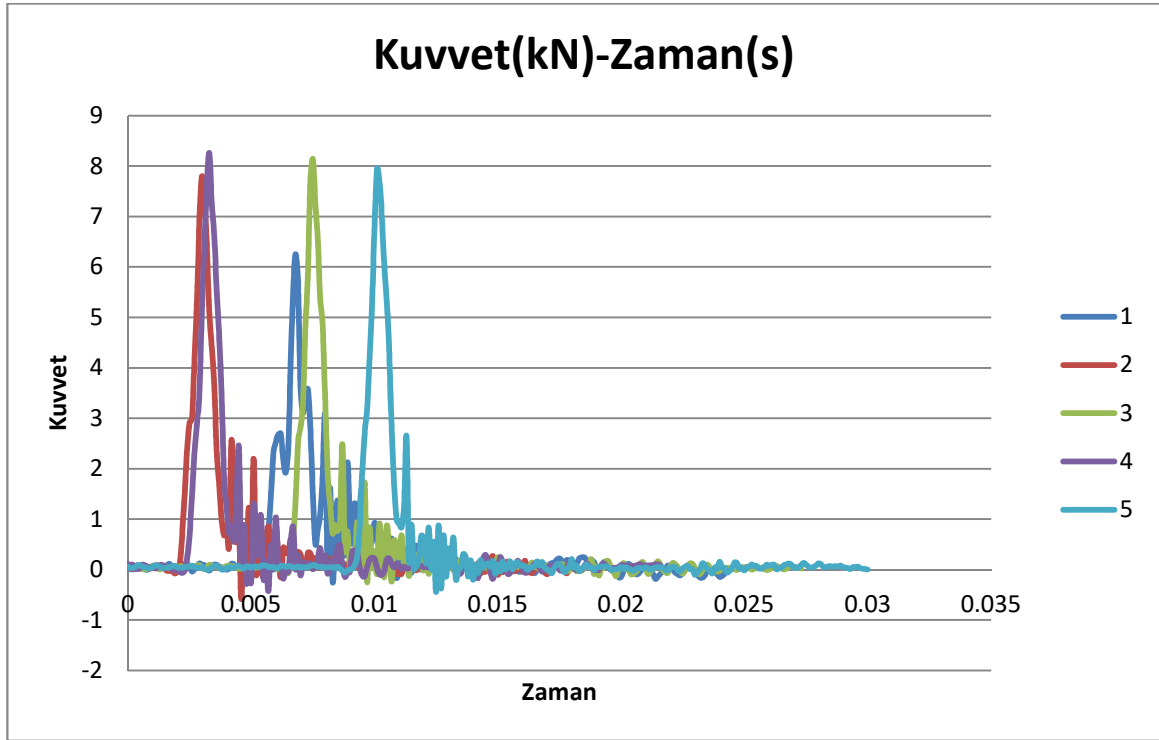


Resim 9.18. B1-1,7b numunesinin kırılma sonrasına ait görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.18’de görüldüğü gibi dokuzuncu düşümde fark edilebilir bir düşü sayısıyla, yani enerji gerektirerek, kırılan B1-1,7b numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın ara yüzeyinden ilerleyerek ilk çentik kökünün üst ucundan ve son çentik kökünün alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. Ancak, 45° ’lik açıyla yerleştirilmiş bazalt taşına ulaştıktan sonra çatlak bazalt agreganın dar yüzeyine ulaştığında yeniden çentik köküne doğru yol izleyecek biçimde açı yaparak kırılmaya neden olmuştur. Ayrıca, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha yüksek dayanıma sahip bazaltın dış yüzeyini takip ederek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

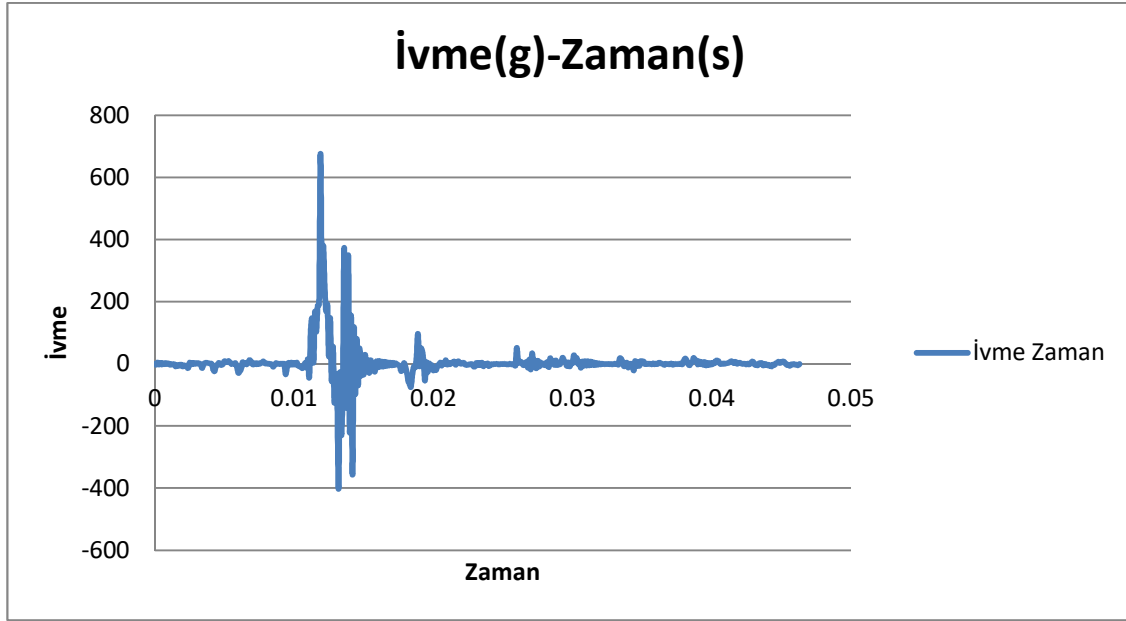
A1-1,7c numunesi

Bütün numunelerde olduğu gibi A1-1,7c numunesine de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. Bu çarpma deneyleri, numunede göçme yaratana kadar devam ettirilmiştir. A1-1,7c numunesi 5. düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



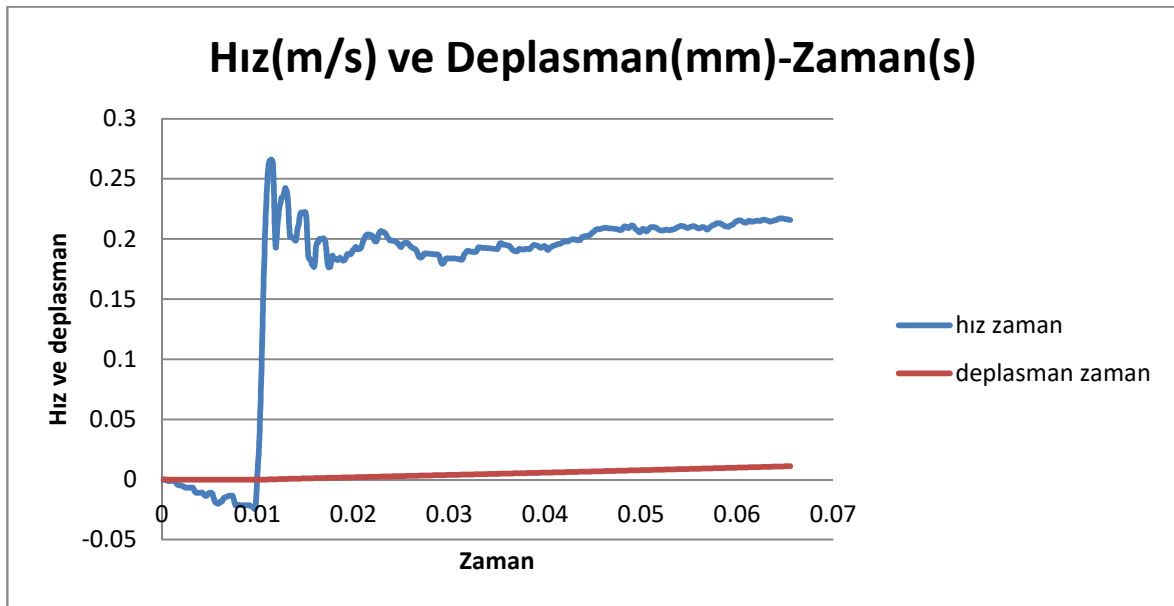
Şekil 9.62. A1-1,7c numunesinde yapılan düşümlere ait kuvvet-zaman grafikleri

Uygulanan kuvvetlerden, minimum ilk düşümde 6,25 kN gerçekleşmiş maksimum kuvvet 4. düşümde 8,26 kN gerçekleşmiş ancak, genelde uygulanan maksimum kuvvetlere en yakın 5. düşümde 7,93 kN kuvvet alarak numune kırılmıştır. Bu yüzden, kayda değer en büyük ivme kırılmaya neden olan son düşümde gerçekleşmiştir.



Şekil 9.63. A1-1,7c numunesinde yapılan son düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.63'te ivme zaman grafiği gösterilmiştir. Maksimum ivmenin pik değerleri son düşümde 674,78 (g) ve -402,39 (g) olarak ölçülmüştür. Hız-zaman deplasman-zaman grafiği Şekil 9.64'teki gibidir. Görüldüğü gibi kırılma anına ve düşümlere ait veriler uyumluluk içerisindedir. Bütün düşümlerde çarpma temas hızları 0,25-0,30 m/s arasında gerçekleşmiş ancak kırılmaya söz konusu çarpma temas hızı 0,28 m/s'dir.



Şekil 9.64. A1-1,7c numunesinin 5. düşümüne ait hız ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,29$ mm gerçekleştiği görülür.

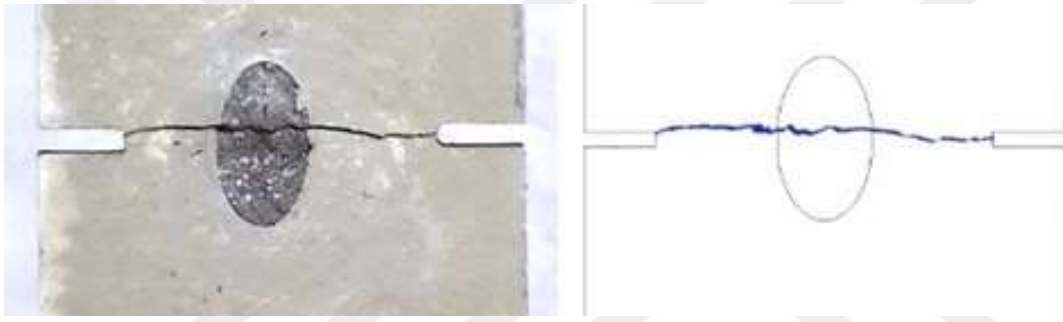
A1-1,7c numunesi için hesaplanan enerjiler,

$$\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (9.21)$$

$$\Sigma E = 60 + 124,72 + 128,71 + 133,85 + 143,3 \quad (9.22)$$

$$\Sigma E = 590,58 \text{ joule} \quad (9.23)$$

Eş.9.23’de görüldüğü gibi A1-1,7c numunesinin toplam kırılma tokluğu 590,58 joule’dür.

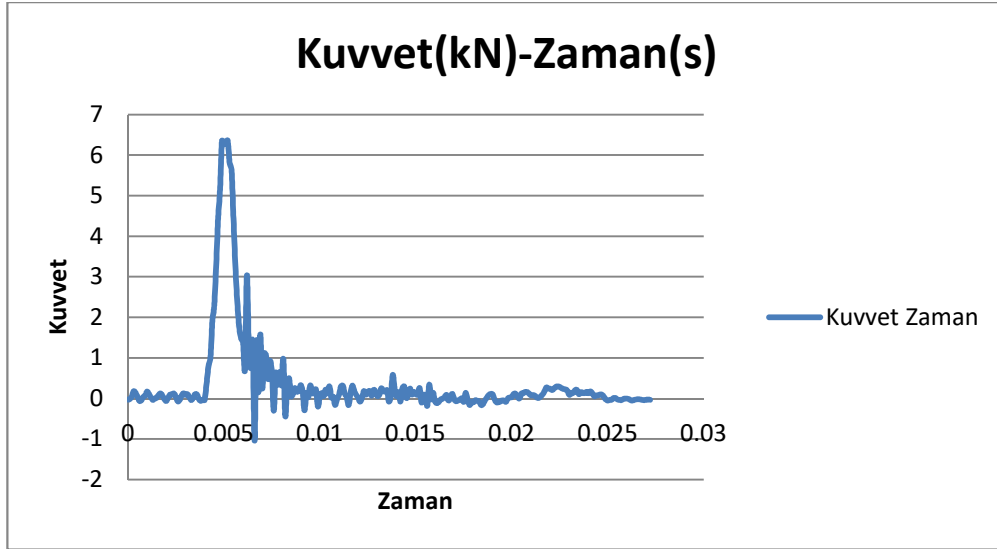


Resim 9.19. A1-1,7c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.19’da görüldüğü gibi 5. düşümde A1-1,7c numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün altından ve son çentik kökünün ortasından çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. A1-1,5c numunesine göre düşüm sayısında kayda değer bir azalma gözlenmektedir. 90°’lik açıya sahip andezit agrega çatlak açılmasını yavaşlatsa da andezit boyutunun artması düşü sayısını arttırmıştır. Numune boyutu arttıkça çarpma dayanımındaki iyileşme etkisi azalmaktadır. Ayrıca, kırılma çatlakları betona göre daha düşük dayanıma sahip andezitin içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

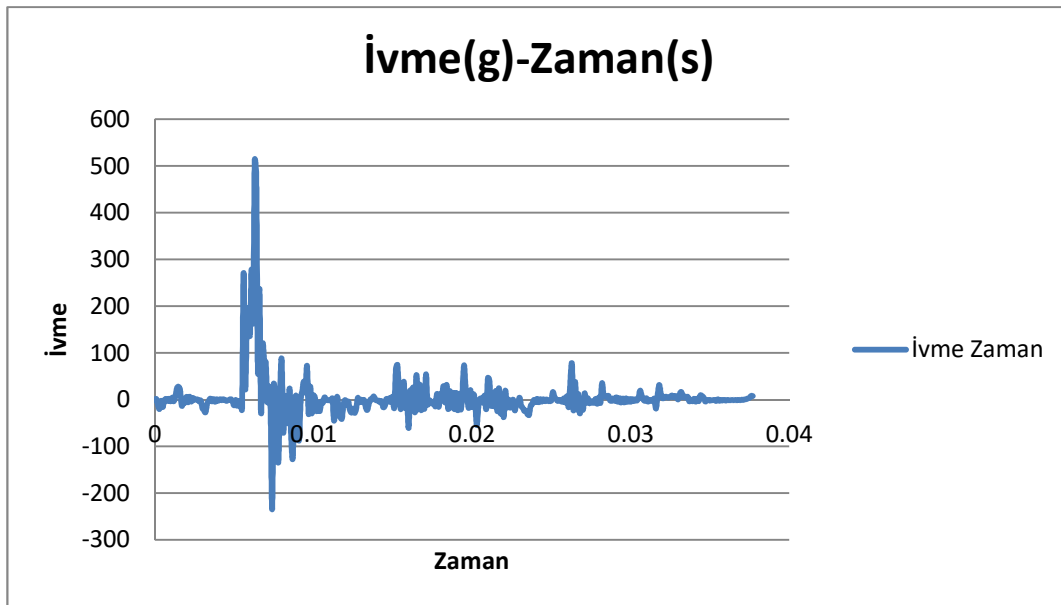
K1-1,7c numunesi

K1-1,7c numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-1,7c numunesi K1-1,5c numunesinde olduğu gibi ilk düşümde kırılmıştır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



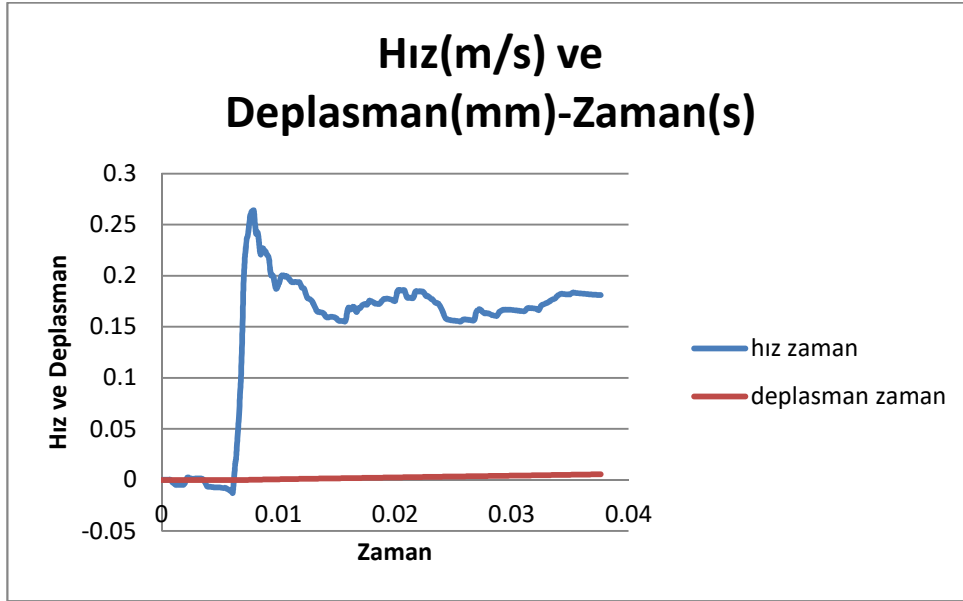
Şekil 9.65. K1-1,7c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 6,35 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



Şekil 9.66. K1-1,7c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.66'da ilk düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 511,86 (g) ve -234,00 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.67'deki gibidir. Burada, numunenin tek seferde kırılmasının nedeninin kireç taşı bulunan numunelerin tamamı ve özellikle K1-1,5c düşünüldüğünde ve bütünsel davranışlar göz önüne alındığında, kireç taşının düşük dayanımından ötürü çarpma dayanımına az katkıda bulunduğudır. Çarpma temas hızı 0,26 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.67. K1-1,7c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,25$ mm olduğu görülür. K1-1,7c numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=102,5$ joule olarak hesaplanmıştır.

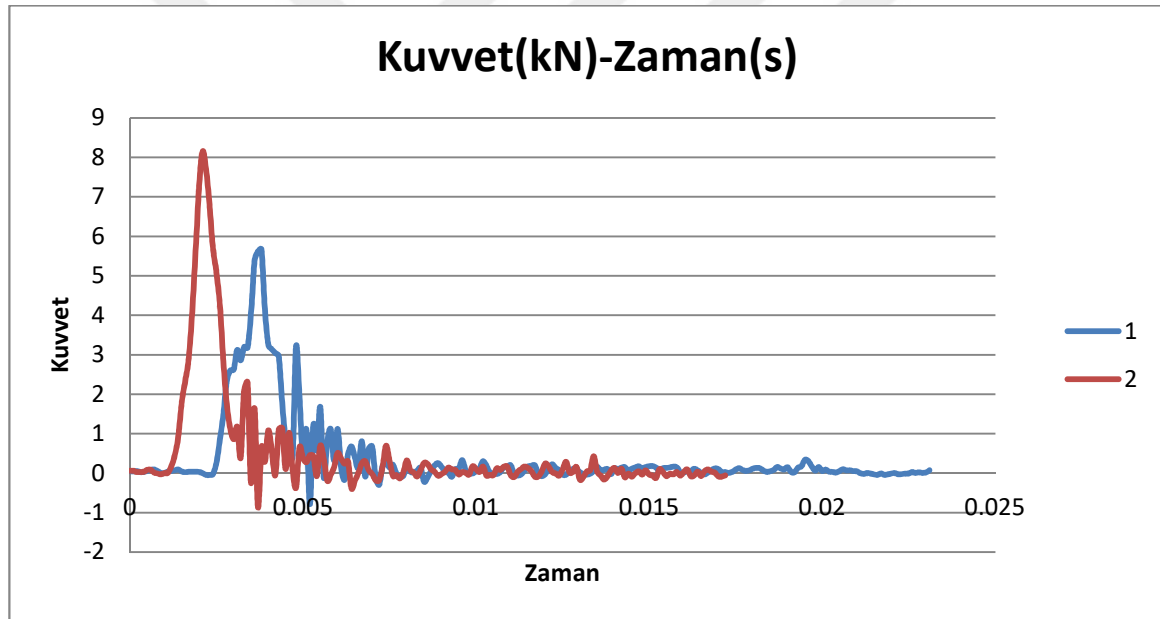


Resim 9.20. K1-1,7c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.20’de görüldüğü gibi ilk düşümde K1-1,7c numunesinde çatlak yörüngesi beton ve kireç taşı agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün alt ucundan başlayarak son çentik kökünün yine alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. Çatlaklar, çarpma etkisi altında betona göre daha düşük dayanıma sahip kireç taşının içerisinde geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

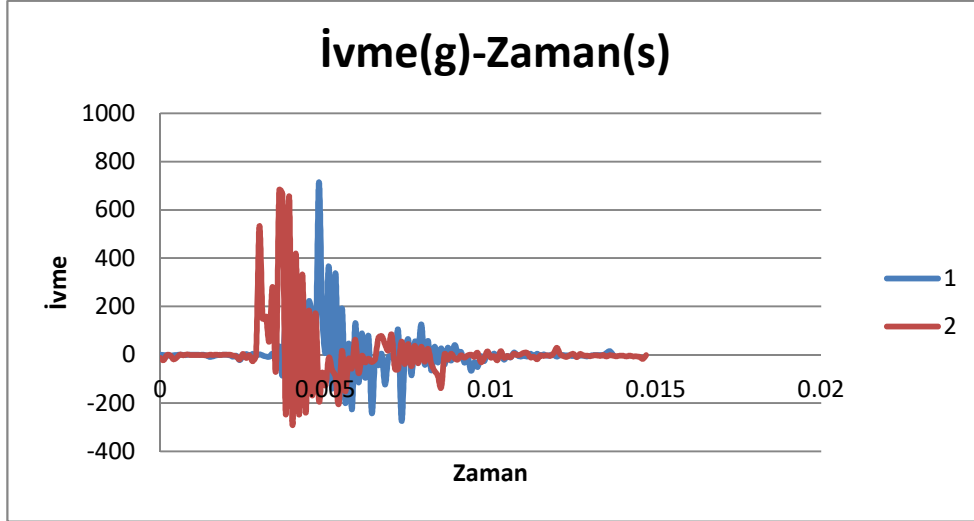
B1-1,7c numunesi

B1-1,7c numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. B1-1,7c numunesi ikinci düşümde kırılmıştır. B1-1,5c numunesine göre düşüm sayısında belirgin farklılık yoktur. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



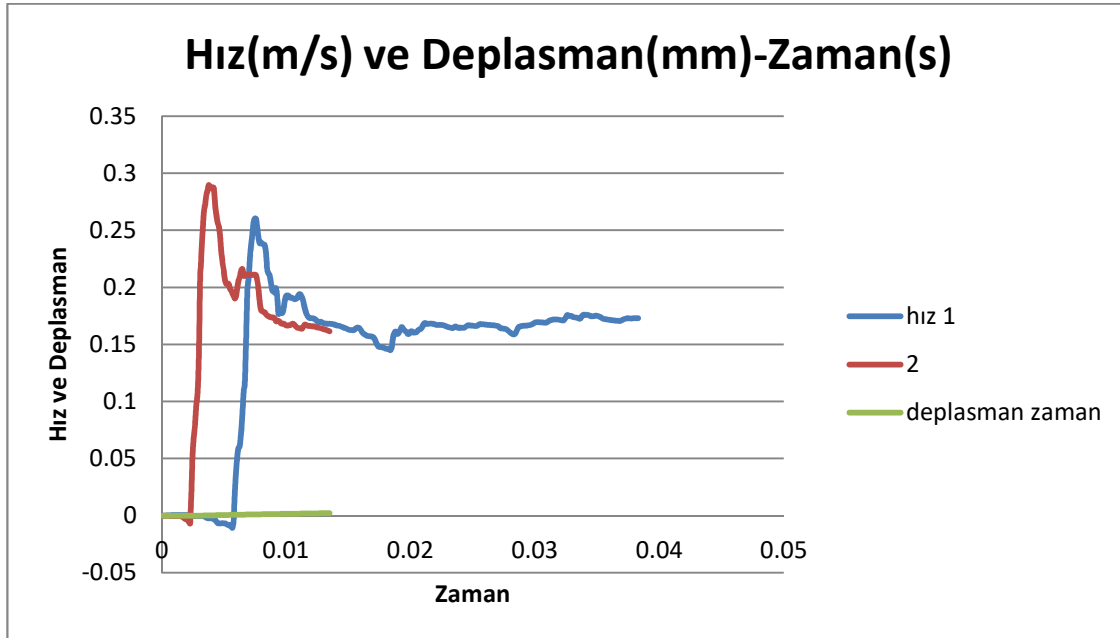
Şekil 9.68. B1-1,7c numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 5,67 kN olarak gerçekleşmiştir ve ikinci düşümde numune 8,15 kN olarak kırılmıştır.



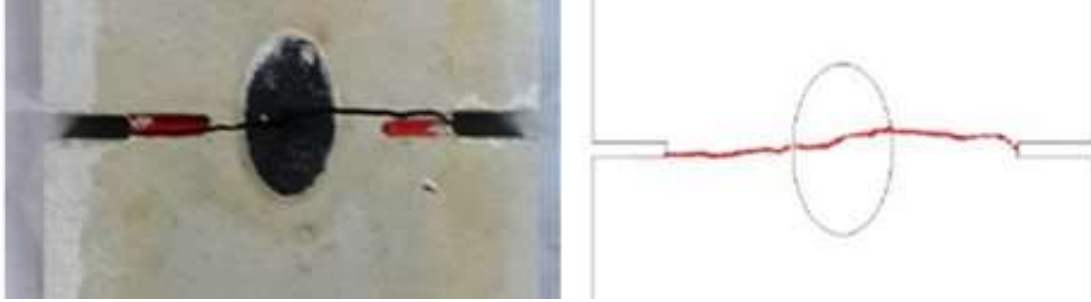
Şekil 9.69. B1-1,7c numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.69'da yapılan iki düşüme de ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 713,85 (g) ve -273,67 (g) olarak, ikinci düşümde ise 681,57 (g) ve -289,57 (g) olarak ölçülmüş ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.70'teki gibidir. Çarpma temas hızı ikinci düşüm için 0,29 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.70. B1-1,7c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,25$ mm olduğu görülür. B1-1,7c numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=97,64+120,27=217,92$ joule olarak hesaplanmıştır.

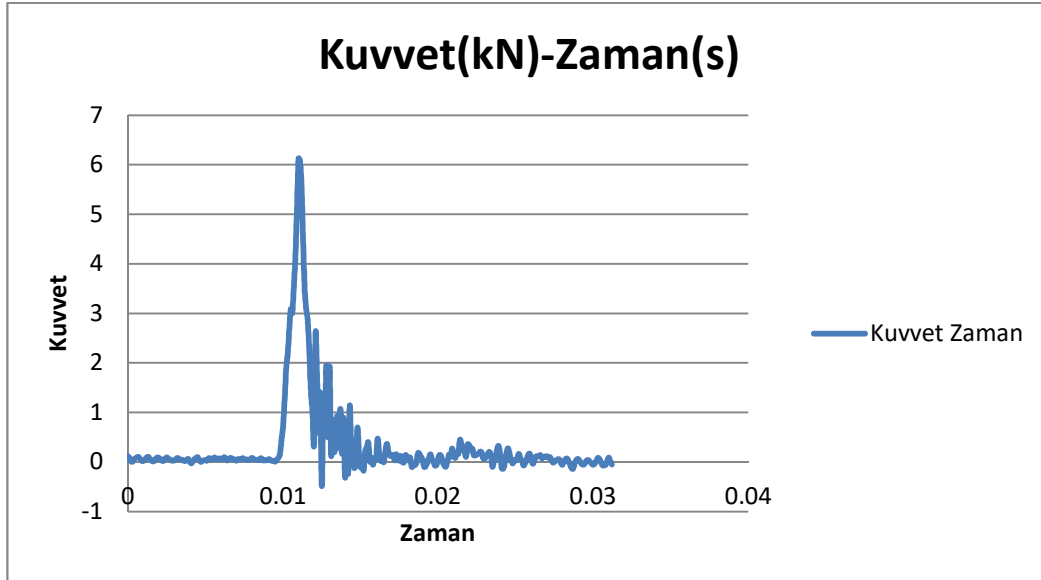


Resim 9.21. B1-1,7c Numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çentik yörüngesi

Resim 9.21’de görüldüğü gibi ilk düşümde B1-1,7c numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün alt ucundan başlayarak son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyip kırılmaya yol açmıştır. 90°’lik açıyla yerleştirilmiş bazalt agregası ve beton ara yüzeyinden ilerlemek yerine çatlak, doğrudan doğruya agreganın içinden geçerek karşı çentiğe ulaşmıştır böylece çarpma etkisi altında minimum enerji gerektiren çatlak ilerleme yolunun agregası içerisinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Böylece, bu boyutlarda agregalarda, andezit agregasının 90°’lik açılarda bazalttan daha iyi performans gösterdiği, ancak bazalt agregasının 45°’lik açıda çarpma dayanımında kayda değer bir iyileşme gösterdiği ortaya çıkmıştır.

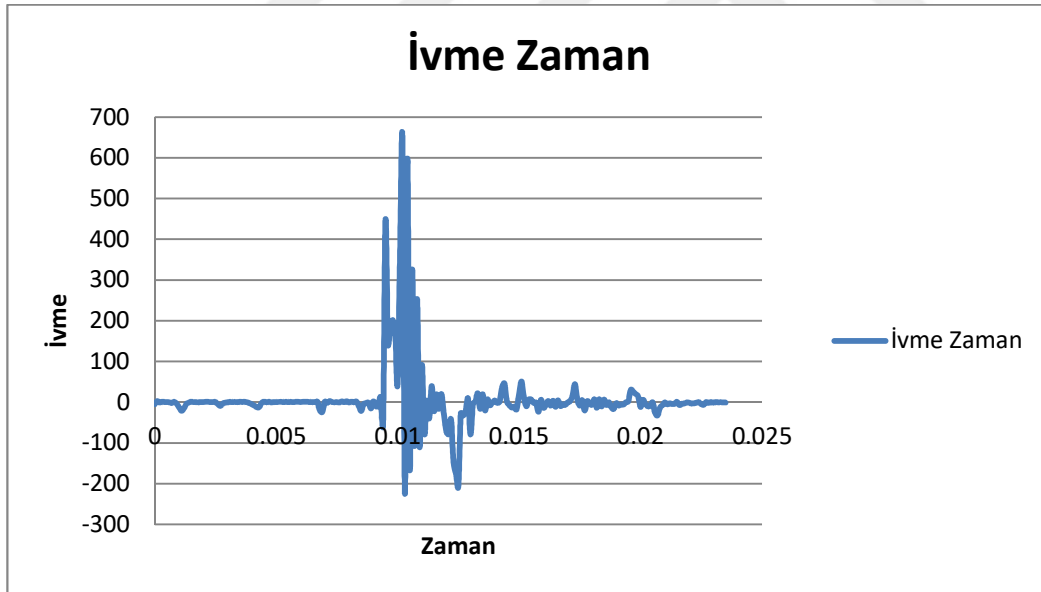
A1-2a numunesi

A1-2a numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. A1-2a numunesi ilk düşümde kırılmıştır. Bu deneye ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



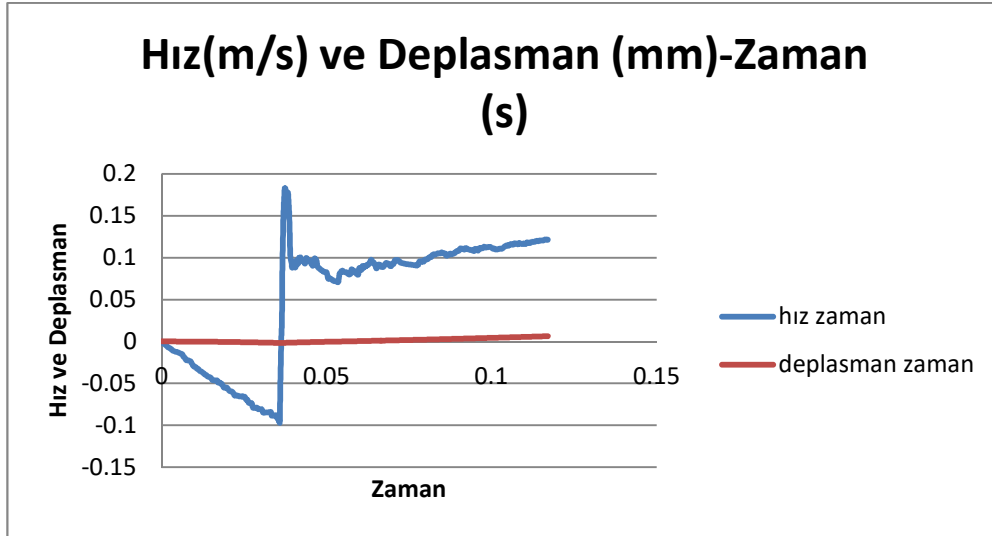
Şekil 9.71. A1-2a numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 6,12 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



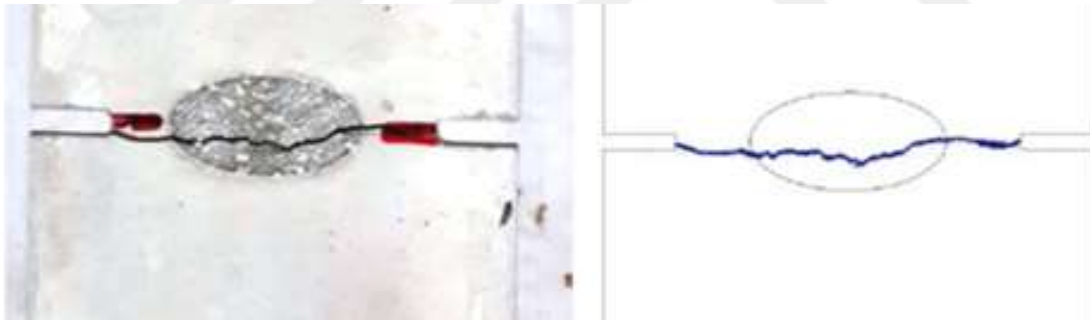
Şekil 9.72. A1-2a numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.72’de ilk düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 641,56 (g) ve -225,20 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.73’teki gibidir. Çarpma temas hızı 0,18 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.73. A1-2a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,23$ mm olduğu okunmuştur. A1-1,2a numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=61$ joule olarak hesaplanmıştır.

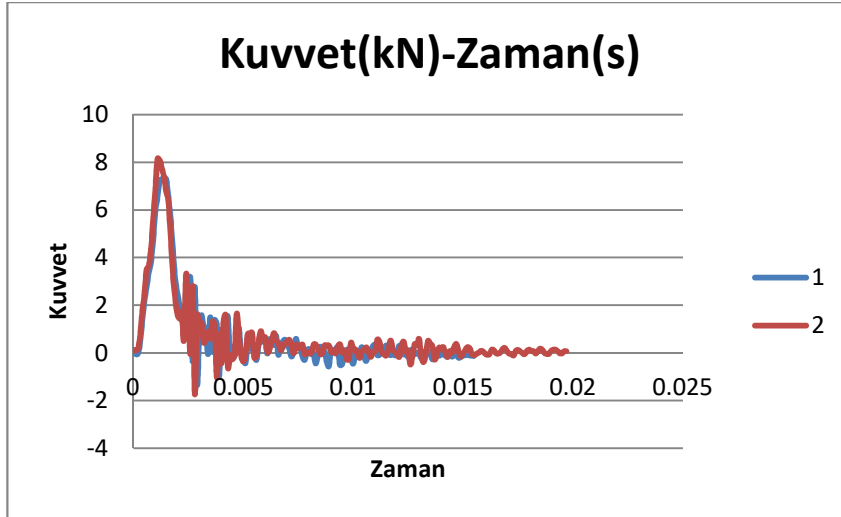


Resim 9.22. A1-2a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.22’de görüldüğü gibi ilk düşümde A1-2a numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün alt ucundan başlayarak son çentik kökünün yine ortasından çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. Andezit içerisinde ilerleyen çatlaklarda sık dalgalanmalar görülmüştür. 0° ’lik açılarda andezit agreganın boyutu fark etmeksizin düşüm sayısı küçük kalmıştır. Çatlaklar, çarpma etkisi altında betona göre daha düşük dayanıma sahip andezitin içerisinde geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

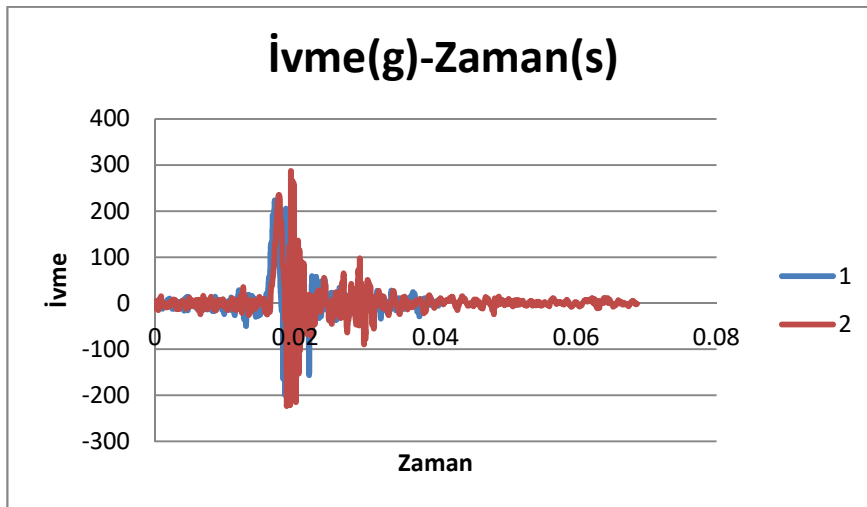
K1-2a D9b numunesi

K1-2a numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-2a numunesi ikinci düşümde kırılmıştır. Diğer (a) kodlu kireç taşı barındıran numunelere göre düşüm sayısında bir farklılık yoktur. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



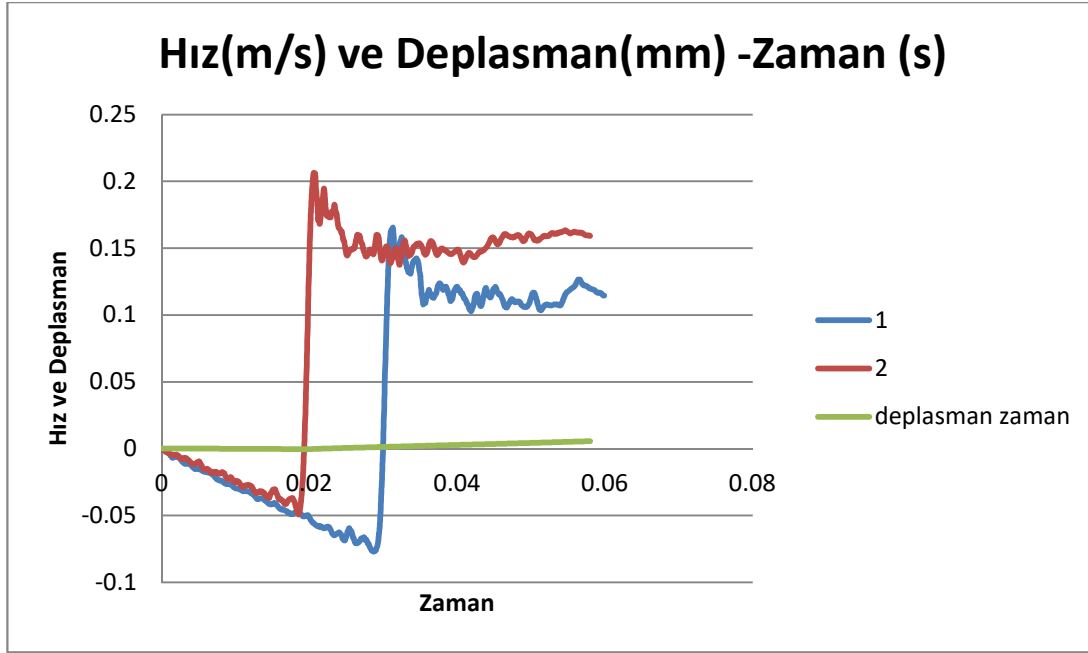
Şekil 9.74. K1-2a D9b numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 7,06 kN olarak gerçekleşmiştir ve ikinci düşümde numune 8,16 kN olarak kırılmıştır. Bu grafiklerden bazıları temas anının şiddetine ve veri elde edilen programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.



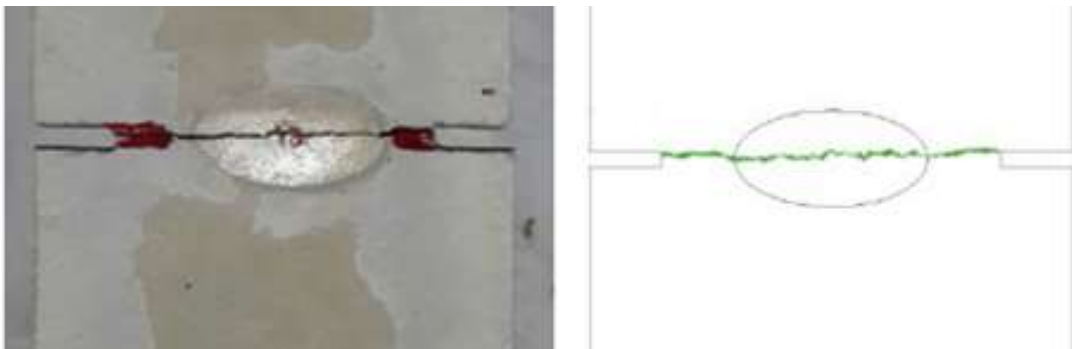
Şekil 9.75. K1-2a D9b numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.75’de yapılan iki düşüme de ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 255,18 (g) ve -267,45 (g) olarak, ikinci düşümde ise 273,49 (g) ve -301,18 (g) olarak ölçülmüş ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.76’daki gibidir. Çarpma temas hızı ikinci düşüm için 0,21 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.76. K1-2a D9b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

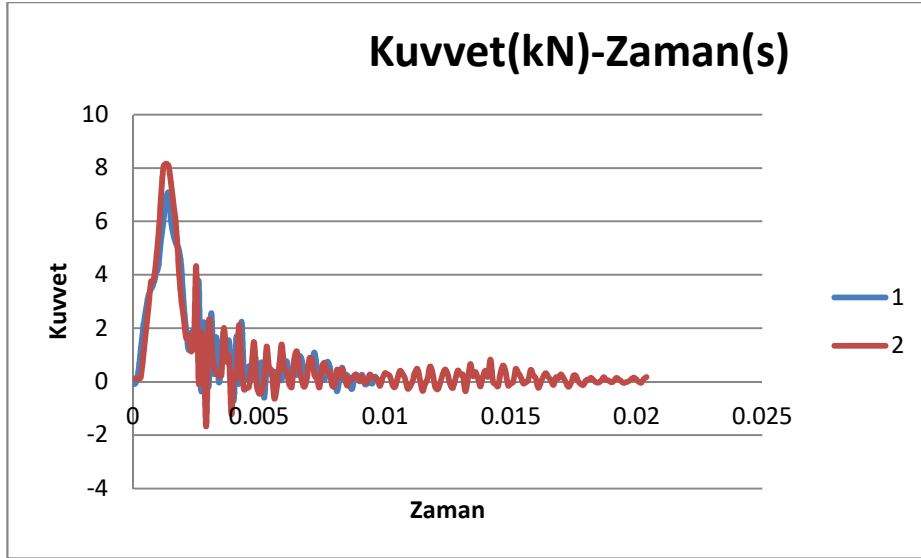
Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,24$ mm olduğu görülür. K1-2a D9b numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=50,53+92,4=142,93$ joule olarak hesaplanmıştır.



Resim 9.23. K1-2a D9b numunesinin kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

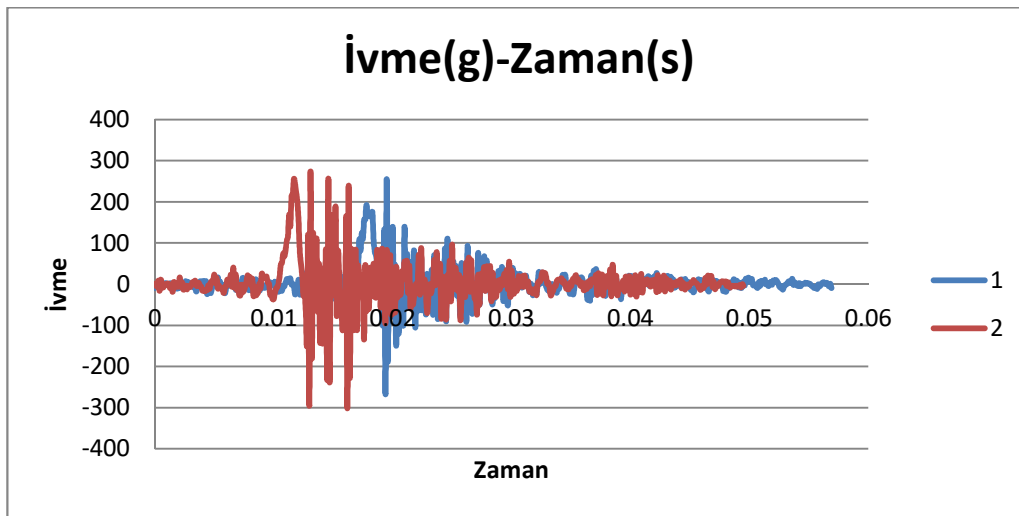
K1-2a D9c numunesi

K1-2a numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-2a numunesi ikinci düşümde kırılmıştır. Diğer (a) kodlu kireç taşı barındıran numunelere göre düşüm sayısında bir farklılık yoktur. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



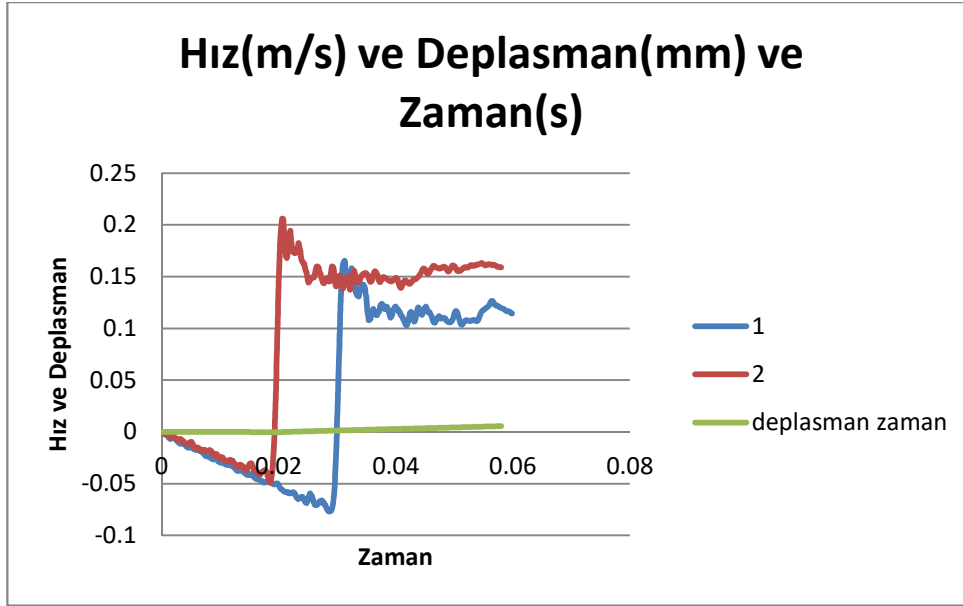
Şekil 9.77. K1-2a D9c numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 7,36 kN olarak gerçekleşmiştir ve ikinci düşümde numune 8,15 kN olarak kırılmıştır. Bu grafiklerden bazıları temas anının şiddetine ve veri elde edilen programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.



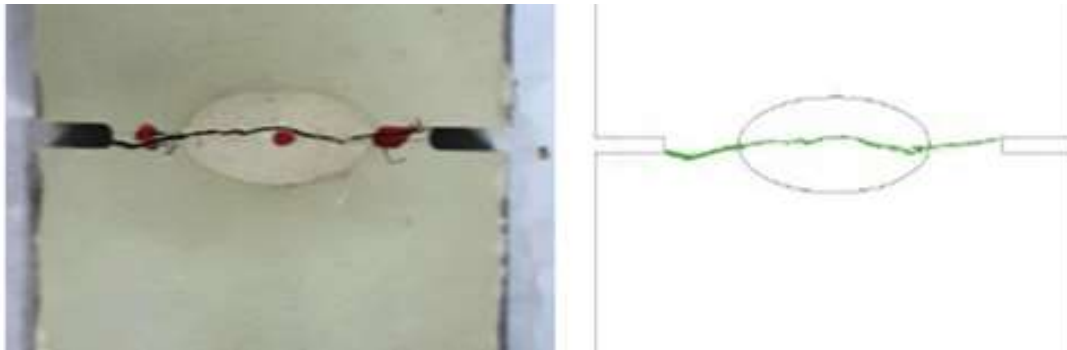
Şekil 9.78. K1-2a D9c numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.78’de yapılan iki düşüme de ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 223,35 (g) ve -197,79 (g) olarak, ikinci düşümde ise 286,69 (g) ve -223,07 (g) olarak ölçülmüş ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.79’daki gibidir. Çarpma temas hızı ikinci düşüm için 0,20 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.79. K1-2a D9c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,25$ mm olduğu görülür. K1-2a D9c numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=42,3+120,7=163$ joule olarak hesaplanmıştır.

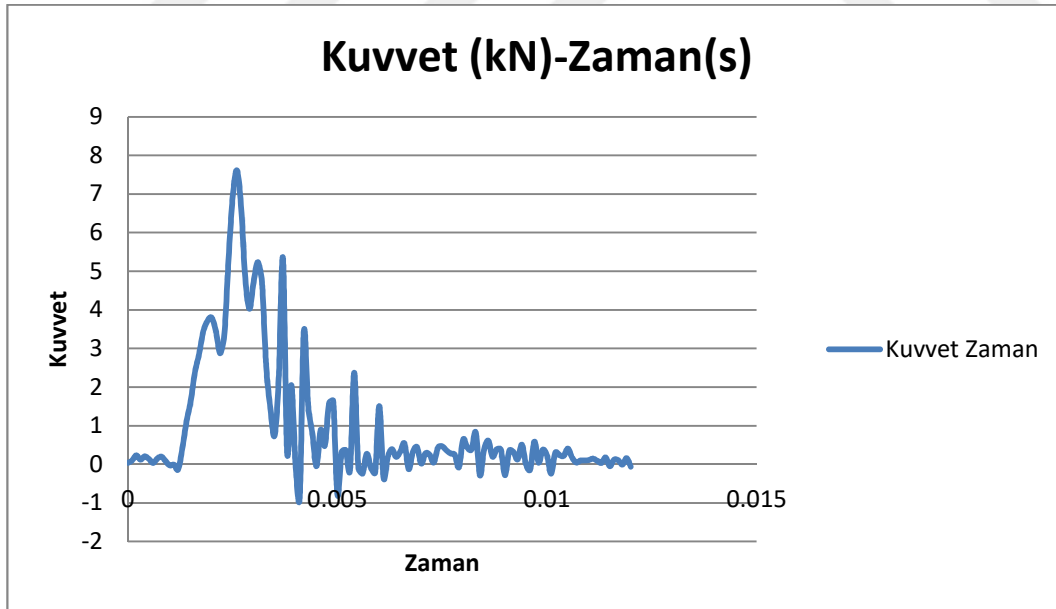


Resim 9.24. K1-2a D9c numunesinin kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

K1-2a D9b numunesi döküldükten sonra K1-2a D9c numunesi de hazırlanmıştır. Daha sonra küp numune basınç dayanımlarının ortalama olarak birbirine yakın olduğu öğrenilmiştir. Ancak, her iki numune de çarpma deneyleri tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler, birbirinden çok büyük sapmalar veya farklılıklar göstermemiş neredeyse aynı sonuçlar bulunmuştur. Resim 9.23 ve Resim 9.24'teki çatlak yörüngelerine göz atıldığında, çatlaklar betona göre dayanımı düşük kireç taşının içerisinde ilerleyerek karşı çentiğe ulaşmışlardır. Buradaki, çatlak yörüngelerinde ufak değişimler olduğu göz önüne alınsa da bu değişimlerin her beton numunenin heterojenliğinden ve agreganın kristalin yapısındaki öz farklılıklardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Böylece, bu numune üzerinden elde edilen veriler ışığında deneylerin aynı cihazda yüksek güvenilirlik ve doğrulukla tekrarlanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

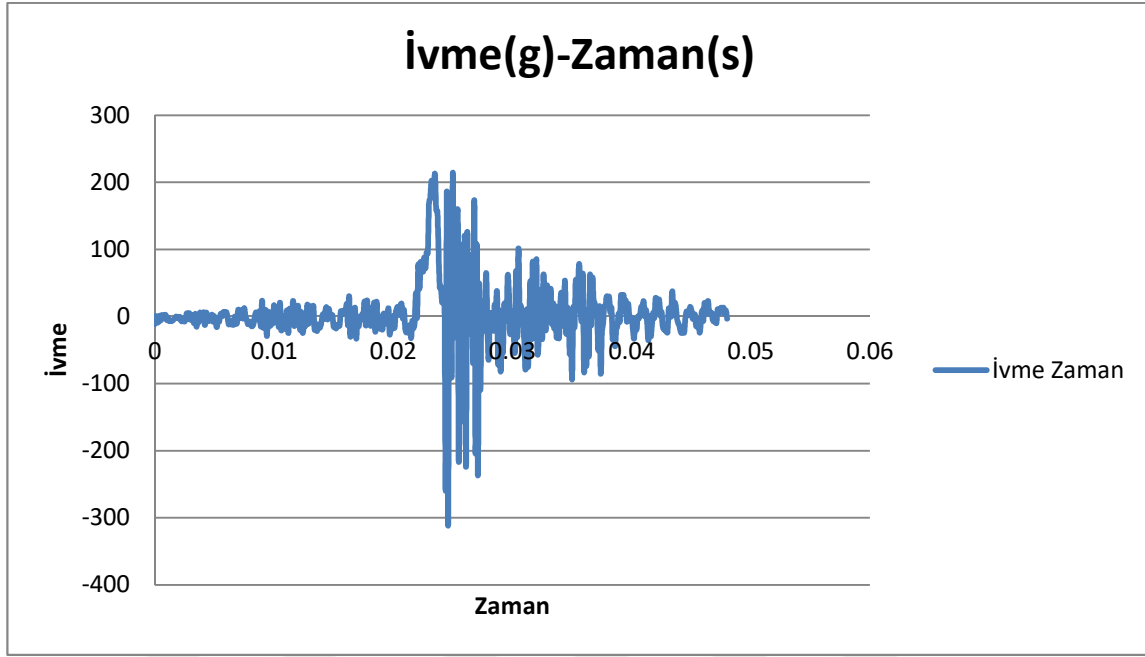
B1-2a numunesi

B1-2a numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. B1-2a numunesi ilk düşümde kırılmıştır. Bu deneye ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



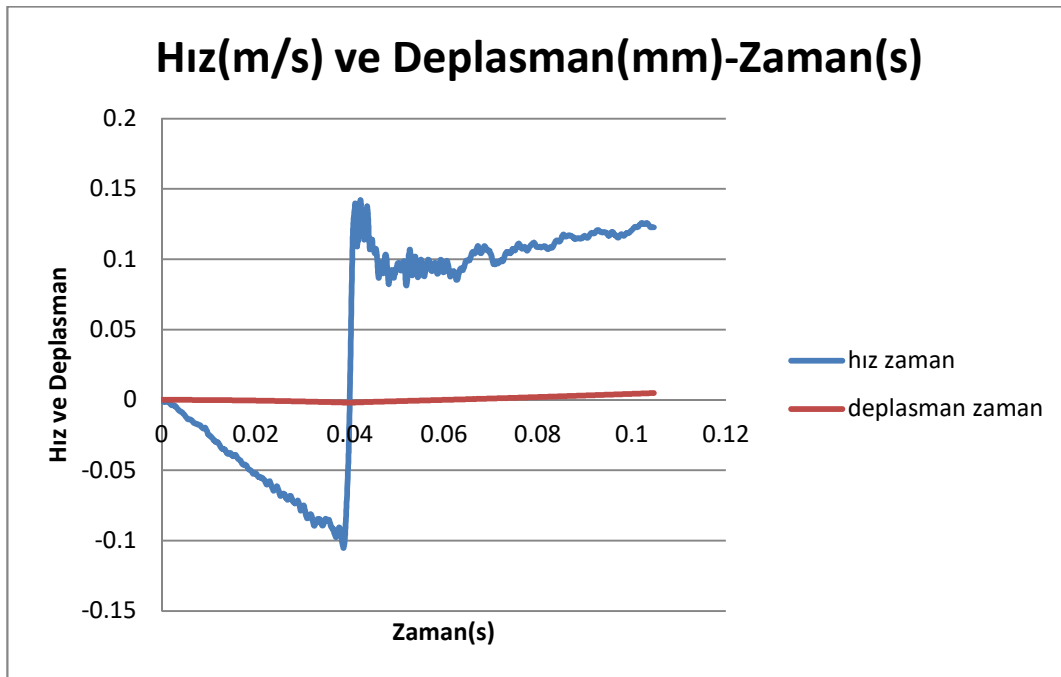
Şekil 9.80. B1-2a numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 7,61 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



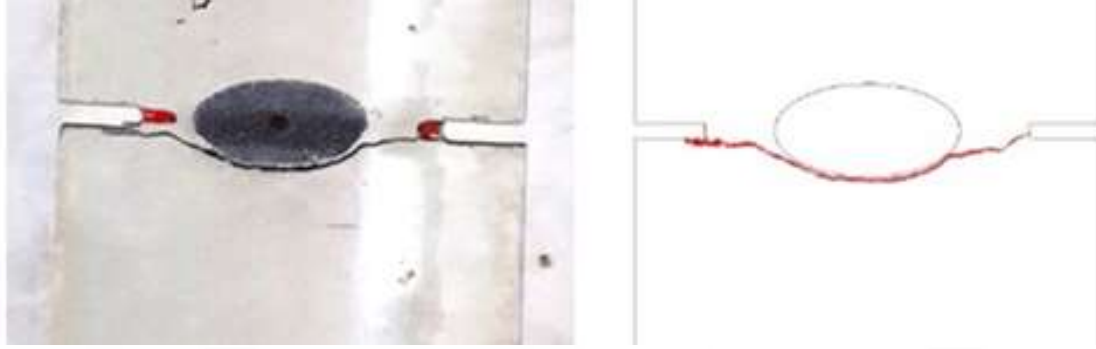
Şekil 9.81. B1-2a numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.81’de ilk düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 214,25 (g) ve -311,51 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.82’deki gibidir. Çarpma temas hızı 0,14 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.82. B1-2a numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,16$ mm olduğu okunmuştur. B1-1,2a numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=58,4$ joule olarak hesaplanmıştır.

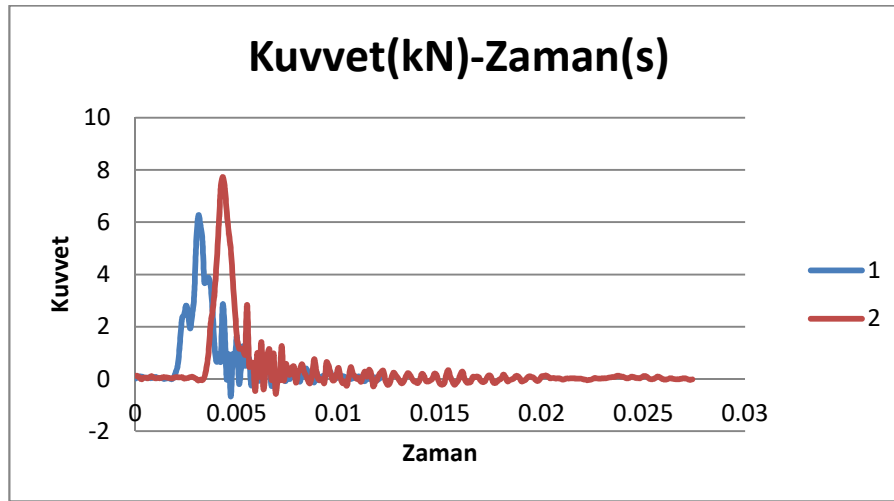


Resim 9.25. B1-2a numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.25'te görüldüğü gibi B1-2a numunesinde uygulanan tek düşümlük çarpma etkisi sonucunda gelişen çatlaklar ilk çentik kökünün alt ucundan başlayarak bazalt agregaya doğru ilerlemiş ve diğer (a) kodlu bazalt taşıyan numunelerdeki aksine, bazalt agreganın geniş açılı yüzeyine ulaşarak agrega-beton ara yüzeyini takip etmiş ve bazalt agreganın etrafından sıyrılarak dar açılı yüzeyden itibaren çentik köküne doğru ilerlemeye devam etmiş ve kırılmaya yol açmıştır. Bu farklılığının sebebinin, 0° 'lik açılı bazalt agrega taşıyan numuneler içerisinde bazalt agreganın boyutunun büyümesi olarak açıklanabilir. Bazalt agreganın dayanımı beton dayanımından daha yüksek olduğundan çatlaklar yapay agrega-beton ara yüzeyindeki zayıf kesitleri takip ederek minimum enerji gerektiren yolu tercih etmişlerdir

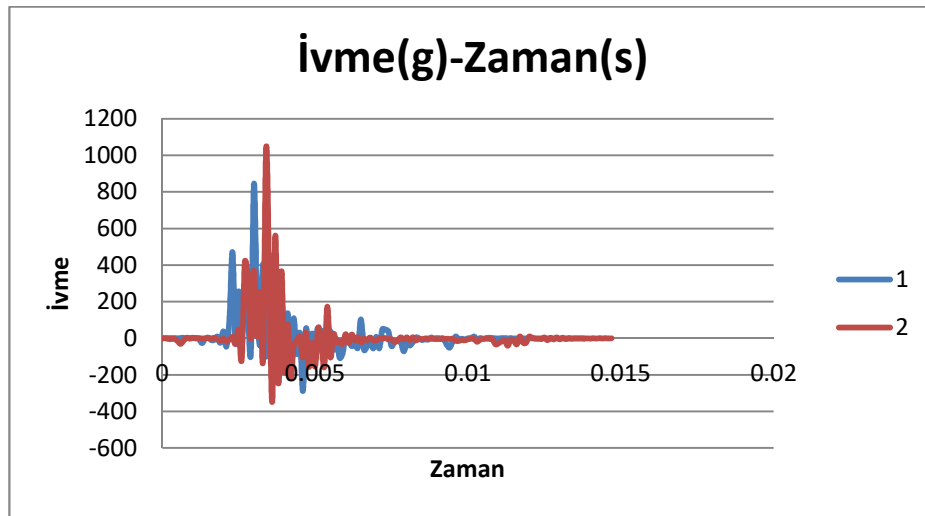
A1-2b numunesi

A1-2b numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. A1-2b numunesi ikinci düşümde kırılmıştır. Diğer (b) kodlu andezit barındıran numunelere göre düşüm sayısında belirgin bir farklılık yoktur. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



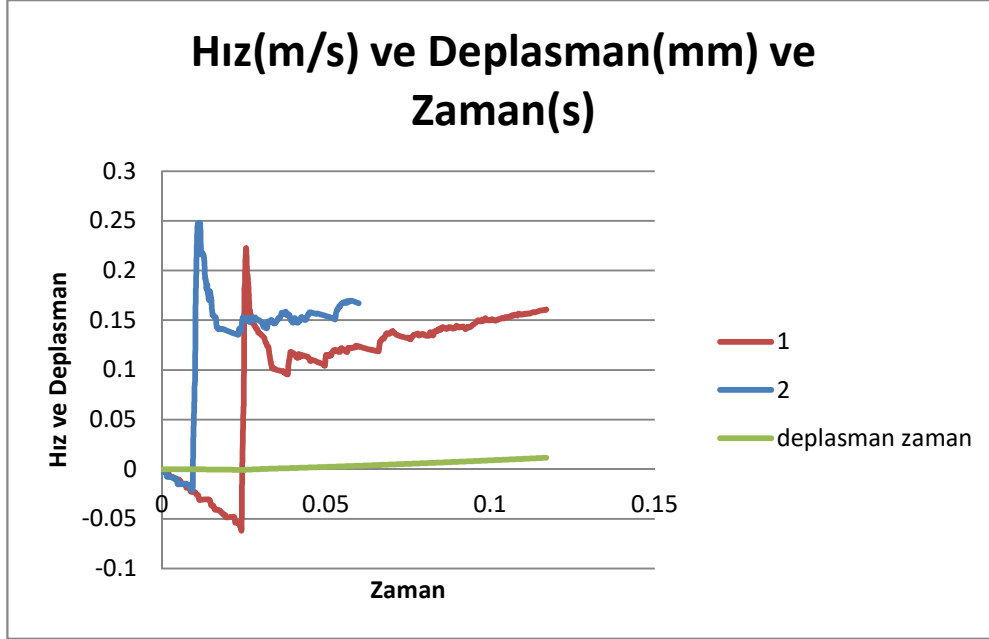
Şekil 9.83. A1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 6,25 kN olarak gerçekleşmiştir ve ikinci düşümde numune 7,73 kN olarak kırılmıştır. Bu grafikler temas anının şiddetine ve veri elde edilen programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.



Şekil 9.84. A1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği

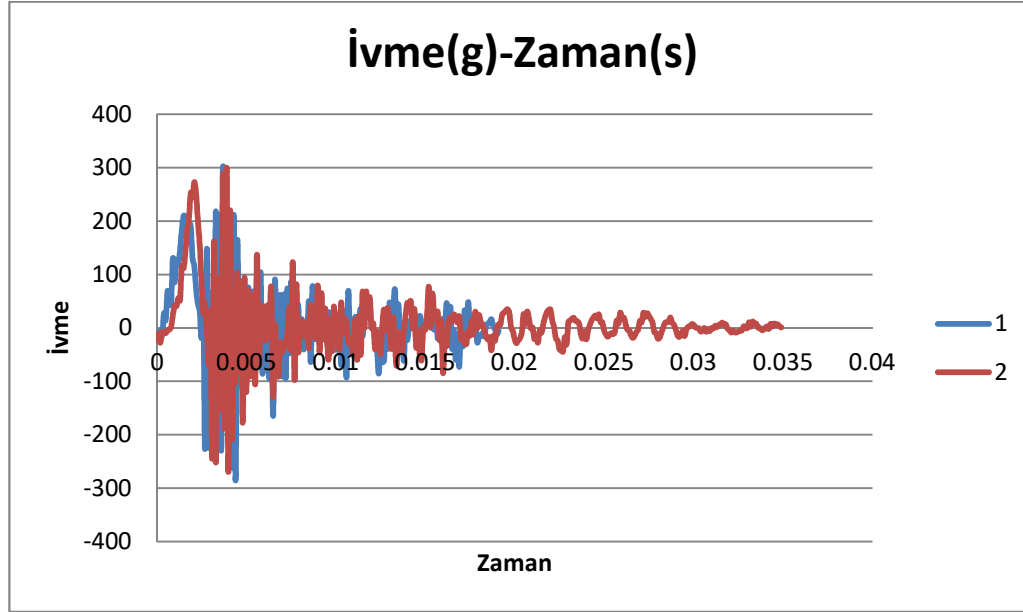
Şekil 9.84'te yapılan iki düşüme de ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 843,17 (g) ve -289,69 (g) olarak, ikinci düşümde ise 1042,36 (g) ve -346,28 (g) olarak ölçülmüş ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve ikinci düşüme ait deplasman-zaman grafiği Şekil 9.85'teki gibidir. Çarpma temas hızı ikinci düşüm için 0,26 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.85. A1-2b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

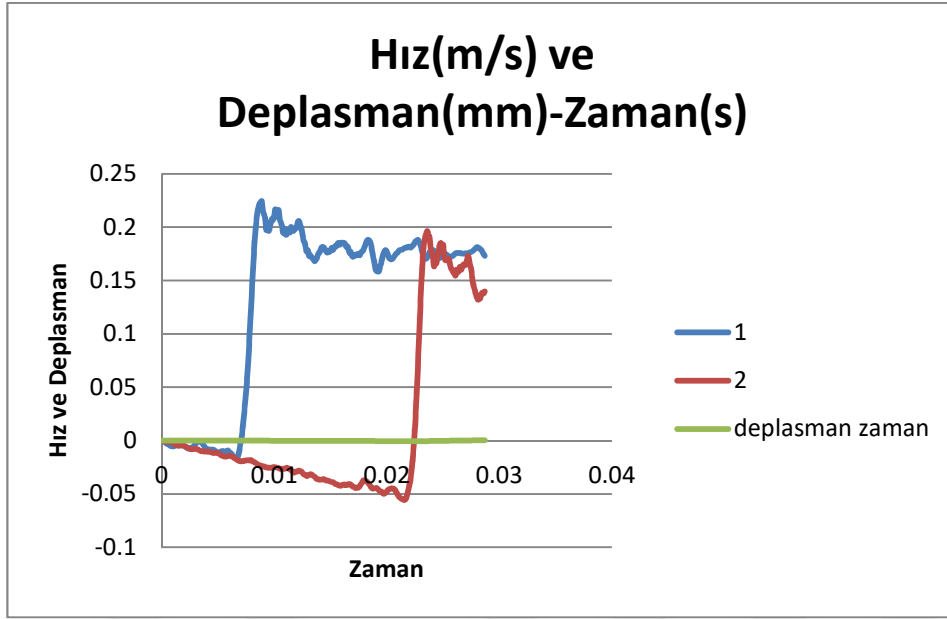
İkinci düşümde, temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,21$ mm olduğu görülür. A1-2b numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=48,72+62,1=110,82$ joule olarak hesaplanmıştır.

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 7,45 kN olarak gerçekleşmiştir ve ikinci düşümde numune 8,93 kN olarak kırılmıştır. Bu grafikler temas anının şiddetine ve veri elde edilen programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.



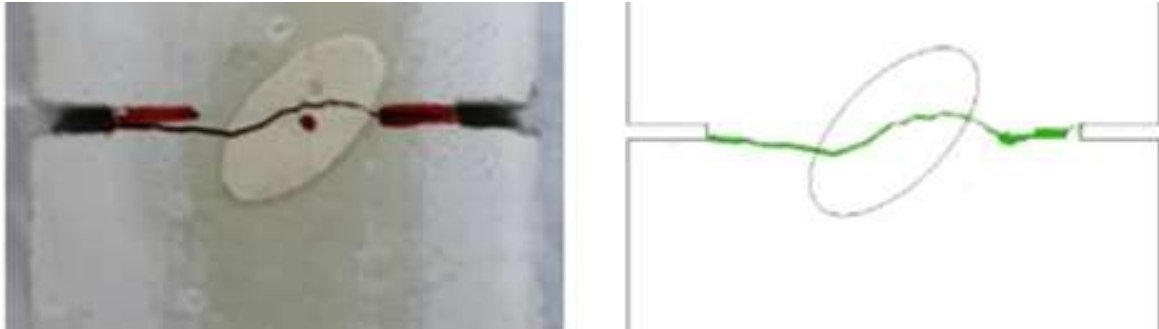
Şekil 9.87. K1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.87’de yapılan iki düşüme de ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 302,34 (g) ve -285,59 (g) olarak, ikinci düşümde ise 299,80 (g) ve -269,00 (g) olarak ölçülmüş ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve ikinci düşüme ait deplasman-zaman grafiği Şekil 9.88’deki gibidir. Çarpma temas hızı ikinci düşüm için 0,20 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.88. K1-2b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

İkinci düşümde, temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,57$ mm olduğu görülür. K1-2b numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=50,29+51,75=102,04$ joule olarak hesaplanmıştır.



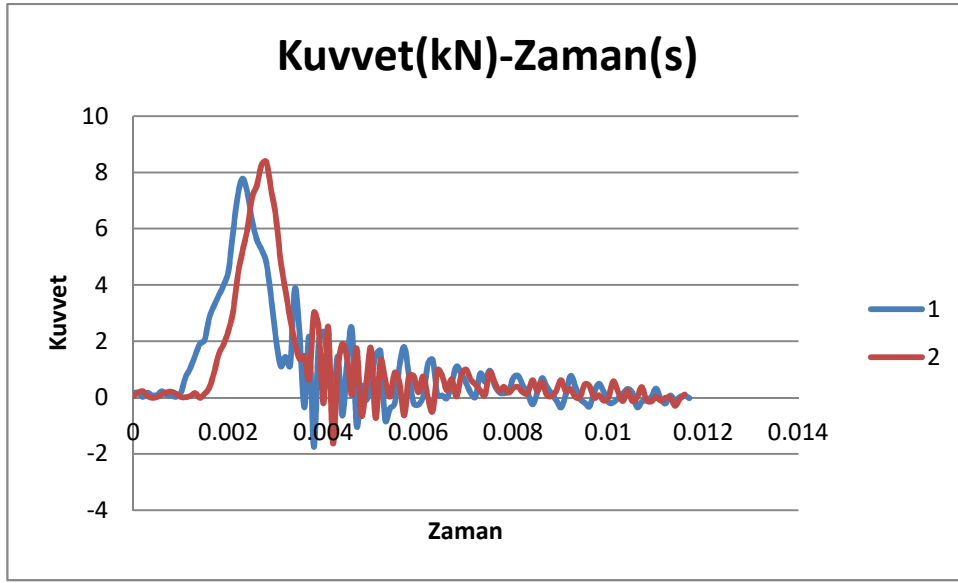
Resim 9.27. K1-2b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.27’de görüldüğü gibi ikinci düşümde K1-2b numunesinde çatlak yörüngesi beton ve kireç taşı agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün altından ve son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek eğilme tipi kırılmaya yol açmıştır. Ancak, kireç taşının içerisine ulaştığında çatlaklar 45°’lik açıyla yerleştirilmiş kireç taşıyla aynı doğrultuya yakın güzergâhla farkedilir biçimde ilerlemiş tekrar beton malzemeye geçtiğinde yeniden çentik köküne doğru yol izleyecek biçimde açı yaparak kırılmaya neden olmuştur. Ayrıca, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha

düşük dayanıma sahip kireç taşının içersinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

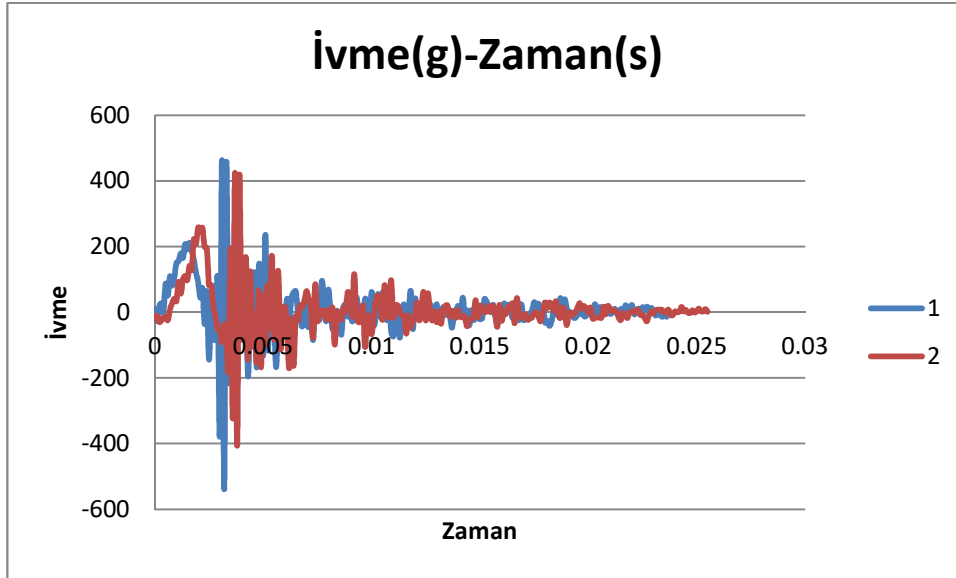
B1-2b numunesi

B1-2b numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. B1-2b numunesi ikinci düşümde kırılmıştır. Diğer (b) kodlu bazalt barındıran numunelere göre düşüm sayısında belirgin bir farklılık vardır. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



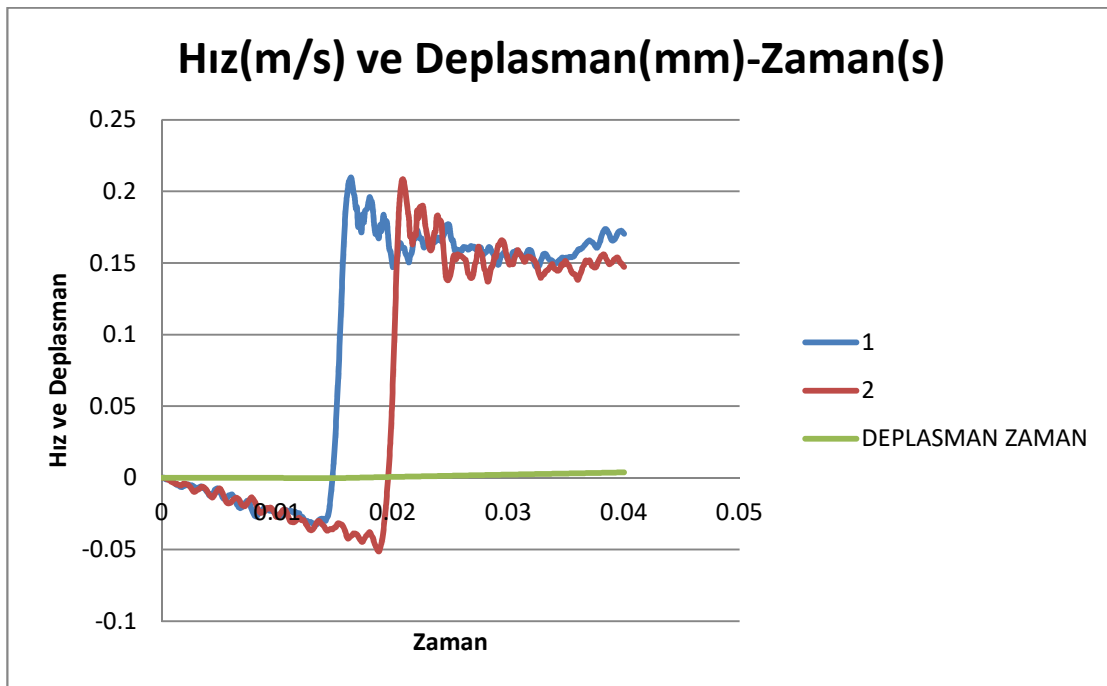
Şekil 9.89. B1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 7,77 kN olarak gerçekleşmiştir ve ikinci düşümde numune 8,37 kN olarak kırılmıştır. Bu grafikler temas anının şiddetine ve veri elde edilen programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.



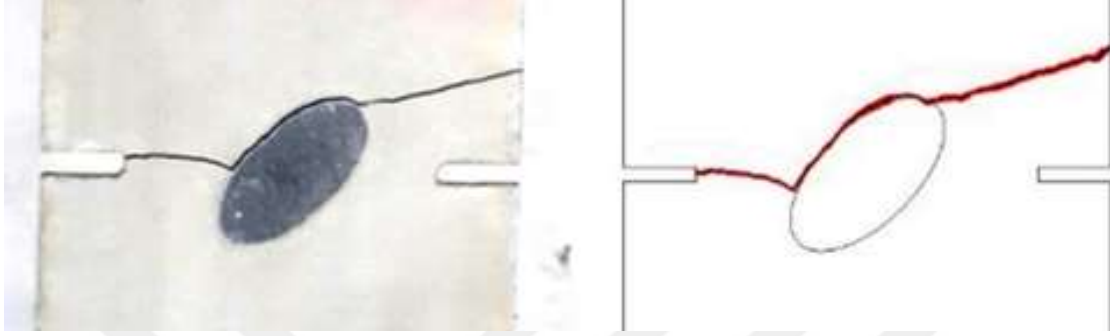
Şekil 9.90. B1-2b numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.90'da yapılan iki düşüme de ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 461,81 (g) ve -539,14 (g) olarak, ikinci düşümde ise 424,45 (g) ve -406,43 (g) olarak ölçülmüş ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve ikinci düşüme ait deplasman-zaman grafiği Şekil 9.91'deki gibidir. Çarpma temas hızı ikinci düşüm için 0,21 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.91. B1-2b numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

İkinci düşümde, temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,20$ mm olduğu görülür. K1-2b numunesinin iki düşüm sonucunda toplam kırılma tokluğu $\Sigma E=E_1+E_2=62+65,26=127,26$ joule olarak hesaplanmıştır.

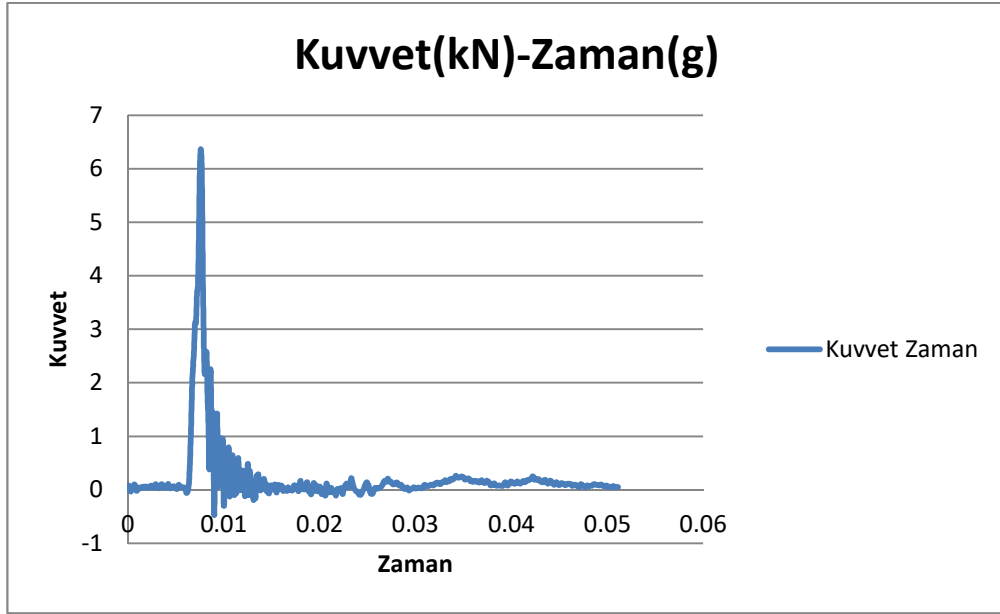


Resim 9.28. B1-2b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.28’de görüldüğü gibi 2. düşümde küçük bir düşü sayısıyla kırılan B1-2b numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın ara yüzeyinden ilerleyerek ilk çentik kökünün üst ucundan başlamış ancak bazalt agreganın dar açılı yüzeyine geldiğinde beton içerisinde zayıf kesitleri takip ederek ikinci çentiğe yönelmek yerine kenardan çıkacak biçimde yörünge izlemiş ve böylelikle kırılmaya yol açmıştır. (b) kodlu bazalt taşıyan diğer beton numunelere göre kıyaslandığında, agrega boyutundan ötürü düşü sayısının azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, çarpma etkisi altında kırılma çatlakları betona göre daha yüksek dayanıma sahip bazaltın dış yüzeyini takip ederek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

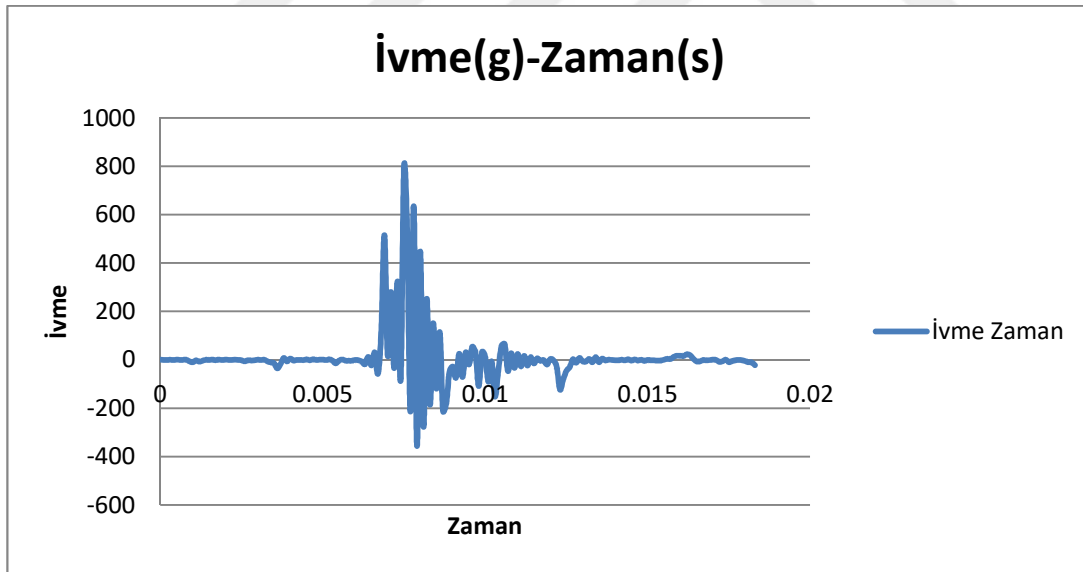
A1-2c numunesi

A1-2c numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. A1-2c numunesi ilk düşümde kırılmıştır. Bu deneye ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



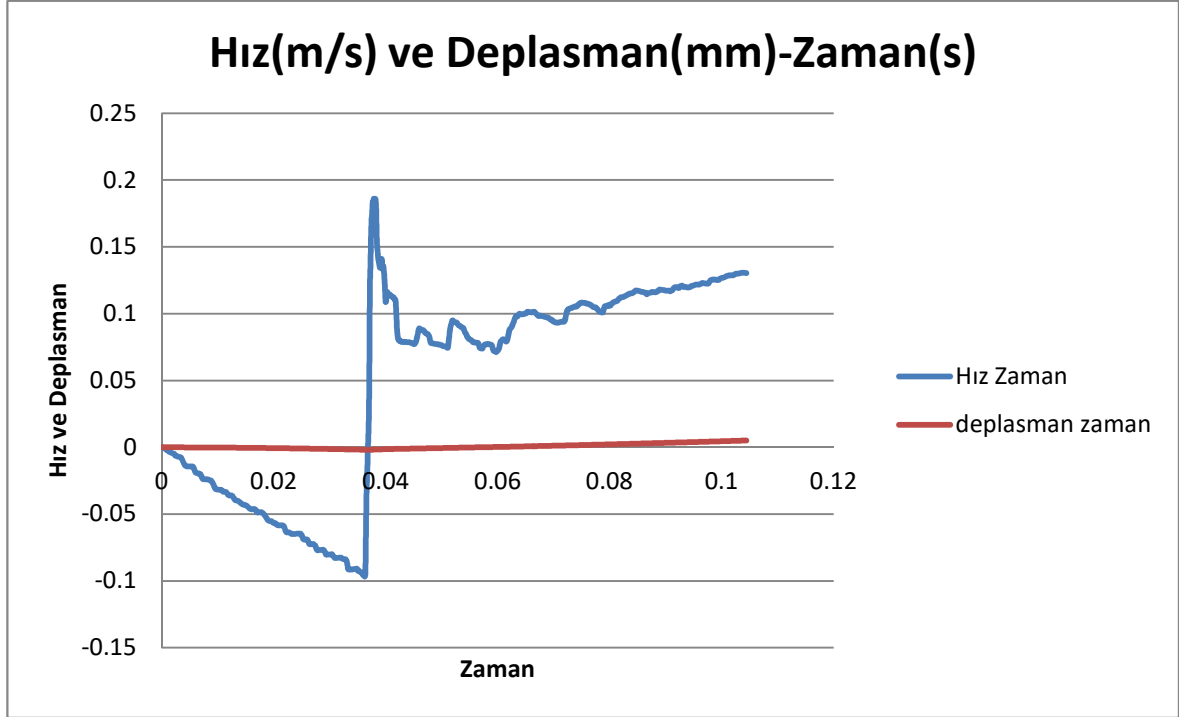
Şekil 9.92. A1-2c numunesinde yapılan tek düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 6,36 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



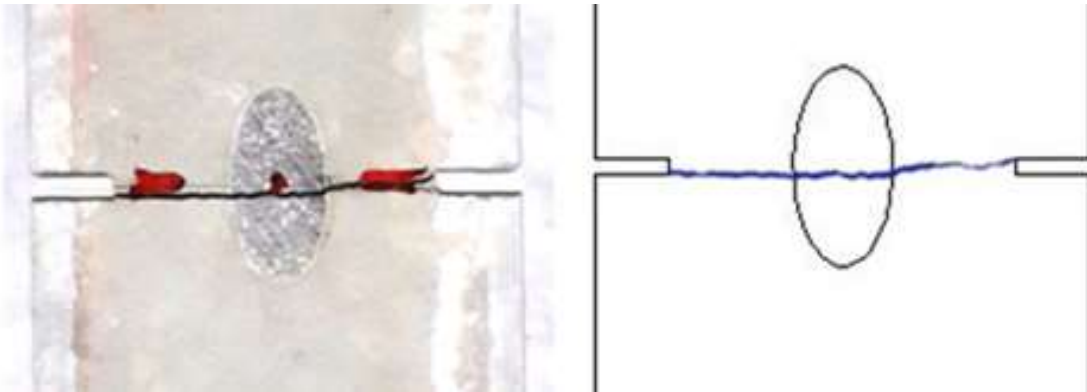
Şekil 9.93. A1-2c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.93'te ilk düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 795,22 (g) ve -355,01 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.94'teki gibidir. Çarpma temas hızı 0,19 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.94. A1-2c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,13$ mm olduğu okunmuştur. A1-1,2c numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=75,73$ joule olarak hesaplanmıştır.



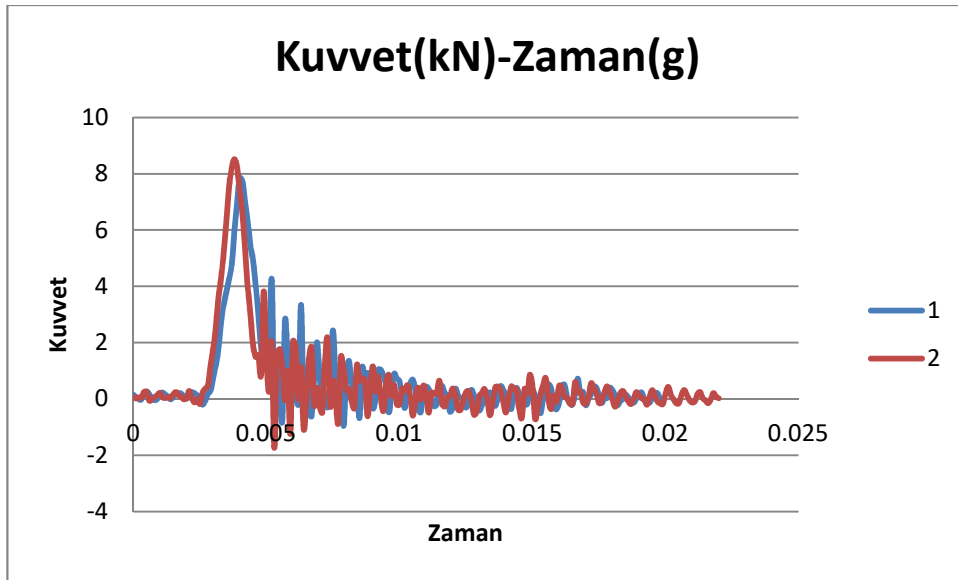
Resim 9.29. A1-2c Numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.29’da görüldüğü gibi ilk düşümde A1-2c numunesinde çatlak yörüngesi beton ve andezit agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün alt ucundan başlayarak son çentik kökünün üst ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyerek kırılmaya yol açmıştır. 90°’lik açıyla yerleştirilen andezit agregaya sahip numunelere göre düşü sayısında kayda değer bir azalma gerçekleşmiştir. Bunda, agreganın boyutlarının doğrudan etkisi vardır.

Çatlaklar, çarpma etkisi altında betona göre daha düşük dayanıma sahip kireç taşının içerisinden geçerek minimum enerji harcanacak yolu seçmiştir.

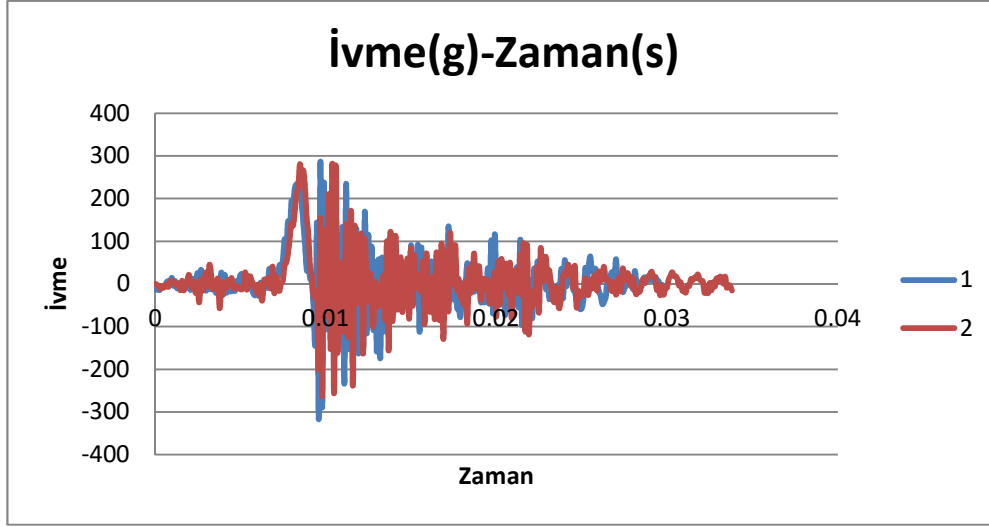
K1-2c numunesi

K1-2c numunesinde de 5,1 cm yüksekten çarpma deneyleri uygulanmıştır. K1-2c numunesi ikinci düşümde kırılmıştır. Diğer (c) kodlu bazalt barındıran numunelere göre düşüm sayısında belirgin bir farklılık yoktur. Bu deneylere ait veriler aşağıda gösterilmiştir.



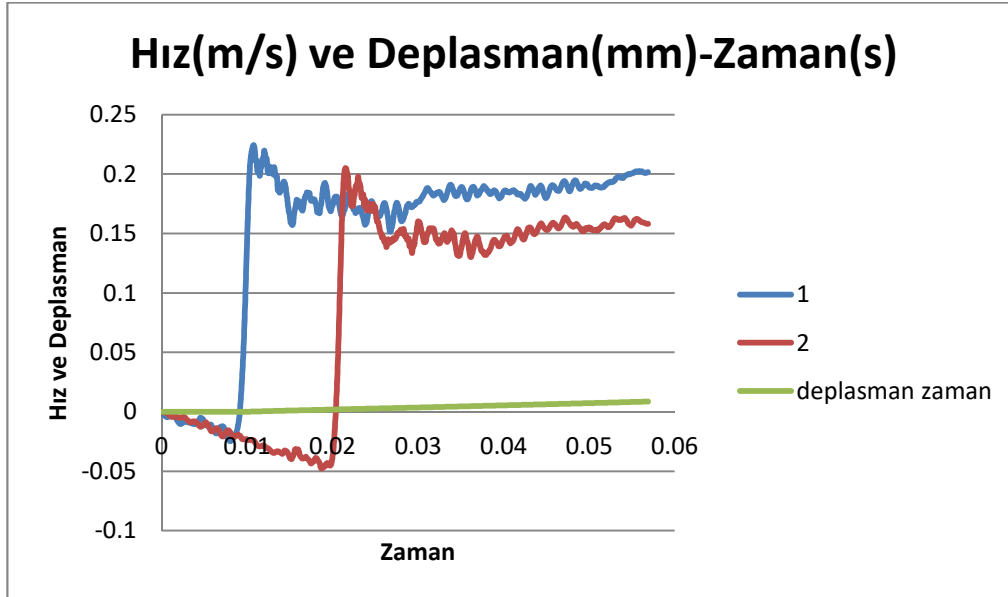
Şekil 9.95. K1-2c numunesinde yapılan iki düşüme ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 7,83 kN olarak gerçekleşmiştir ve ikinci düşümde numune 8,52 kN olarak kırılmıştır. Bu grafikler temas anının şiddetine ve veri elde edilen programdan seçilen veri aralığına bağlı olarak üst üste gelmiş veya ötelenmiştir.



Şekil 9.96. K1-2c numunesinde yapılan iki düşüme ait ivme-zaman grafiği

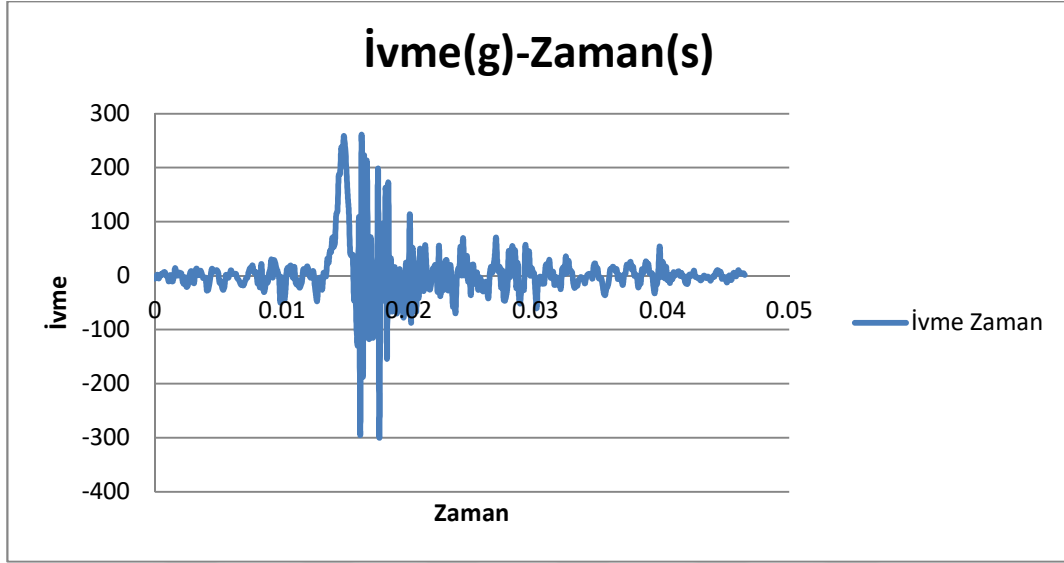
Şekil 9.96'da yapılan iki düşüme de ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 286,62 (g) ve -316,31 (g) olarak, ikinci düşümde ise 281,13 (g) ve -263,47 (g) olarak ölçülmüş ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve ikinci düşüme ait deplasman-zaman grafiği Şekil 9.97'deki gibidir. Çarpma temas hızı ikinci düşüm için 0,20 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.97. K1-2c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

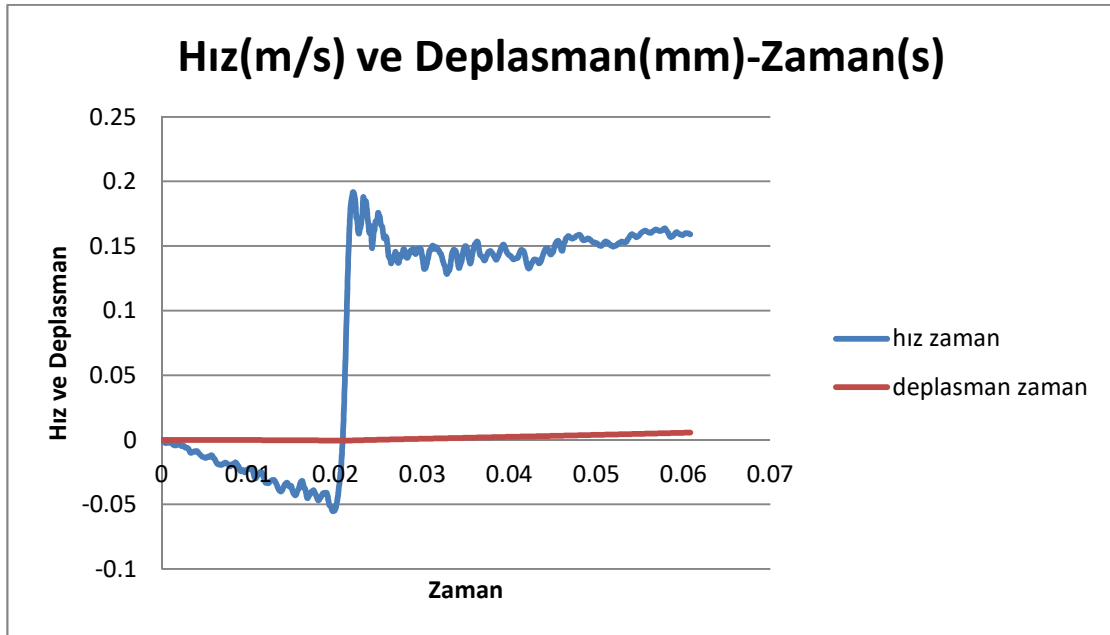
İkinci düşümde, temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değer $\delta=0,11$ mm olduğu görülür. K1-2c numunesinin iki düşüm

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 8,08 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



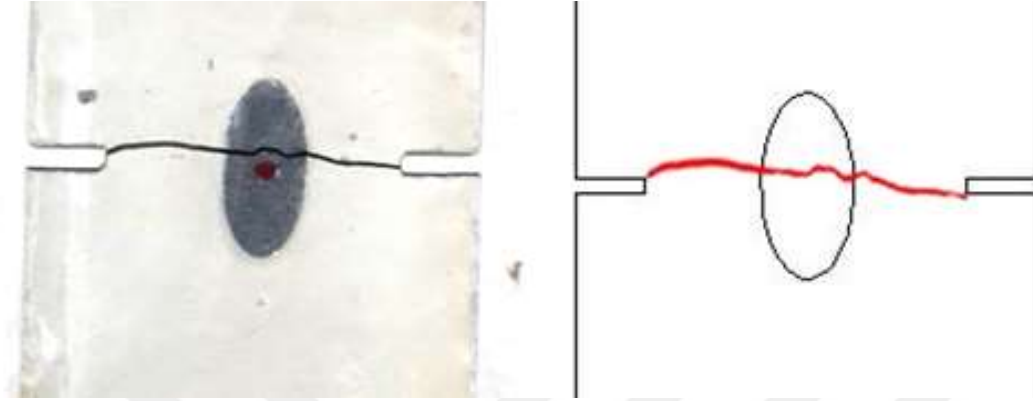
Şekil 9.99. B1-2c numunesinde yapılan tek düşüme ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.99'de ilk düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 260,85 (g) ve -299,09 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.100'deki gibidir. Çarpma temas hızı 0,19 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.100. B1-2c numunesine ait hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,28$ mm olduğu okunmuştur. B1-1,2c numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=120,3$ joule olarak hesaplanmıştır.

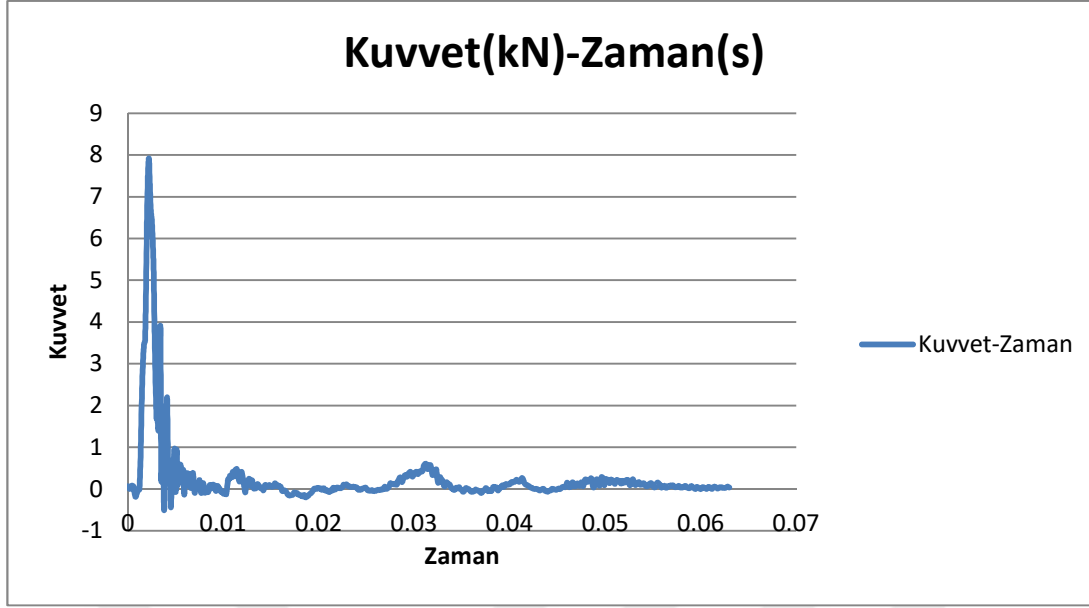


Resim 9.31. B1-2c numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Resim 9.31’de görüldüğü gibi ilk düşümde B1-2c numunesinde çatlak yörüngesi beton ve bazalt agreganın içerisinde ilerleyerek ilk çentik kökünün üst ucundan başlayarak son çentik kökünün alt ucundan çıkacak biçimde yörünge izleyip kırılmaya yol açmıştır. 90°’lik açıyla yerleştirilmiş bazalt agregası ve beton ara yüzeyinden ilerlemek yerine çatlak, doğrudan doğruya agreganın içinden geçerek karşı çentiğe ulaşmıştır böylece çarpma etkisi altında minimum enerji gerektiren çatlak ilerleme yolunun agrega içerisinde gerçekleştiği anlaşılmıştır. (2c) kodlu agregalar içerisinde belirgin bir farklılık yoktur.

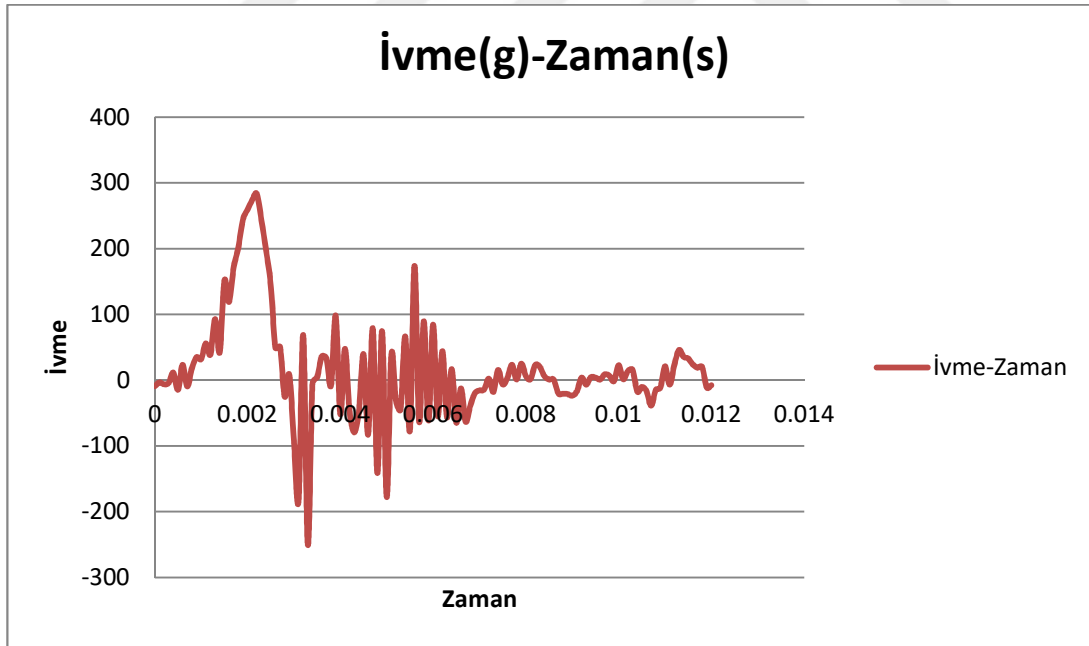
Referans numuneler

3 adet referans numunesi üzerinde uygulanan çarpma deneylerinden döküm kodunun D9b olduğu referans numunesinin deneylere kaynaklık edebileceği görülmüştür. D9b numunesine 5,1 cm yükseklikten çarpma deneyi uygulanmış ve numune tek düşümde kırılmıştır.



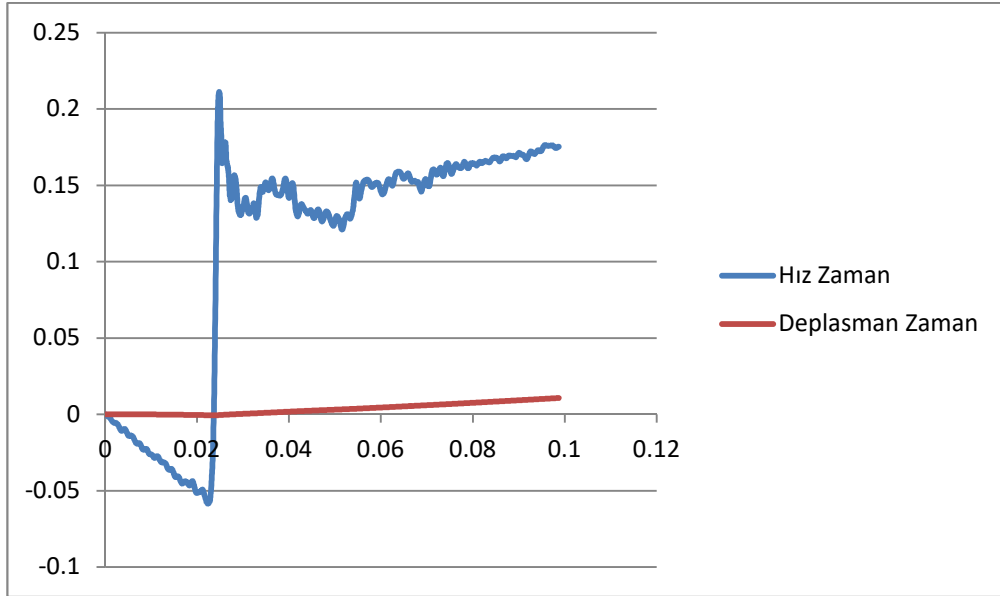
Şekil 9.101. D9b referans numunesine ait kuvvet-zaman grafiği

Uygulanan kuvvet, ilk düşümde 7,92 kN olarak gerçekleşmiş ve numune kırılmıştır.



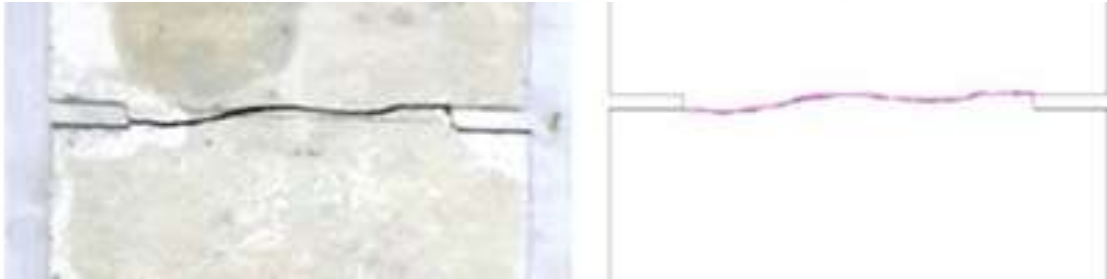
Şekil 9.102. D9b referans numunesine ait ivme-zaman grafiği

Şekil 9.102’de ilk düşüme ait ivme zaman grafiği gösterilmiştir. İvmelerin pik değerleri birinci düşümde 283,16 (g) ve -250,28 (g) olarak ölçülmüştür ve numune kırılmıştır. Hız-zaman ve deplasman-zaman grafiği Şekil 9.103’teki gibidir. Çarpma temas hızı 0,21 m/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9.103. D9b referans numunesine ait hız-zaman ve deplasman zaman grafiği

Temas hızının gerçekleştiği andaki ölçülen deplasman grafikten okunduğunda bu değerin $\delta=0,27$ mm olduğu okunmuştur. Referans D9b numunesinin tek düşümde kırılma tokluğu $E_1=55$ joule olarak hesaplanmıştır.



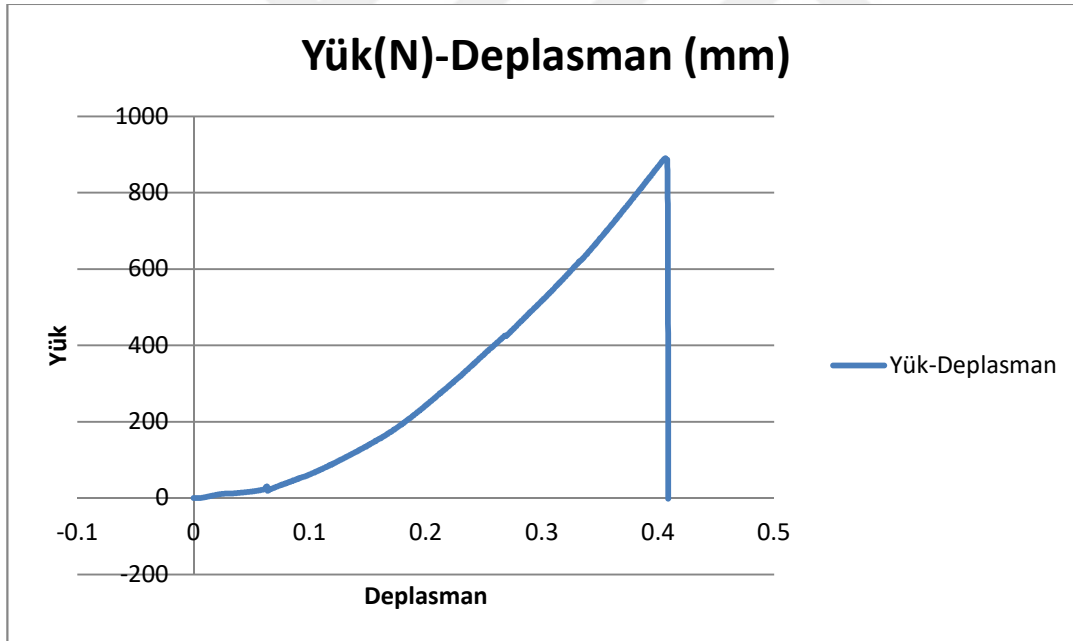
Resim 9.32. D9b numunesine ait kırılma sonrası görüntüsü ve çatlak yörüngesi

Dökülen üç adet referans numunesinin de birbirine yakın sonuçlar verdiği çatlak yörüngesinin beklendiği gibi sinüzoidal dalgayı andırmakta olduğundan sadece D9b numunesine yer verilmiştir. Ancak, resimde bahsedildiği gibi D9b numunesinden alınan küp numunelerin standart basınç dayanımları öngörülen ortalama basınç dayanımlarından düşük çıkmamıştır.

9.2. Üç Noktalı Eğilme Deneylerinin Sonuçları ve G_F Kırılma Enerjisinin Hesabı

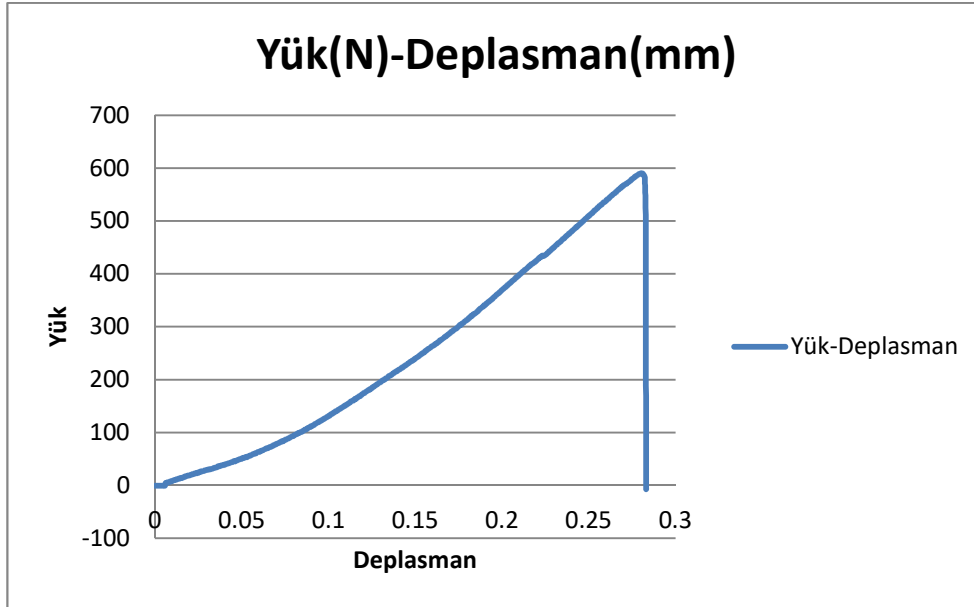
Her döküm koduna ait hazırlanan karışımlardan, $2,5 \times 2,5 \times 10$ cm³'lük kare prizma ve $2 \times 5 \times 15$ cm³'lük prizmatik beton numuneler aynı döküm kodlarıyla numaralandırılarak, her dökümde üçer(3'er) adet olmak üzere eğilme testi için numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerden, kare prizma olanlara Şekil 8.6'da gösterildiği gibi, çentiksiz kalmak ve çentikli olmak üzere ve Şekil 8.7'de gösterildiği gibi diğer prizmatik numunelerin tamamına çentikler açılmıştır. Daha sonra bu çentiklerin hizasından eğilme deneyi cihazıyla teste tabii tutulmuşlardır.

Elde edilen yük-deplasman grafiklerinin tamamı değerlendirildiğinde numunelerin tamamına uygunluk sağlayan ortalama yük deplasman eğrileri çıkarılmıştır. Elde edilen verilere ait bu eğrilerin grafikleri aşağıdaki gibidir.



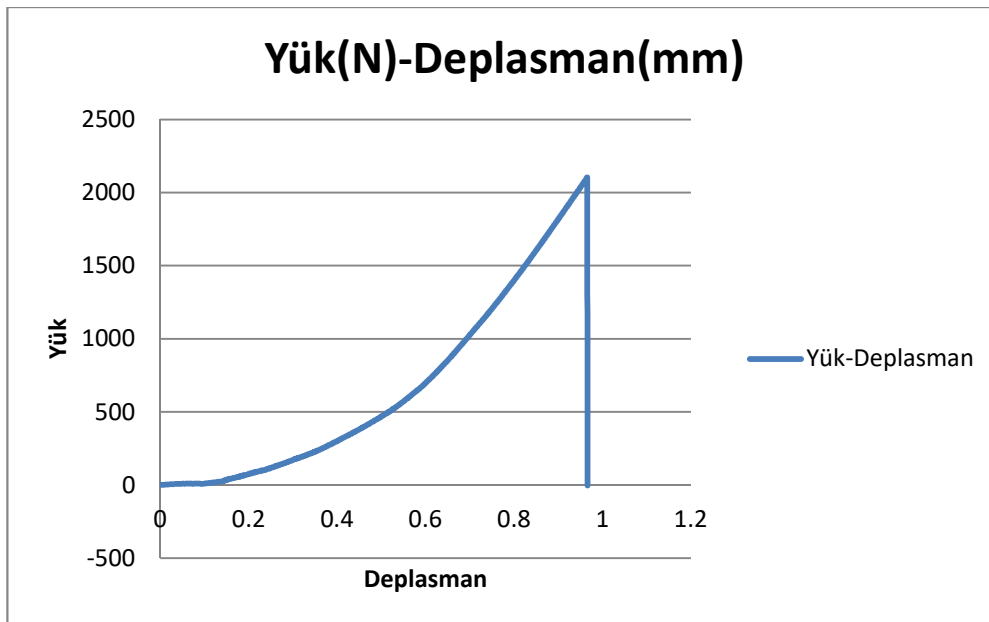
Şekil 9.104. 0,38 cm çentik açılmış kare prizma numunelerin uygunluk eğrisi

Şekil 9.104'te görüldüğü gibi $2,5 \times 2,5 \times 10$ cm³'lük numunelerden 0,38 cm çentik açılmış olanlar, 3 noktalı eğilme deneylerinde, ortalama olarak 890,6 N yükte, 0,41 mm deplasman göstererek kırılarak göçmüştür.



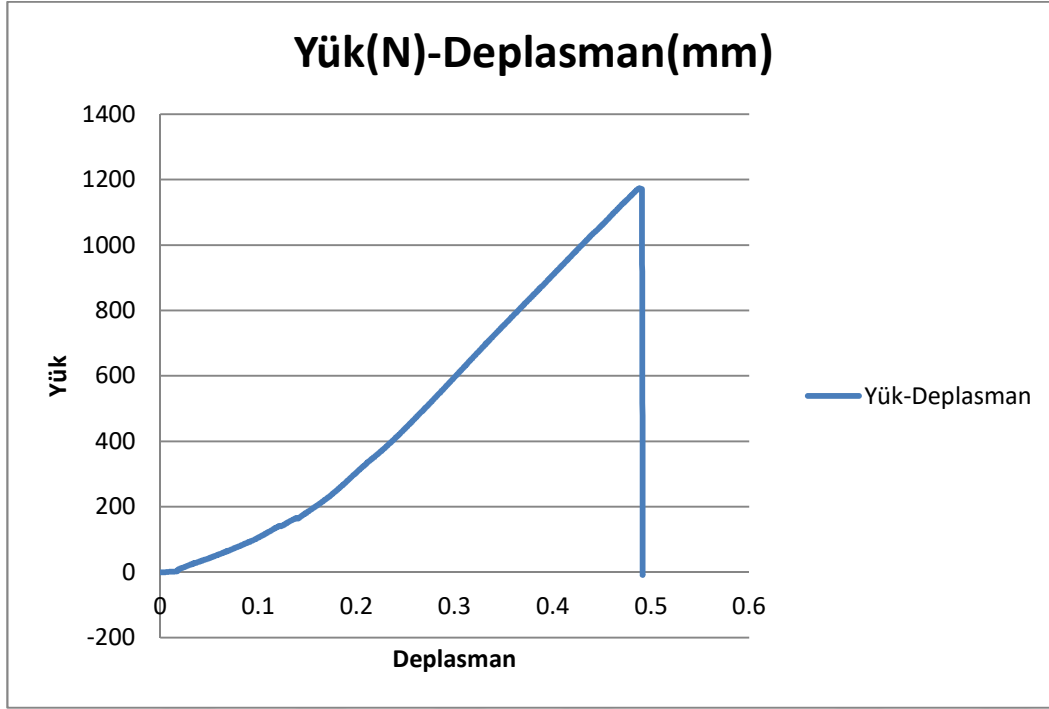
Şekil 9.105. 0,75 cm çentik açılmış kare prizma numunelerin uygunluk eğrisi

Şekil 9.105'te görüldüğü gibi 2,5x2,5x10 cm³'lük numunelerden 0,75 cm çentik açılmış olanlar, 3 noktalı eğilme deneylerinde, ortalama olarak 587 N yükte, 0,28 mm deplasman göstererek kırılarak göçmüştür.



Şekil 9.106. Kare prizma numunelerde çentiksiz olanların uygunluk eğrisi

Şekil 9.106’da görüldüğü gibi 2,5x2,5x10 cm³’lük numunelerden çentiksiz olanlar, 3 noktalı eğilme deneylerinde, ortalama olarak 2103 N yükte, 0,97 mm deplasman göstererek kırılarak göçmüştür.



Şekil 9.107. 0,75 cm çentik açılmış diğer prizmatik numunelerin uygunluk eğrisi

Şekil 9.107’de görüldüğü gibi 2x5x15 cm³’lük numunelere 0,75 cm çentik açılmış olup 3 noktalı eğilme deneylerinde, ortalama olarak 1172,35 N yükte, 0,49 mm deplasman göstererek kırılarak göçmüştür.

Şekil 9.104, Şekil 9.105, Şekil 9.106 ve Şekil 9.107’de gösterilen elde edilmiş eğriler ışığında eğilme dayanımları tespit edilmiş ve (4.4) eşitliği aracılığıyla da bu tür numunelerin G_F kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu veriler Çizelge 9.1’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 9.1. Eğilme deneyi numunelerinin eğilme dayanımları ve kırılma enerjileri

Beton Numuneler		Eğilme Dayanımı (σ_e , N/mm ²)	Kırılma Enerjisi (G_F , N/m)
2,5x2,5x10 cm	0,38 cm çentikli	8,55	248,85
	0,75 cm çentikli	5,64	156,82
	Çentiksiz	20,19	983,94
2x5x15 cm	0,75 cm çentikli	5,28	282,35

Hesaplanan G_F kırılma enerjilerinde, W_0 yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alan eğriye uyan ikinci dereceden denklemin belirli integrali alınıp sınır şartlarının yerine yazılmasıyla elde edilmiş ve (4.4) eşitliğinde yerine yazılmıştır. 2,5x2,5x10 cm³'lük numunelerin kütlesi ortalama 0,150 kg ve 2x5x15 cm³'lük numuneler için 0,360 kg'dır. Formüllerde, etkin alanlar A_{lig} basit geometrik hesaplarla elde edilmiş ve çizelge 9.1'deki sonuçlara ulaşılmıştır.

Resim 9.33. 2,5x2,5x10 cm³'lük kiriş numunelere ait kırılma sonrası görüntüsü

Resim 9.33'te görüldüğü gibi üç noktalı eğilme deneyiyle kırılan kiriş numuneler yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla; (a), 0,75 cm çentik açılan referans numuneyi, (b), çentiksiz referans numuneyi, (c), çentiksiz D1 kodlu numuneyi, (d) ise 0,38 cm çentik açılan D7b numunesini göstermektedir.

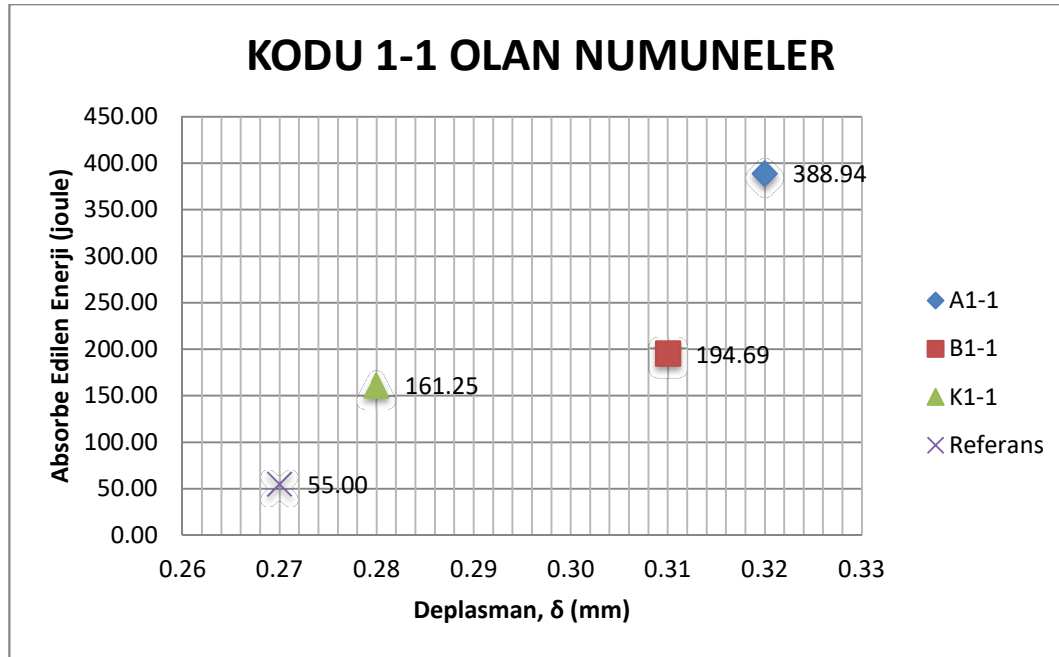


Resim 9.34. 2x5x15 cm³'lük numunelerin örnek üç noktalı eğilme deneyi görüntüsü

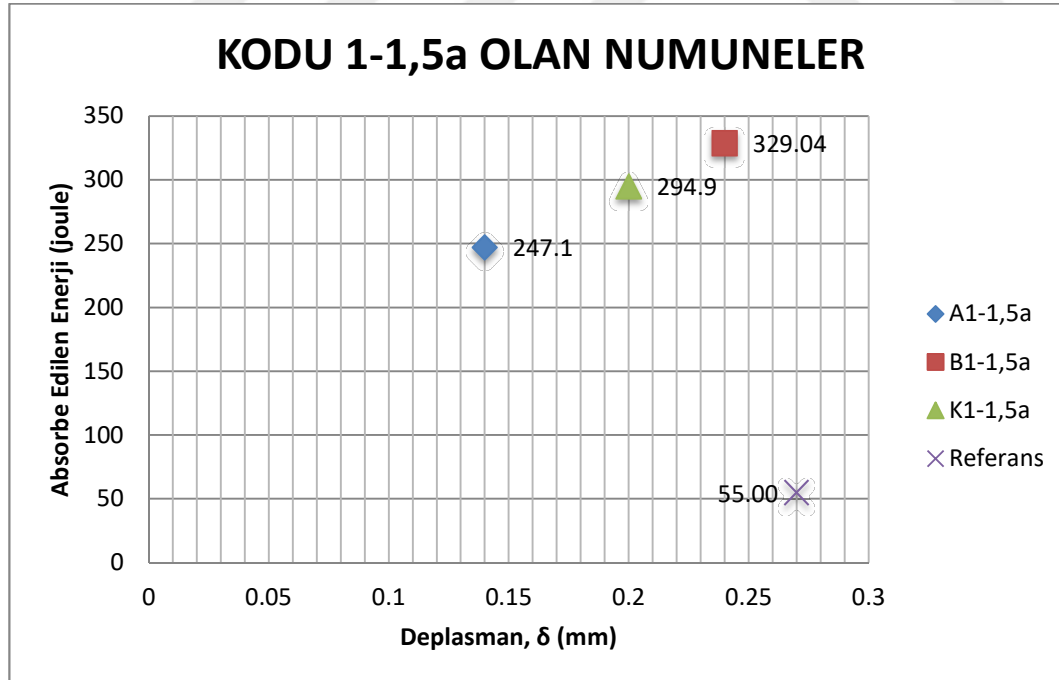


Resim 9.35. 0,75 cm çentikli 2x5x15 cm³'lük D3 kodlu numunenin kırılmış görüntüsü

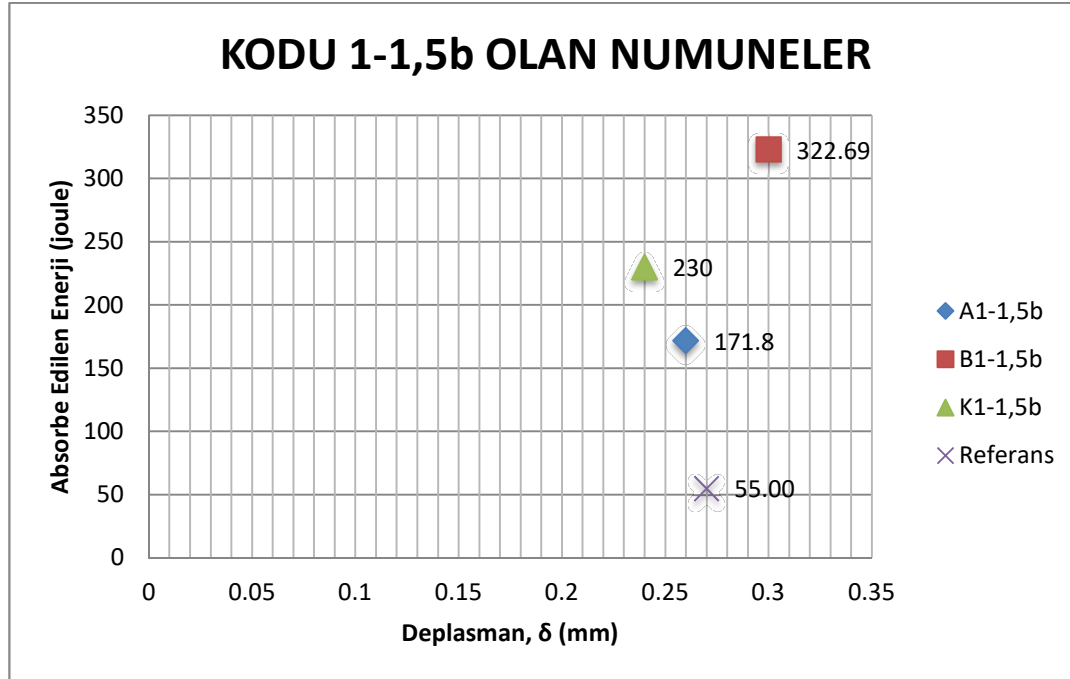
9.3. Enerji-Deplasman Grafikleri



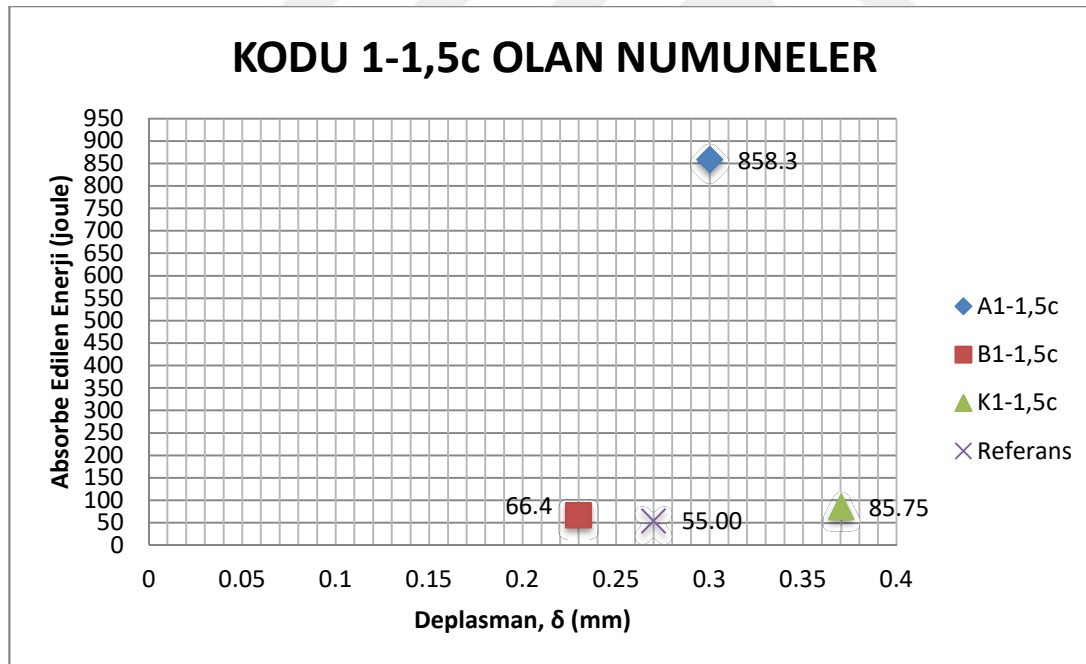
Şekil 9.108. 1-1 kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



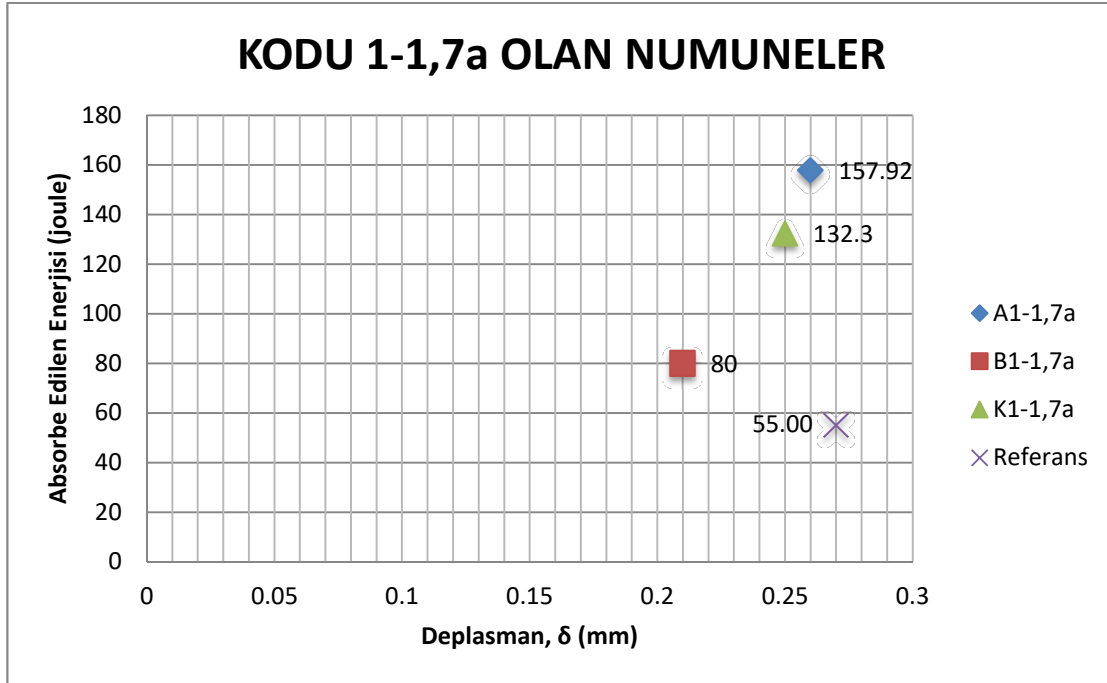
Şekil 9.109. 1-1,5a kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



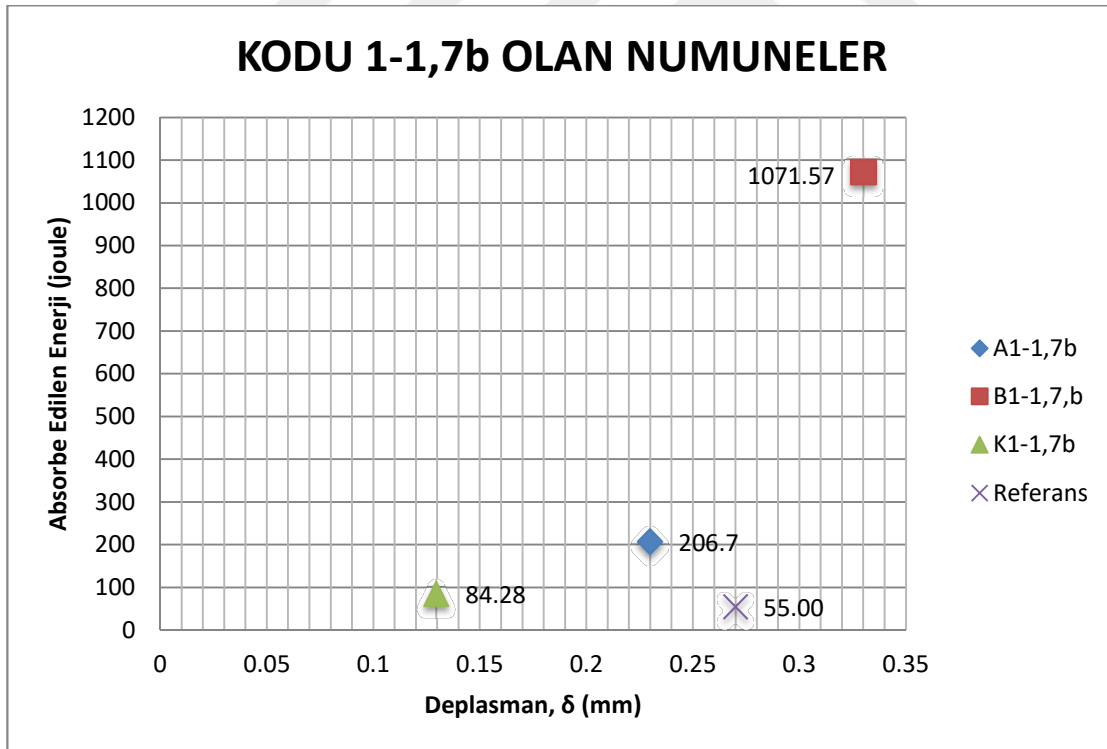
Şekil 9.110. 1-1,5b kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



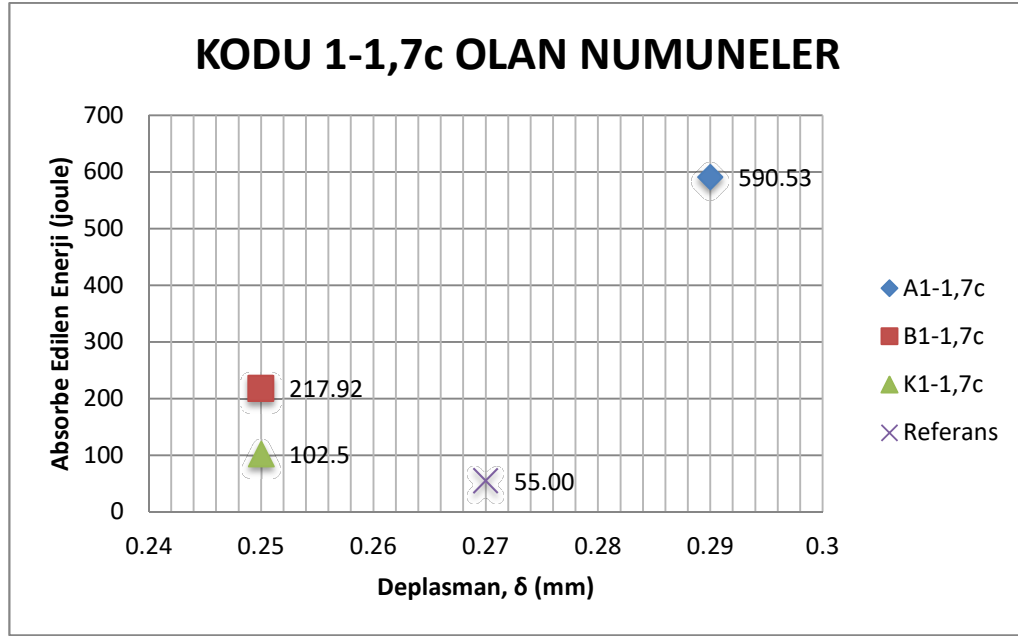
Şekil 9.111. 1-1,5c kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



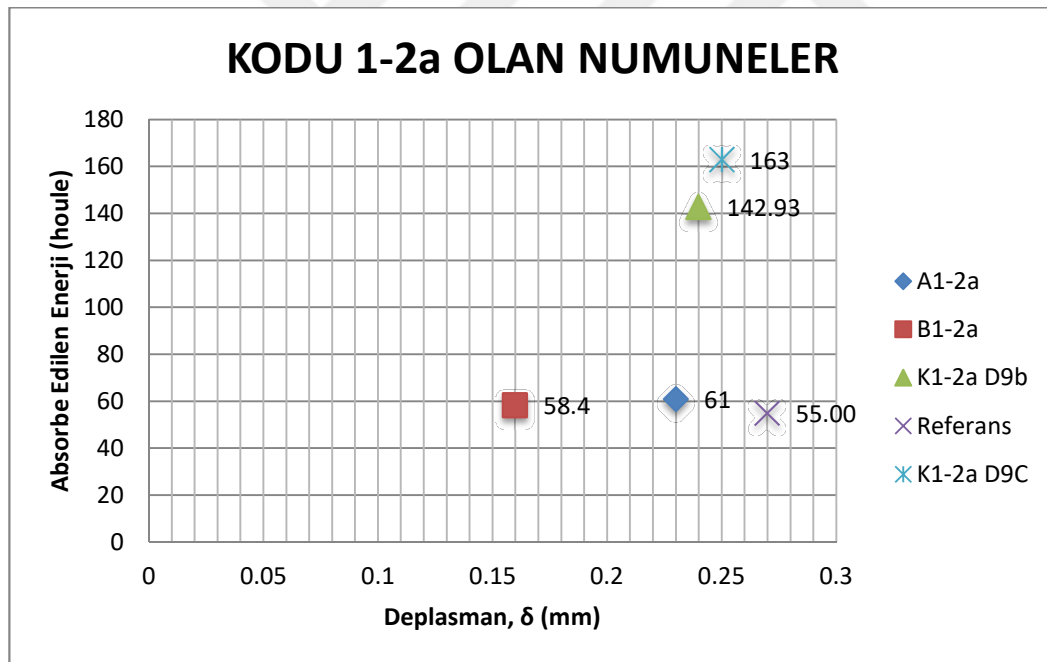
Şekil 9.112. 1-1,7a kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



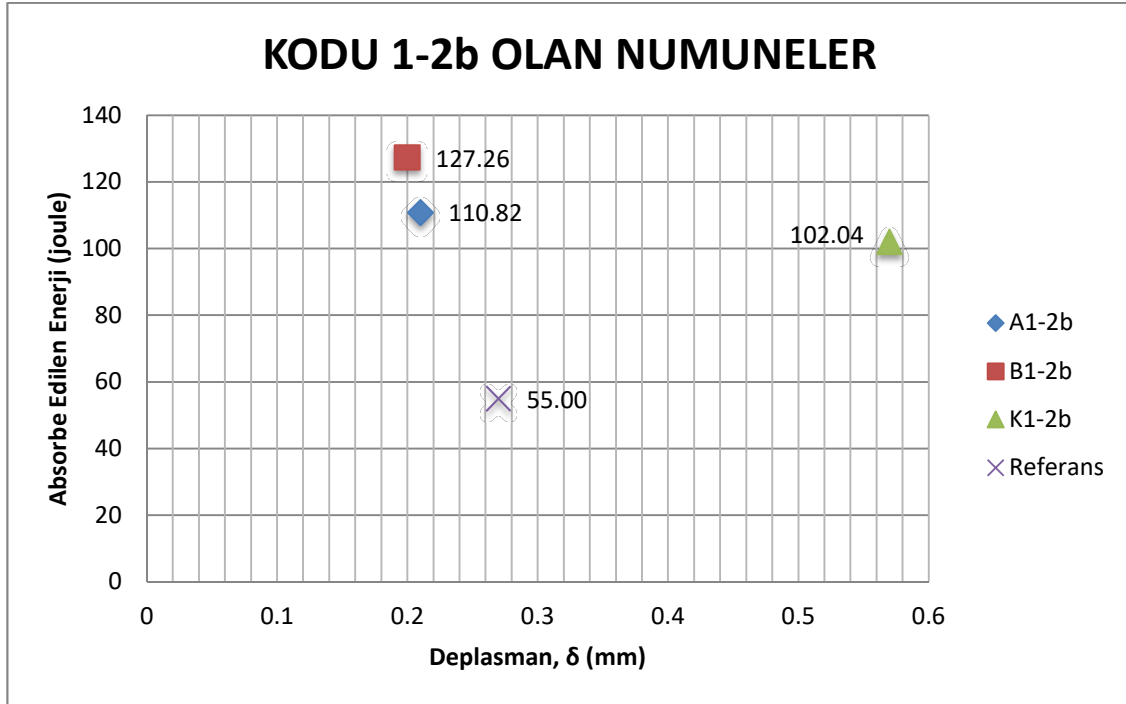
Şekil 9.113. 1-1,7b kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



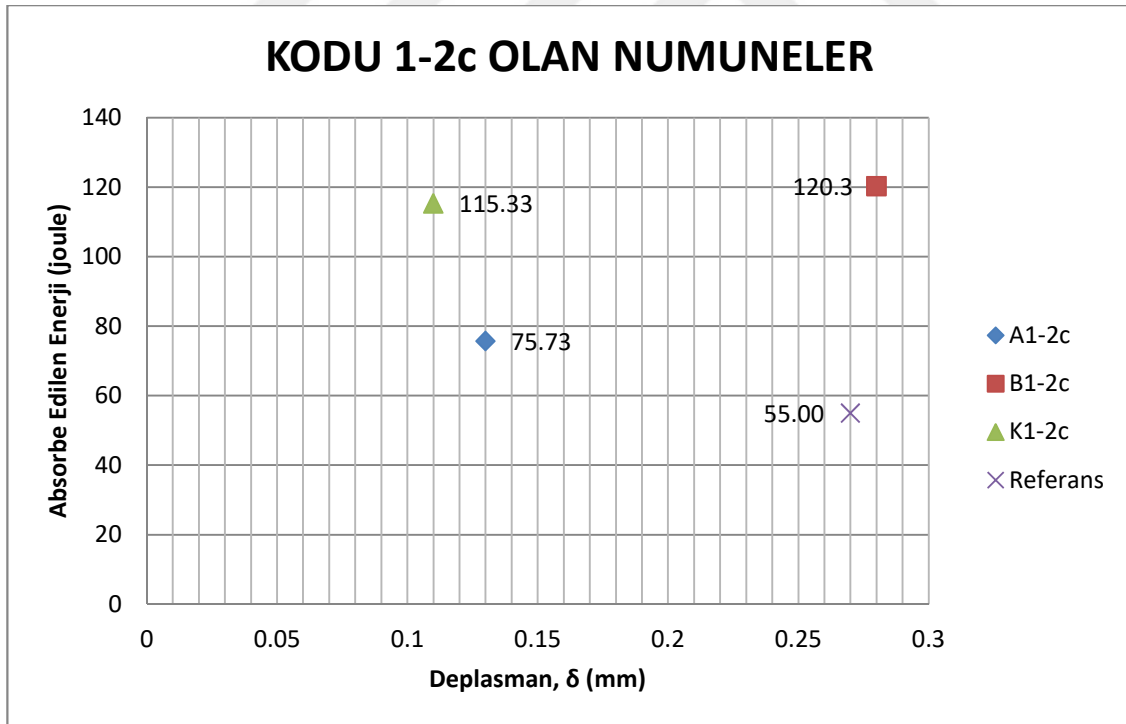
Şekil 9.114. 1-1,7c kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



Şekil 9.115. 1-2a kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



Şekil 9.116. 1-2b kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



Şekil 9.117. 1-2c kodlu numunelere ait enerji-deplasman grafiği



10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Değişken geometride ve doğrultuda yapay agregaya sahip yüksek dayanımlı betonların çarpma etkisi altındaki davranışının incelendiği bu çalışmada, 4 farklı geometride, 3 farklı açıda ve 3 farklı petrografide agrega kullanılarak üretilen toplam 30 adet çift çentikli şerit betonlarda özel geliştirilen bir çarpma deneyi makinesiyle çarpma deneylerine tabii tutulmuştur. Çalışmada, her bir numunede ayrı ayrı ve karşılaştırmalı olarak çatlak yörüngeleri ve çarpma deneylerinden elde edilen veriler ve grafikler incelenmiş ve detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, deneye yardımcı üç noktalı eğilme deneyleri ve sertleşmiş beton deneylerinden standart basınç deneyi de hazırlanan farklı numunelere uygulanmıştır.

- Öncelikle, çalışma kapsamında özel olarak geliştirilen çarpma deneyi aleti çalışmaya özgünlük kazandırmıştır. Özellikle şerit betonlarda ve genellikle uygulanacak çarpma deneyleri açısından yenilik getirilmiştir. Bu deney aletiyle yapılan deney sonuçlarının karşılaştırılabilir ve güvenilir olduğu deney programı boyunca izlenen metodlarla ortaya koyulmuştur. Deneyler aynı deney mekanizması kullanılarak tekrar edilebilir.
- Özel olarak geliştirilen bu çarpma deneyi aleti insan gücüyle çalışmakta olup şekil değiştirme hızı kapasitesi(10^{-4} - 10^3) açısından, hem yüksek hızlı çarpma deneylerine hem düşük hızlı çarpma deneylerine elverişlidir. Tekrarlı çarpma deneyleri uygulanabileceği gibi tek seferlik düşümle de kırılmalar yaratılabilecektir.
- Genellikle potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi prensibine dayanarak çalışan çarpma deneyi aletleri için bu potansiyel enerji yüksekliğin veya kütlenin artırılmasıyla değiştirilebilmektedir. Bu çalışmada, daha küçük yüksekliklerde daha büyük enerji yaratabilmek için sıkışan bir yayda depolanan potansiyel enerjinin kinetik enerjiye çevrilmesi prensibine dayanarak çarpma etkisinin bir şahmerdan aracılığıyla uygulandığı yeni bir makine prototip olarak tasarlanmıştır. Daha yüksek enerji transferleri için kullanılan yaydan farklı özelliklere sahip yay sabiti farklı yaylar da kullanılabilir.
- Geliştirilen çarpma deneyi makinesi minyatürize edilmiş boyutlarda olduğundan her laboratuvar koşuluna uygun ve kullanıcı dostudur. Makinede bulunan şahmerdan görevindeki mil teçhizatlandırılmış ve veriler böylelikle elde edilmiştir.

Şahmerdana adapte edilen ölçüm cihazları için alınan veriler tüm deneyler için özdeş kabul edilebilir. Ölçülen veriler ışığında yay sabitini bulmak kolaylaşmıştır. Bunların yanında ölçüm için kullanılan programlardaki özellikler vasıtasıyla hız ve anlık deplasman gibi veriler kolaylıkla ulaşılabilir olmuştur.

- Geliştirilmiş deney mekanizmasının, ilk tasarım olmasından dolayı, bir takım sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunların başında, kramayer dişlisi için, çok daha hassas yüksekliklerde çalışmak için diş adımı sıklaştırılabilir.
- Yay, kılavuz kramayer dişli ve yörüngesi arasındaki sürtünmeleri azaltmak amacıyla tasarlanan şahmerdan her defasında ince malzemelerden temizlenmeli ve gres yağıyla özenlice yağlanmalıdır.
- Şahmerdanın yörüngesinde daha hassas hareket etmesini sağlamak amacıyla yörünge kılavuzu optimize edilebilir. Hareketli üst parçanın değişik yüksekliklerde çalışabilmesi için 10 cm'de bir açtırılan delik sayısı artırılarak hassaslaştırılabilir. Numune ölçülerine göre yaptırılmış olan mesnetleme aparatı yerine, başka geometrik özelliklere sahip betonlar için, yükleme şartlarına göre yeni mesnetler yaptırılabilir ve tekrar düzeneğe adapte edilebilir. Tüm aparatın hâlen mükemmelleştirilmeye ve optimize edilmeye ihtiyacı vardır.
- Yüksek hızlı kameranın yokluğu deneyin daha sağlıklı irdelenmesini kısıtlamaktadır.
- Bugüne kadar beton üzerinde yapılan çarpma deneylerinde çoğunlukla betonun çarpma dayanımını arttırma ve statik basınç dayanımına kıyaslama amacı üzerine odaklanıldığından, çeşitli katkı malzemeleriyle güçlendirilmiş beton numuneler üzerine yoğunlaşmış, betonun yükleme ve mesnetleme sınır şartlarının değiştirilmesi üzerinde de çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bunların dışında özellikle öngerilmeli köprüler için önceden çatlak oluşturulmuş(veya kıyaslamak amacıyla çatlaksız) beton numuneler üzerinde de çalışılmıştır. Malzemeler ani darbeler etkisinde temas gerçekleşen noktadan başlayarak yayılan yüksek içsel basınç ve çekme gerilmesi dalgalarına maruz kalmaktadırlar. Ani ve yüksek çekme etkisine dayanamayan beton malzemedeki kırılma çatlakları oluşur. Ancak, yüksek dayanımlı betonlarda çarpma etkisi altında, çimento hamurunun mukavemetindeki artıştan ötürü agrega geometrik özelliklerine ve dayanımına göre değişen davranışları göz önünde bulunduran yeterli çalışma bulunmamaktadır.

- Deneylerde kullanılan yüksek dayanımlı beton mukavemeti $P_{ort}=150$ MPa olarak seçilen agregaların (Andezit İçin $P_{ort}:78,2$ mPa ve Bazalt İçin $P_{ort}:165,5$ mPa, Kireçtaşı için $P_{ort}:55$ mPa) dayanımları arasında kalması amaçlanmıştır. Ancak, doğal taş agregaların kristalin özelliklerinin homojen olmadığı bilinmektedir. Bilindiği gibi agregalar numune içerisinde hiçbir zaman tam küresel geometride olmayıp ağırlıklı olarak eliptik veya elipsoit biçimdedirler.
- Deney sonuçlarından da görülebileceği gibi andezit agregalı numunelerde, agrega boyutu arttıkça kırılma için gerekli olan düşü sayısının genel olarak azaldığı ancak, 90° 'lik açığa sahip andezit agregalı numunelerde gerekli düşüm sayısının artarak çarpma dayanımının yüksek olduğu görülmüştür. İlerleyen çatlak yörüngeleri her andezit agregalı numune için agreganın içerisinde geçmiştir. Bu davranış, çarpma etkisi altında andezit agregalı numunelerin statik yüklemekten çok daha farklı ve kendine özgü davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Zira daha önce yapılan benzer bir çalışmada [113], andezit agregalı numunelerde agrega boyutu arttıkça ve açısına bağlı değişimlerde (45° 'lik ve 90° 'lik açığa sahip olanlarda) çatlak yörüngesi agrega-beton ara yüzeyinden gerçekleşmiştir.
- Kireç taşına sahip numunelerde, agrega hangi açıda veya boyutta olursa olsun, düşüm sayısı açısından ve çarpma dayanımları açısından belirgin farklılık görülmemektedir. Çatlak yörüngeleri agrega içerisinde gelişmiştir. Ancak, andezit agregalı numunelere göre çatlak yörüngelerindeki önemli farklılık, 45° 'lik açılarda çatlak yörüngesinin kireç taşının içerisinde aynı doğrultuyu takip ettiği görülmüştür. Aynı zamanda, aynı tür hazırlanmış kireç taşına sahip numunelerde(K1-2a kodlu olanlar) uygulanan çarpma deneyi tekrar edildiğinde birbirinden hiçbir fark gözetmeyen aynı sonuçların elde edilmiş olduğu görülmüş, deneylerin tekrar edilebildiği sonucuna varılmıştır.
- Bazalta sahip numunelerde, numune boyutu arttıkça, 45° 'lik açığa sahip bazalt agregalı numuneler hariç olmak üzere, düşüm sayısında ve çarpma dayanımında belirgin farklılık olmadığı görülmüştür. Çatlak yörüngeleri çarpma etkisi altında bu tür numunelerde agrega içerisinde ilerlemeyi tercih etmiştir. Ancak, beklendiği gibi, 45° 'lik açığa sahip bazalt agregalı numunelerde hem düşüm sayısındaki kayda değer artış hem de çatlak yörüngesinin agrega beton arayüzeyinden ilerleyerek sapma göstermesi dikkat çekmektedir. Yani beklendiği gibi, numuneler agrega beton arayüzü arasında ani plastik deformasyonun gelişmesi ve böylece çatlakların yeni yüzeyler geliştirerek ilerlemesi yoluyla kırılmıştır.

- Birleşik çatlak yörüngelerinin gösteriminde kullanılan, mavi renkler andezit agregalı, yeşil renkler kireç taşı agregalı, kırmızılar bazalt agregalı numuneleri göstermektedir. Bu yörüngelerin çarpma etkisinde, bazen aynı güzergâhları izledikleri, bazen çakışık bazen de yön değiştirerek farklı doğrultularda ilerledikleri görülmektedir. Bu özelliklerin, doğal taşların kendilerine özgü kritical yapılarından kaynaklanabileceği, yön ve geometrilerinin hattâ betona bağlanan yüzeylerde farklılıkların sebep olabileceği düşünülmektedir. (Bkz. EK-2)
- Agreganın eliptik olması halinde agrega pozisyonu kırılma enerjisini önemli ölçüde etkilemektedir. Referans numunelerle karşılaştırıldığında, diğer numunelerin enerji yutma kapasitesinde meydana gelen değişimler, çatlak yörüngelerinin izledikleri yoldan kaynaklanmaktadır. Özellikle, agrega içerisinden ilerleyen çatlaklardan dolayı, agregaların tipine, boyutuna ve konumuna göre absorbe edilen enerji miktarlarında değişimler gözlenmiştir.
- Çalışma sırasında, çarpma deneylerinde şerit beton numuneler kullanılması ve sönümleyici kauçuk materyalle deneylerin sürdürülmesindeki amaç, çarpma etkisinin lokalize olmasını önlemek, bütün numune içerisinde basınç ve çekme gerilmelerinin farklı fazlarda etki etmesinin sağlanarak agreganın bulunduğu bölgeye kadar bu etkinin yayılmasını sağlamaktır.
- Çarpma deneyi uygulanan yüksek dayanımlı beton numunelerde karşılıklı 1,5 cm derinlikli çentik açılmıştır. Buradaki amaç, kırılma güzergâhının yapay agrega bulunan kısımda gerçekleşmesinin istenmesidir. Nitekim çatlak uçlarında gerilme yığılmaları yaşanarak, çatlaklar çentik uçlarından genişleyerek ilerlemiştir.
- Çalışmada deney sürecinin uzun olması, numune sayısının fazla olması ve tekrarlı çarpma deneyi uygulanmak istenmesinin seçilmiş olması nedeniyle bu tez kapsamında elde edilen veri çokluğu artmıştır.
- Yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan agreganın dayanımının ve geometrisinin çarpma etkisi altında statik yüklemelerden ve normal betonlardan çok daha farklı sonuçlar gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, bu konuda sonlu elemanlar yöntemlerini de barındıran nümerik analizler, bilgisayar destekli tasarımlara dayalı çalışmalar yapılabilir standartlar ve tasarım ilkeleri geliştirilebilir.

- Dünya'nın ve ülkelerin en büyük sorunlarından olan terör saldırıları, uçak kazaları gibi yüksek hızlı kazalar, nükleer enerji santrallerinin güvenliği, uzun ömürlü ve ekonomik yapı üretilmesi açısından çarpma dayanımına karşı güçlü, başlangıç ve yapı ömrü maliyetleri düşürülmüş mühendislik yapıları üretilmesi önem kazanmıştır. Bu açıdan, çarpma etkilerine maruz kalabilecek akustik çevrede bulunan ve yüksek dayanımlı beton kullanılacak önem katsayısı büyük yapılarda, andezit ve bazalt agregaların kullanılması yararlı olacaktır.





KAYNAKLAR

1. Beer, F., DeWolf, J. ve Johnston, E.R. (2006). *Mechanics of Materials*. (5th ed.). Columbus: McGraw Hill, 7-696.
2. Kokcharov, I. (1990). Strength of Structural Materials. *Mechanical Properties*, 1-22.
3. Shui-Sheng, YU., Yu-bin, LU., Yong, CAI. (2013). The strain-rate effect of engineering materials and its unified model. *Latin America Journal of Solids and Structures*, 833-844.
4. Wood-Adams P. (2011). Viscoelasticity and Mechanical Properties. Department of Mechanical & Industrial Engineering, Concordia University, *GCH6101- Physical Chemistry of Polymers*, 1-48.
5. Arslan A. (1995). Mixed-Mode Fracture Performance of Fibre Reinforced Concrete Under Impact Loading. *Materials and Structures*, 28, 473-478.
6. The Nuffield Foundation (2008). *Impact Testing*. London, UK: Advanced Applied Science: GCE A2 UNITS, 1-13.
7. Bush, John W. M. (2004). *MIT Lecture Notes on Surface Tension, lecture 5 (PDF)*. Massachusetts Institute of Technology, 11.
8. Wiesner, C.S., MacGillivray, H. (1999). *Loading Rate Effects on Tensile Properties and Fracture Toughness of Steel*. Imperial College, London, UK. 29 Nisan 1999 TAGSI seminerinde sunulmuştur.
9. Duell, J. (2004). Impact Testing of Advanced Composites. *Impact Testing of Advanced Composites*, 97-112.
10. Siewert, T. A., Manahan, M. P., McCowan, C. N., Holt, J. M., Marsh, F. J. (1999). The History and Importance of Impact Testing. *National Institute of Standards and Technology*, 1-16.
11. Kishi, N., Konno, H., Ikeda, K., Matsuoka, K.G. (2002). Prototype Impact Tests on Ultimate Impact Resistance of PC Rock-Shed. *International Journal of Impact Engineering*, 969-985.
12. İnternet: Sherman, M.L. (2001). Impact: Which Test to Use? Which Instrument to Buy. *Plastics Technology*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ptonline.com%2Farticles%2Fimpact-which-test-to-use-which-instrument-to-buy&date=2017-06-07>, Son Erişim Tarihi: 07.06.2017.
13. İnternet: Metz, R. (2007). Impact and Drop Testing with ICP Force Sensors. *PCB Piezotronics*, URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.pcb.com%2FContentst>

[ore%2Fmktgcontent%2FWhitePapers%2FWPL_5_Impact.pdf&date=2017-06-07,](#)
 Son Erişim Tarihi: 07.06.2017.

14. Daudeville, L., Malecott, Y. (2011). Concrete Structures Under Impact. *Joseph Fourier University, Science Technologie Santé*, 1-103.
15. Yoo, D-Y., Min, K-H., Lee, J-Y., Yoon, Y-S. (2007). Enhancing Impact Resistance of Concrete Slabs Strengthened with FRPs and Steel Fibers. *Korea University, NRF Journal*, 1-8.
16. Suaris, W., Shah, S.P. (1983). Properties of Concrete Subjcted to Impact. *Journal of Structural Engineering*, 109(7), 1727-1741.
17. Barr, B., Baghli, A. (1988). A repeated drop-weight impact testing apparatus for concrete. University College of Cardiff, *Magazine of Concrete Research*, 167-176.
18. Doyle, F.J. (1983). An experimental method for determining the Dynamic Contact Law. *Experimental Mechanics*, 10-16.
19. Hughes, B.P., Mahmood, A.T. (1984). Impact Behaviour of Prestressed Concrete Beams in Flexure. *Magazine of Concrete Research*, 157-164.
20. Mindess, S., Yan, C. (1993). Perforation of plain and fibre reinforced concrete subjected to low velocity impact loading. *Cement and Concrete Research*, 83-92.
21. Doyle, F.J. (1987). Determining the Contact Force During the Transverse Impact of Plates. *Experimental Mechanics*, 68-72.
22. Arone, R. (1978). On the Dynamic Fracture Toughness Determination by Instrumented Impact Tests. *Experimental Mechanics*, 549-553.
23. Zeilinski, A.J., Reinhardt, H.W., Wittmann, F.H. (1982). Stress-Strain Behaviour of Concrete and Mortar at high rates of tensile loading. *Fracture Mechanics of Concrete*, 309-319.
24. Robins, P.J., Calderwood R.W. (1978). Explosive testing of fibre-reinforced concrete. *Concrete*, 12(1), 26-28.
25. Zeilinski, A.J. (1984). Model for tensile fracture of concrete at high rates of loading. *Internation Journal of Cement Composites*, 215-224.
26. Birkimer, L.D., Lindeman, R. (1971). Dynamic tensile strength of concrete materials. *ACI Journal*, 47-49.
27. Caprino, G., Visconti, C., Ilio, D.A. (1984). Composite materials response under low-velocity impact. *Composite Structures*, 261-271.

28. Du, J., Yon, J.H., Hawkins, N.M., Arakawa, K., Kobayashi, A.S. (1992). Fracture Process Zone for Concrete for Dynamic Loading. *ACI Materials Journal*, 252-258.
29. Vegt, I., Breugel, V.K., Weerheijm, J. (2007). Failure Mechanisms of Concrete Under Impact Loading. *International Journal of Impact Engineering*, 1-8.
30. Greenlee, R. (2010). *Impact Loads*. (6'th Edition). New Mexico: School of Engineering, 1-4.
31. Anil D., Yıldırım O. (1999). Computerized solution of Impacting Rods by Using Mass and Spring Systems. METU, 1-11.
32. Monteiro P.J.M., Mehta P.K. (2006). Concrete-Microstructure. *Properties and Materials*, 406-409.
33. Banthia N., Mindess S., Bentur A. and Pigeon M. (1989). Impact Testing of Concrete Using a Drop-weight Impact Machine. *Experimental Mechanics*, 63-69.
34. Lent. B. (Editör). (2009). *Acceleration/Vibration Simple Steps to Selecting the Right Accelerometer*, California: Endevco Corporation, 802-809.
35. Galilei, G. (1933). *Two new sciences*. (Çev. H. Crew A. de Salvio). New York: The Macmillan Company. (Eserin orijinali 1638'de yayımlandı)
36. Coulomb, C. A. (1776). Remarque surla rupture des corps. *Memories presentes par divers savants al'Academie*, 7.
37. Inglis, C. E. (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Transaction of the Institute of Naval Architects*, 219-241.
38. Griffith, A. A. (1920). The Phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 163-198.
39. Irwin, G. R. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, 361-364.
40. Barenblatt, G. I. (1959). On equilibrium cracks forming during brittle fracture. *Prikladnaya Matematikai Mekhanika*, 434-444.
41. Dugdale, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 100-104.
42. Anderson, T. L. (1995). *Fracture Mechanics*. (Third edition). New York: CRC Press, 53.
43. Wells, A. A. (1961, January). *Unstable crack propagation in metals, cleavage and fast fracture*. Proceedings of the Crack Propagation Symposium, Cranfield, UK, 11-18.
44. Rice, J. R. (1968). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 35, 379-386.

45. Carpinteri, A., Valente, S., Ferrara, G., and Imperato, L. (1992, May). Experimental and numerical fracture modeling of a gravity dam. *Framcos*, 351-360.
46. Carpinteri, A. (1994). Scaling laws and renormalization groups for the strength and toughness of disordered materials. *International Journal of Solids and Structures*, 291-302.
47. Ceriolo, L. and Di Tomasso, A. (1998). *Fracture Mechanics of Brittle Materials: A Historical Point of View*. 2nd International Symposium in Civil Engineering, Budapest.
48. Zener, C. and Holloman, J. H. (1944). Effect of strain rate upon plastic flow of steel. *Journal of Applied Physics*, 22-32.
49. Van Mier, J. G. M. (2000). *Fracture Processes of Concrete*. New York: CRC Press, 208.
50. Bilby, B. A., Cottrell, A. H. and Swinden, K. H. (1963). *The spread of plastic yield from a notch*. Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 304-314.
51. Hillerborg, A. (1985). Influence of beam size on concrete fracture energy determined according to a draft RILEM recommendation; Div. of Building Materials. Lund Inst. Tech, *Report TVBM-3201*, Sweden.
52. Kaplan, M. F. (1965). The application of fracture mechanics to concrete. *Journal of The American Concrete Institute*, 591-610.
53. Neville, A. M. (1959). Some aspects of the strength of concrete. *Civil Eng. Public Works Revision*, 54.
54. Weibull, W. (1938). A statistical theory of strength of materials. Royal Swedish Academy of Engineering Science Proceeding, 1-45.
55. Glucklich, J. (1968). Diagrammatic stress-strain of concrete in compression. *Journal of Cement and Concrete Association*, 176-189.
56. Watanabe, F. (1972). Three branches of complete stress-strain curve for concrete, mechanical behavior of materials. *The Society of Material Science*, 153-161.
57. Newman, J. B. and Newman, K. (1971). Stress-strain curves for a typical loaded in uniaxial compression. *Solid Mechanics and Engineering Design*, 963-995.
58. Blakey, F. A. (1957). Some consideration of the cracking or fracture of concrete. *Civil Engineering and Public Works Review*, 1000-1003.
59. Dantu, P. (1958). Etude des contraintes dans les milieu heterogenes application au beton. *Annales De L Institut Technique De Batirent Et Des Travaux Publics*, 11, 5577.

60. Vile, G. W. D. (1968). Idealization of stresses around a single aggregate particle at the discontinuity point under uniaxial compression. *The Structure of Concrete*, 275-288.
61. Kaplan, M. F. (1961). Crack propagation and the fracture of concrete. *Journal of ACI*, 591-610.
62. Irwin, G. R. (1962). Discussion of the paper crack propagation and the fracture of concrete. *Journal of ACI*, 929.
63. Naus, D. J. and Lott J. L. (1969). Fracture toughness of portland cement concretes. *Journal of ACI*, 481-489.
64. Carpinteri, A. (1981). *Experimental determination of fracture toughness parameters KIC and JIC for aggregative materials*. Proceeding of the 5th Int. Conference On Fracture, Cannes.
65. Mindess, S., Lawrence, J. and Kesler, C. F. (1977). The J integral as a fracture criterion for fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 7.
66. Barr, B. and Bear, T. J. (1977). Fracture toughness. *Concrete*, 30-32.
67. Naus, C. (1973). Fracture mechanics applicability to portland cement concrete. *University of Illinois, Chicago Circle*, 168.
68. Mindess, S., Nadeau, J. S. and Hay, J. M. (1974). Effect of different curing conditions on slow crack growth in cement paste. *Cement and Concrete Research*, 953-965.
69. Hillerborg, A. (1985). The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete. *Journal by RILEM Technical Committee*, 25-30.
70. Peterson, P. E. (1981). Crack growth and development of the fracture zone in plain concrete and similar materials; Division of Building Materials. Lund Inst. Tech, *Report TVBM-1006*, Sweden.
71. RILEM Technical Committee-50-FMC. (1985). *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beam*. 18, 286-291.
72. Hillerborg, A. (1978). A model for fracture analysis; Division of Building Materials. Lund Inst. Tech, *Report TVBM-3005*, Sweden.
73. Bazant, Z. P. and Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Materials and Structures*, 155-177.
74. Leonhardt, F. and Mönnig, E. (1984). *Vorlesungen über Massivbau Teil*. (2'nd edition). New York: Springer Berlin Heidelberg, 21-208.
75. Litle, W. A. and Paparoni, M. (1966). Size effect in small-scale models of reinforced concrete beams. *ACI Special Publication*, 1191-1204.

76. Aldridge, W. W. and Bren, J. E. (1970). Useful Techniques in Direct Modeling of Reinforced Concrete Structures. *ACI Special Publication*, 125-140.
77. Ruiz, G. (2001). Propagation of a cohesive crack crossing a reinforcement layer. *International Journal of Fracture*, 111 (3), 265–282.
78. Yu, R. C. and Ruiz, G. (2006). Explicit finite element modeling of static crack propagation in reinforced concrete. *International Journal of Fracture*, 141(3-4), 357–372.
79. Toumi, A., Bascoul, A. and Turatsinze, A. (1998). Crack propagation in concrete subjected to flexural cyclic loading. *Materials and Structures*, 31(7), 451-458.
80. Colina, H. and Acker, P. (2000). Drying cracks: Kinematics and scale laws. *Materials and Structures*, 33(3), 101-107.
81. Shah, S. P., Weiss, W. J. and Yang, W. (1997). *Shrinkage cracking in high performance concrete*. International Symposium on High Performance Concrete, New Orleans, 148-158.
82. Nounua, G. and Chaudhary, Z. U. H. (1999). Reinforced concrete repairs in beams. *Construction Building Materials*, 13(4), 195-212.
83. Jumaat, M. Z., Kabir, M. H. and Obaydullah M. (2006). A review of the repair of reinforced concrete beams. *Journal of Applied Science Research*, 2(6), 317-326.
84. Dhir, R. K. and Jones M. R. (1996). *Concrete repair, rehabilitation, and protection*. Proceedings of the international conference held at the University of Dundee, Scotland, UK.
85. Matute, B. and Arturo, A. (2007). *Vibro-Pressed Micro-Concrete in Synthetic Formwork in Panels-Sheets-Moulded Sections*. Congress of World Intellectual Property Organization Genewa, Sweden.
86. Aitcin, P. C. (2000). Cement of yesterday and today concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 1349-1359.
87. Taşdemir, M. A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İTÜ Dergisi*, 3(2), 125-144.
88. Richard, P. and Chezezy, M. (1995). Composition of reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 25, 1501-1511.
89. Chan, Y. W. and Chu, S. H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 1167-1172.
90. Gilliland, S. K. (1996). *Reactive powder concrete (RPC), a new material prestressed concrete bridge girders*. Building an International Community of Structural Engineers Structures Congress, New York, 125-132.

91. İpek, M. ve Yılmaz, K. (2009, 13-15 Mayıs). *Sıkıştırma basıncının reaktif pudra betonun eğilme dayanımına etkisi*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumunda sunuldu, Karabük.
92. Barnes, B. D., Diamond, S. and Dolch, W. L. (1978). Contract zone between Portland cement paste and glass aggregate. *Cement and Concrete Research*, 8, 233-244.
93. Diamond, S. (1986). Microstructures of cement paste in concrete. *Proceedings of 8th International Congress on the Chemistry of Cement*, 122-147.
94. Oktar, O. N. (1977). *Bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli inelastik davranışındaki işlevi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul.
95. Shah, P. S., Lange, A. D., Li, Z. and Mitsui, K. (1994). Relationship between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface. *ACI Materials Journal*, 30-39.
96. Mindess, S. and Young, J. F. (1986). *Concrete*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 99-671.
97. Postacıoğlu, B. (1987). *Beton bağlayıcı maddeler, agregalar, beton (Cilt 2)*. İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi.
98. Akman, M. S. (1984). *Beton agregaları*. Beton seminerinde sunuldu, Ankara.
99. Uchikawa, H. (1989). Similarities and discrepancies of hardened cement paste, mortar and concrete from the standpoints of composition and structure. *Journal of Cement and Concrete*, 507.
100. Arıoğlu, E., Köylüoğlu, O. S., Dondurmacı, A. ve Manzak, O. (1996). *Yapı Merkezi Prefabrikasyon A.Ş. 'nde Beton Agregası Kalite Denetimi ve Değerlendirilmesi*. I. Ulusal Kırmataş Sempozyumunda sunuldu, İstanbul.
101. Durmuş, A. ve Pul, S. (1993). *Agrega petrografik yapısının betonun kırılma mekanizmaları üzerindeki etkisi*. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler I. Teknik Kongresinde sunuldu, KKTC.
102. Akyüz, S. (1976). *Kompozit malzeme olarak betonda elastik bölgedeki fazla arası etkileşiminin sayısal bir yöntemle incelenmesi*. Doçentlik Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul.
103. Akman, M. S. (1975). *Kırmataş iri agregalı betonlarda harç-beton sınırı üzerinde araştırmalar*. İTÜ İnşaat Fakültesi Teknik Rapor No.21, İstanbul.
104. Williams, M. L. (1959). The stresses around a fault or crack in dissimilar media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 199-204.

105. Lee, K. M., Büyüköztürk, O. and Kitsutaka, Y. (1994). The role of interface fracture toughness in cracking behavior of high strength concrete. *ACI Special Publication on Interface Fracture and Bond*, 69-84.
106. Lee, K. M., Büyüköztürk, O. and Oumera, A. (1992). Fracture analysis of mortar aggregate interface in concrete. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 118(30), 2031-2047.
107. Büyüköztürk, O. (1993). Interface fracture and crack propagation in concrete composites. *Micro-mechanisms of Concrete and Cementitious Composites*, C.Huet, 203-212.
108. Wittmann, F. H. and Zaitsev, Yu. V. (1981). Crack propagation and fracture of composite materials such as concrete. *International Congress of Fracture*, 2268-2271.
109. Yörük, O. (2015). *Yüksek Dayanımlı Betonlarda Agreg Geometrisinin ve Doğrultusunun Kırılma Mekanizmasına Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-62.
110. Polat, R., Yadollahi, M.M., Sagsoz, E.A., Arasan, S. (2013). The Correlation Between Aggregate Shape and Compressive Strength of Concrete: Digital Image Processing Approach. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 2319 – 6009.
111. Darwin, D., Kozul, R. (1997). Effects of Aggregate Type, Size and Content on Concrete Strength and Fracture Energy. *Structural Engineering and Engineering Materials*, Kansas, 1-85.
112. Stowe, R.L. (1969). Strength and Deformation Properties of Granite, Basalt, Limestone and Tuff at Various Loading Rates. *Journal C69-1 of Corps of Engineers*, 120-141.
113. İnternet: Burney, D., Fekete, B., Hood, J., Nguyenloc, F., *Taylor Impact Test, Velocity Measurement Device for Impact Testing*, Florida State University, AirForce Research Laboratory. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Feng.fsu.edu%2Fme%2Fsenior_design%2F2008%2Fteam14%2FDocuments%2FFinal_Presentation-1.ppt%2C&date=2017-06-07, Son Erişim Tarihi: 07.06.2017.
114. İnternet: Impact/Blast-resistance of Layered Composites, Center of Excellence for Advanced Materials, Office of Naval Research (ONR) Jacobs School of Engineering of the University of California, San Diego. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww-ceam.ucsd.edu%2Flayered.html&date=2017-06-07>, Son Erişim Tarihi: 07.06.2017.
115. Li, G., Liu, D. (2009). Low Strain Rate Testing Based on Weight Drop Impact Tester. *Impact Testing*, 30-35

116. Geers, M.G.D., Borst, R., Peerlings, R.H.J. (2000). Damage and Crack Modeling in Single-Edge and Double-Edge Notched Concrete Beams. *Engineering Fracture Mechanics*, 247-261.



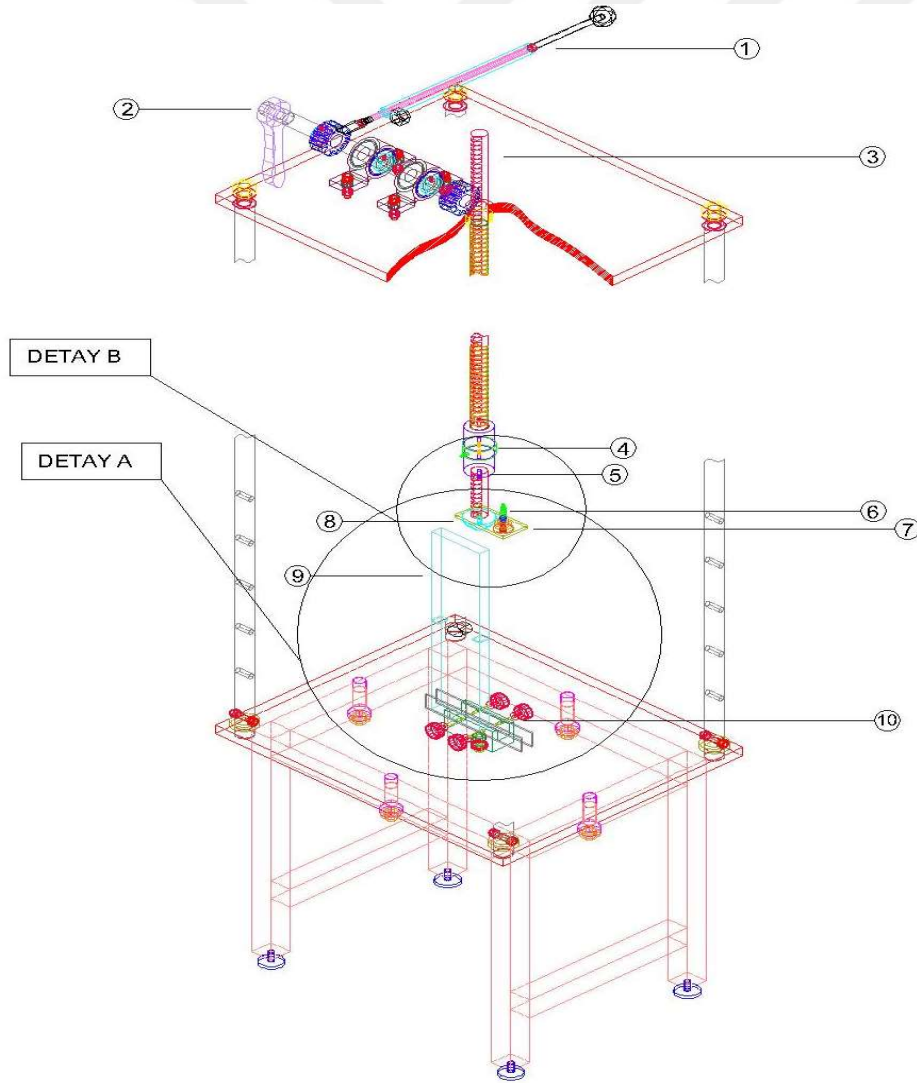




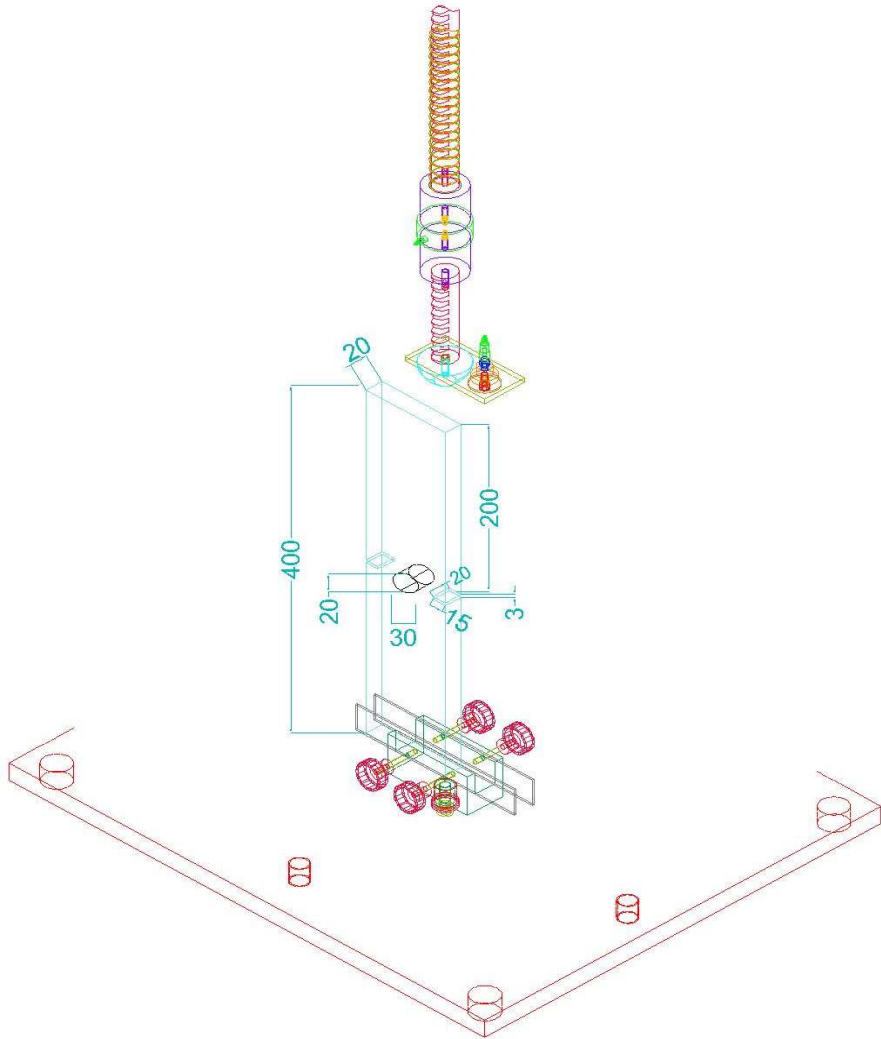
EKLER

Çizelge 1.1. Makine Parçaları

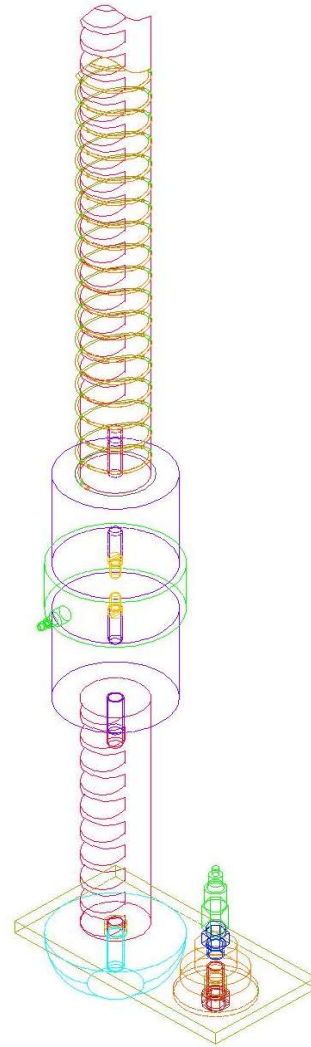
PARÇALAR	1	TETİK MEKANİZMASI
	2	KURMA KOLU
	3	KRAMAYER DİŞLİ ŞAHMERDAN MİLİ
	4	DİNAMİK YÜK ÖLÇER
	5	TEÇHİZATLANDIRMA APARATI
	6	İVME-ÖLÇER
	7	İVME-ÖLÇER ADAPTÖRLERİ
	8	VURUCU TOPUZ UÇ
	9	MESNETLEME APARATI



Şekil 1.1. Geliştirilen deney makinesi çizimi

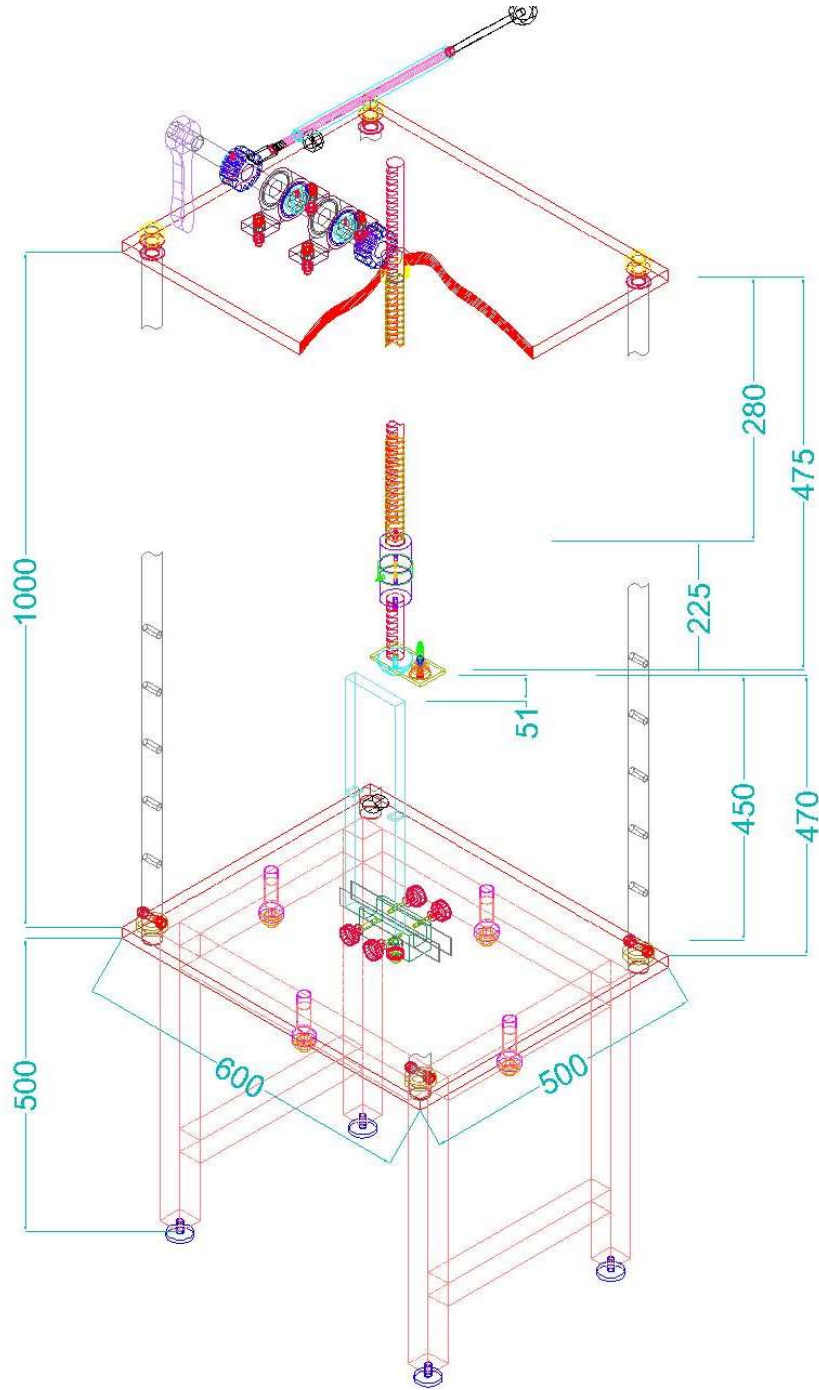


Şekil 1.2. Geliştirilen deney makinesi Detay A

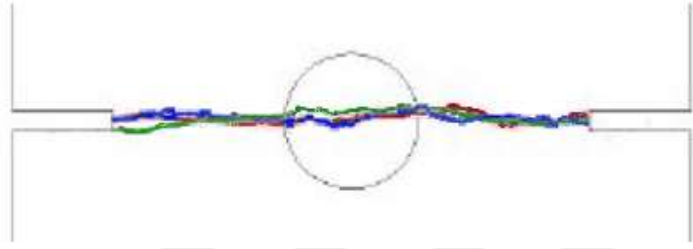


Şekil 1.3. Geliştirilen deney makinesi Detay B

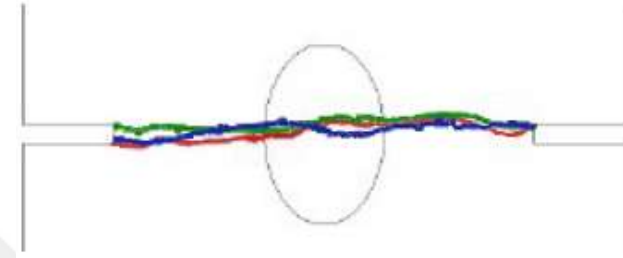
EK-1.(devam) Geliştirilen deney makinesi



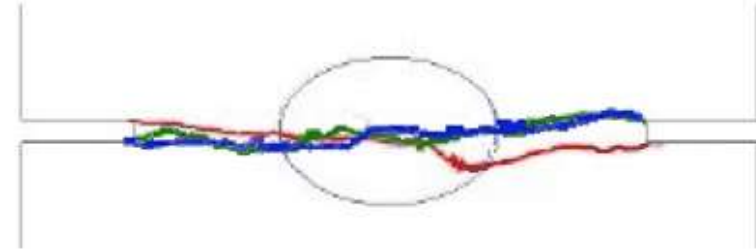
Şekil 1.4. Geliştirilen deney makinesi çalışma yükseklikleri



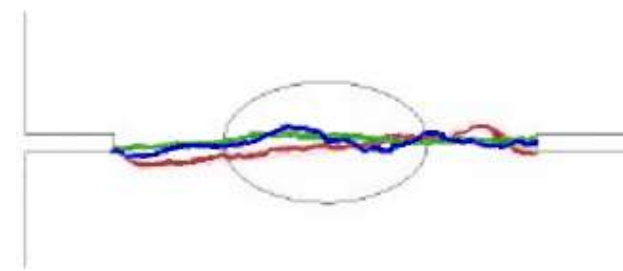
Şekil 2.1. 1-1 kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri



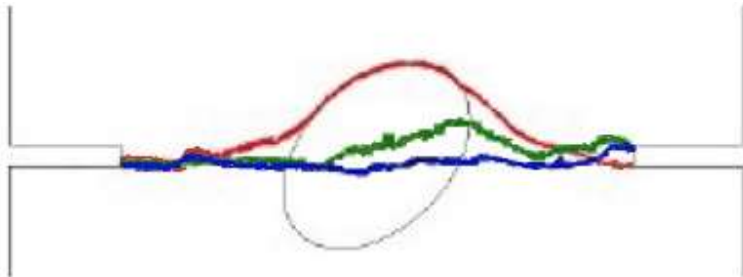
Şekil 2.4. 1-1,5c kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri



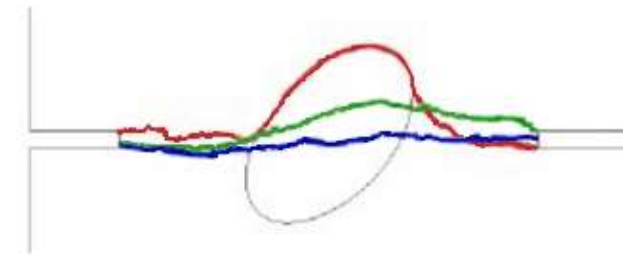
Şekil 2.2. 1-1,5a kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri



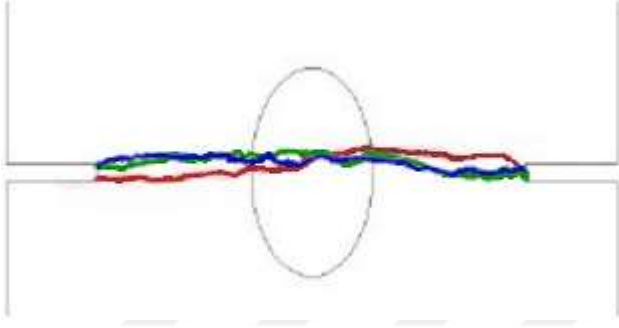
Şekil 2.5. 1-1,7a kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri



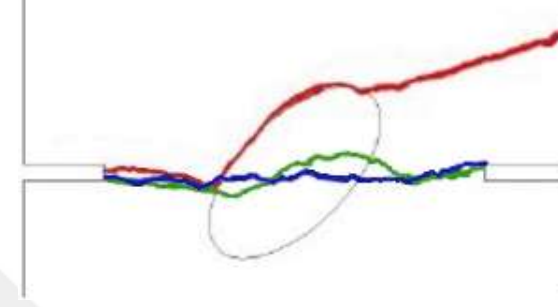
Şekil 2.3. 1-1,5b kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri



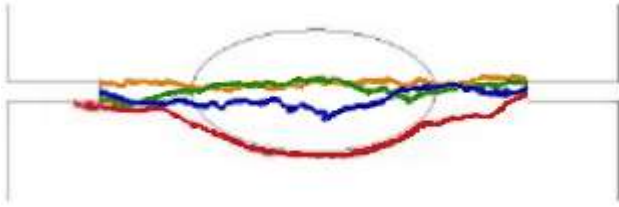
Şekil 2.6. 1-1,7b kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri



Şekil 2.7. 1-1,7c kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri



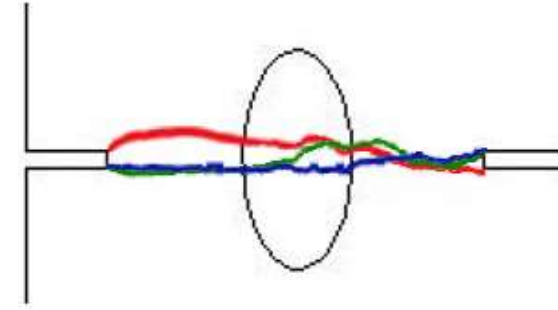
Şekil 2.9. 1-2b kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri



Şekil 2.8. 1-2a kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri

(Turuncu: K1-2a D9b, Yeşil:K1-2a D9c)

Birleşik çatlak yörüngelerinin gösteriminde kullanılan, mavi renkler andezit agregalı, yeşil renkler kireç taşı agregalı, kırmızılar bazalt agregalı numuneleri göstermektedir. Bu yörüngelerin çarpma etkisinde, bazen aynı güzergâhları izledikleri, bazen çakışık bazen de yön değiştirerek farklı doğrultularda ilerledikleri görülmektedir.



Şekil 2.10. 1-2c kodlu numunelerde çatlak yörüngeleri

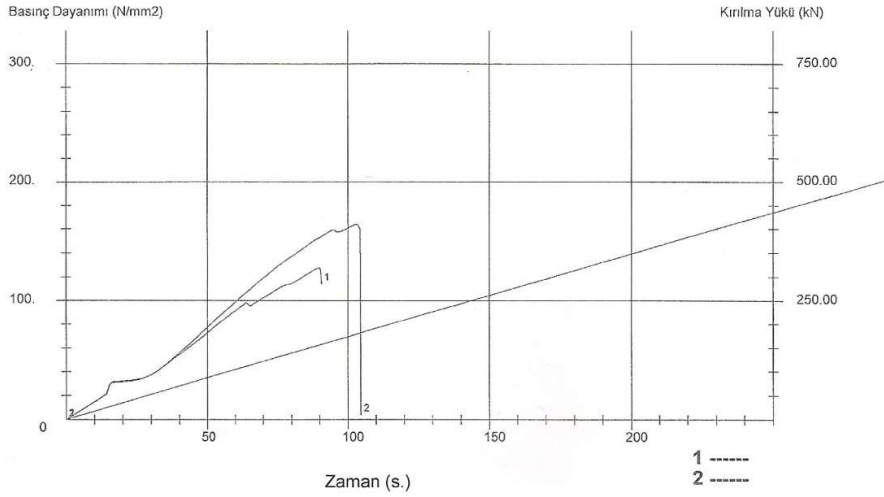


Şekil 2.11. Referans Numunelerde çatlak yörüngeleri

EK-3.Küp beton numunelerin basınç dayanımları

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağırlık kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüklü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	-	-	-	-	10.09.16	412.3	128.28	EK	-
2	25.	125.	-	-	-	-	10.09.16	320.7	164.92	D10	-
Ortalama:								412.3	148.6		

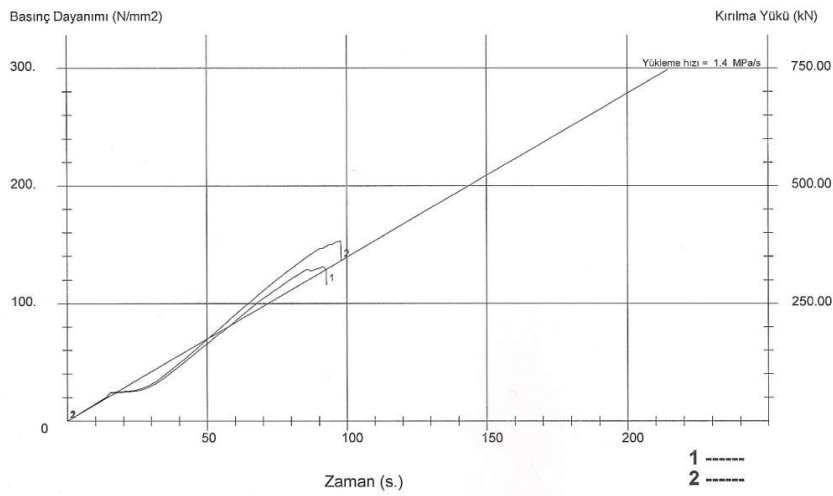
Deney Grafiği



Şekil 3.1. Birinci etap küp beton basınç dayanım grafikleri

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağırlık kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüklü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	309.	2.47	-	-	19.09.16	329.4	131.76	İLK	-
2	25.	125.	309.	2.47	-	-	19.09.16	384.9	153.96	İLK	-
Ortalama:								357.15	142.86		

Deney Grafiği

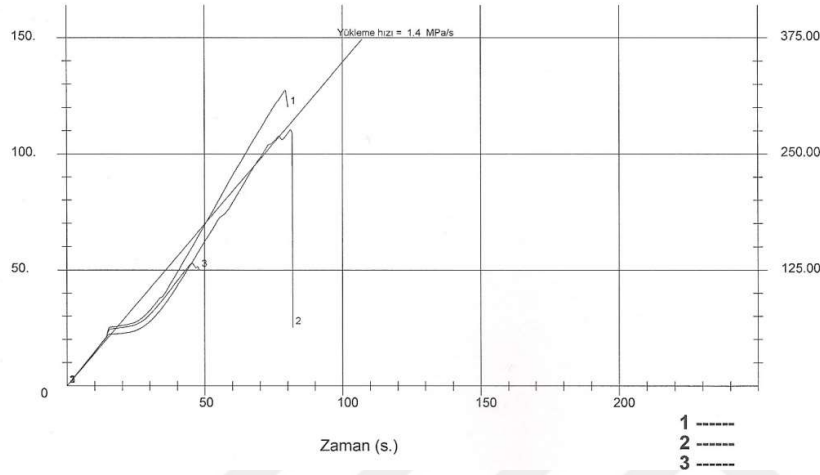


Şekil 3.2. Diğer etapdaki ilk referans serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

EK-3.(devam) Küp beton numunelerin basınç dayanımları

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	319.9	127.96	D1	
2	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	277.3	110.92	D1	
3	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	132.8	53.12	D1	
Ortalama:								243.33	97.33		

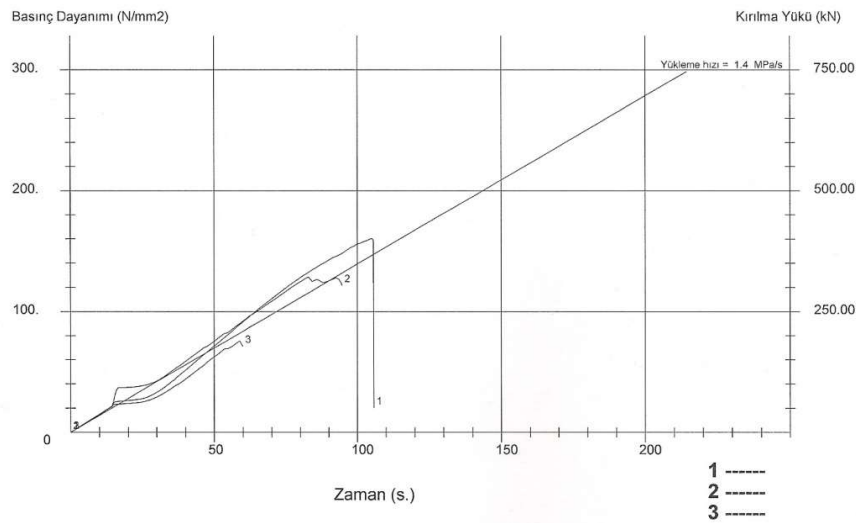
Deney Grafiği

Basınç Dayanımı (N/mm²)

Şekil 3.3. D1 serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	402.3	160.92	D2	
2	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	323.1	129.24	D2	
3	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	190.	76.	D2	
Ortalama:								305.13	122.05		

Deney Grafiği

Basınç Dayanımı (N/mm²)

Şekil 3.4. D2 serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

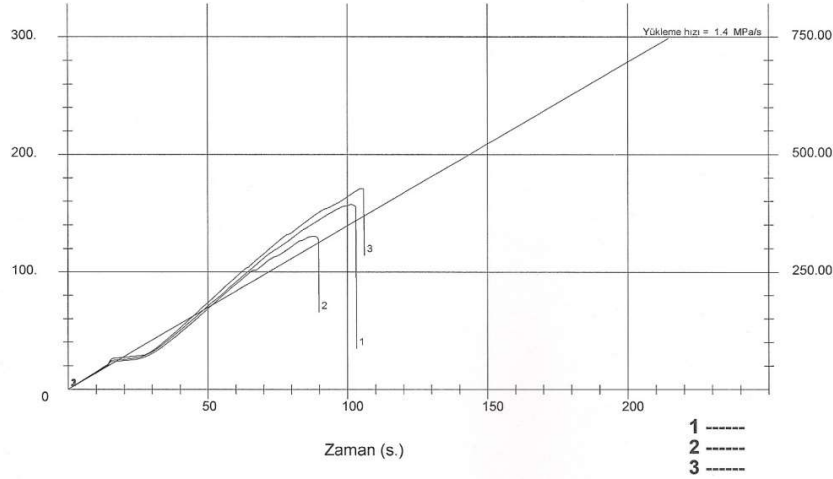
EK-3.(devam) Küp beton numunelerin basınç dayanımları

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	395.6	158.24	D3	
2	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	327.7	131.08	D3	
3	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	429.2	171.68	D3	
Ortalama:								384.17	153.67		

Deney Grafiği

Basınç Dayanımı (N/mm²)

Kırılma Yüğü (kN)



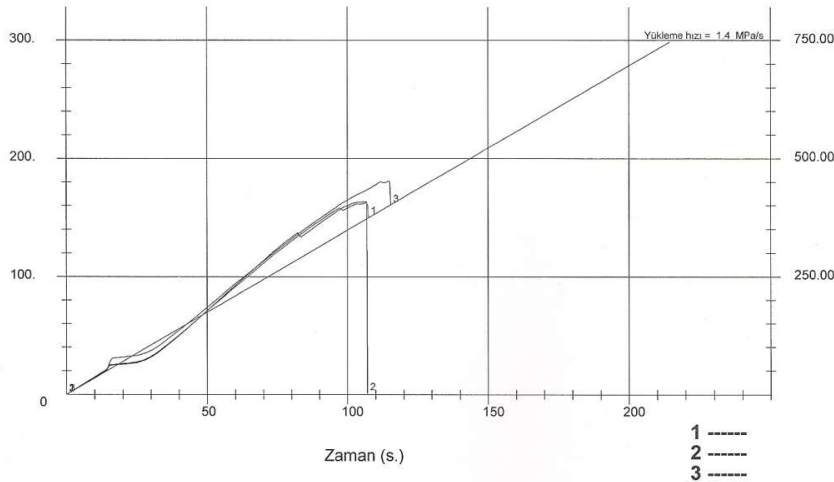
Şekil 3.5. D3 serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	408.9	163.56	D4	
2	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	410.3	164.12	D4	
3	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	454.5	181.8	D4	
Ortalama:								424.57	169.83		

Deney Grafiği

Basınç Dayanımı (N/mm²)

Kırılma Yüğü (kN)

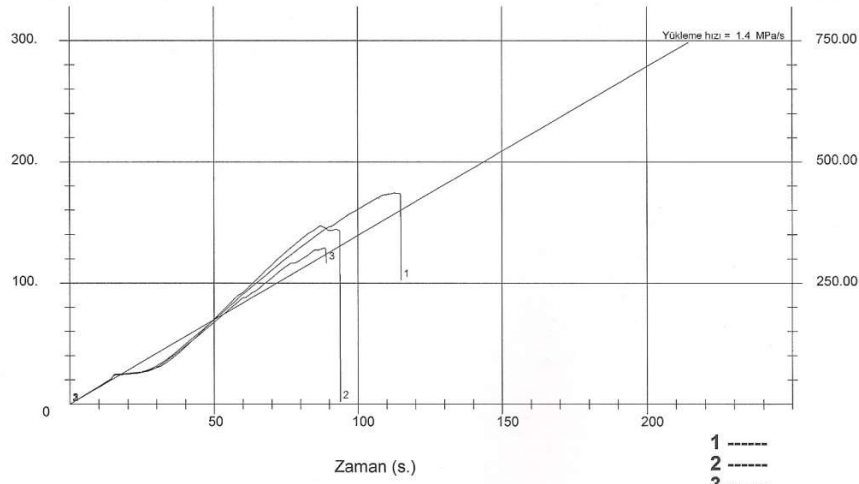


Şekil 3.6. D4 serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

EK-3.(devam) Küp beton numunelerin basınç dayanımları

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	310.	2.48			19.09.16	437.7	175.08	D5	
2	25.	125.	310.	2.48			19.09.16	370.1	148.04	D5	
3	25.	125.	310.	2.48			19.09.16	323.6	129.44	D5	
Ortalama:								377.13	150.85		

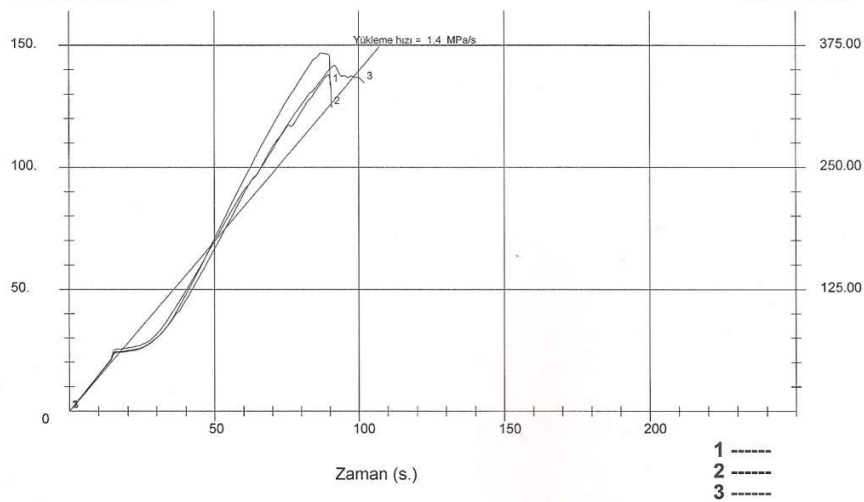
Deney Grafiği

Basınç Dayanımı (N/mm²)

Şekil 3.7. D5 serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	308.	2.46			19.09.16	368.9	147.56	D6	
2	25.	125.	308.	2.46			19.09.16	346.3	138.52	D6	
3	25.	125.	308.	2.46			19.09.16	356.3	142.52	D6	
Ortalama:								357.17	142.87		

Deney Grafiği

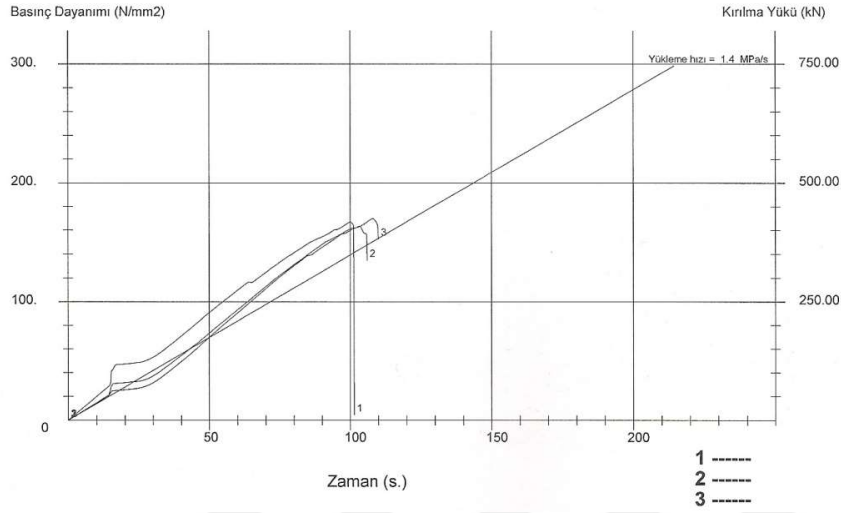
Basınç Dayanımı (N/mm²)

Şekil 3.8. D6 serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

EK-3.(devam) K p beton numunelerin basınc dayanımları

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yükü kN.	Basınc Dayanım N/mm ²	Beton Sıcak. �C	Trans. No
1	25.	125.	309.	2.47			19.09.16	419.8	167.92	D7	
2	25.	125.	309.	2.47			19.09.16	411.1	164.44	D7	
3	25.	125.	309.	2.47			19.09.16	426.3	170.52	D7	
Ortalama:								419.07	167.63		

Deney Grafiği



Şekil 3.9. D7 serisinin k p beton basınc dayanım grafikleri

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yükü kN.	Basınc Dayanım N/mm ²	Beton Sıcak. �C	Trans. No
1	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	388.	155.2	D8	
2	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	351.4	140.56	D8	
3	25.	125.	311.	2.49			19.09.16	427.6	171.04	D8	
Ortalama:								389.	155.6		

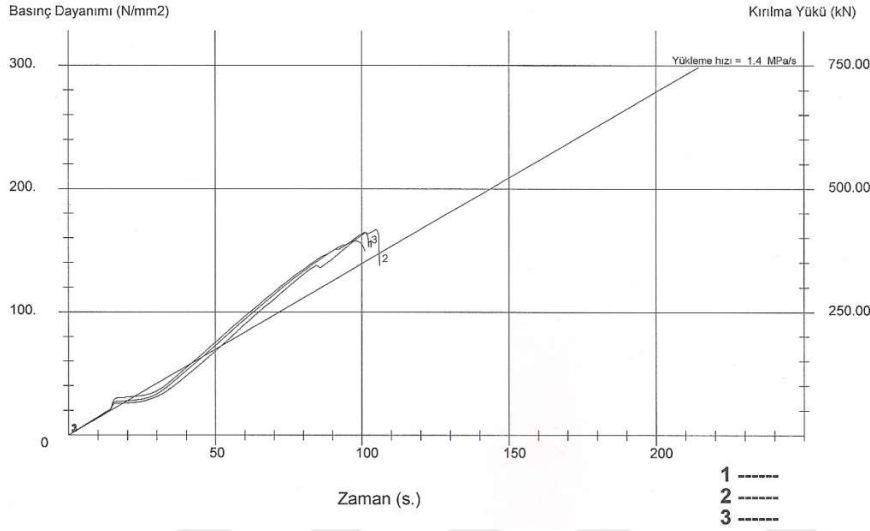
Deney Grafiği



Şekil 3.10. D8 serisinin k p beton basınc dayanım grafikleri

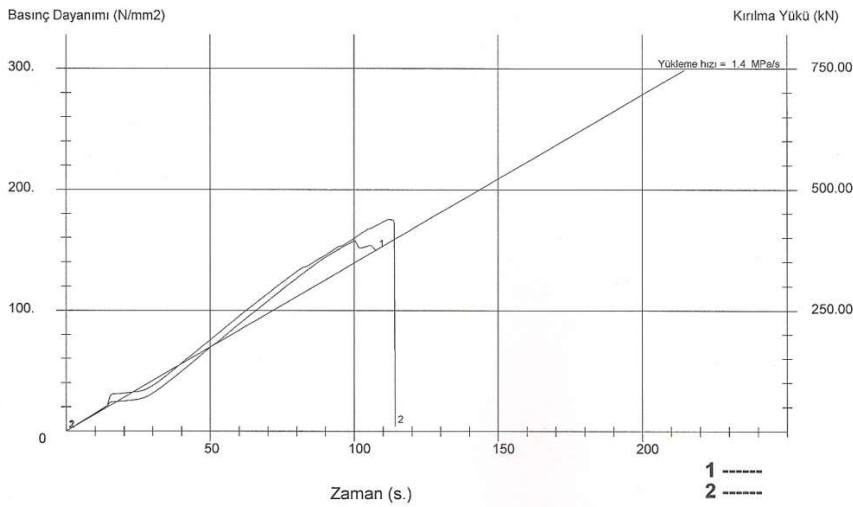
EK-3.(devam) Küp beton numunelerin basınç dayanımları

Nr.	Kesit Alanı cm ² .	Hacim cm ³ .	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanım N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	309.	2.47			19.09.16	396.3	158.52	D9	
2	25.	125.	309.	2.47			19.09.16	419.3	167.72	D9	
3	25.	125.	309.	2.47			19.09.16	413.2	165.28	D9	
Ortalama:								409.6	163.84		

Deney Grafiği

Şekil 3.11. D9 serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

Nr.	Kesit Alanı cm ² .	Hacim cm ³ .	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanım N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	310.	2.48			19.09.16	395.8	158.32	D10	
2	25.	125.	310.	2.48			19.09.16	440.2	176.08	D10	
Ortalama:								418.	167.2		

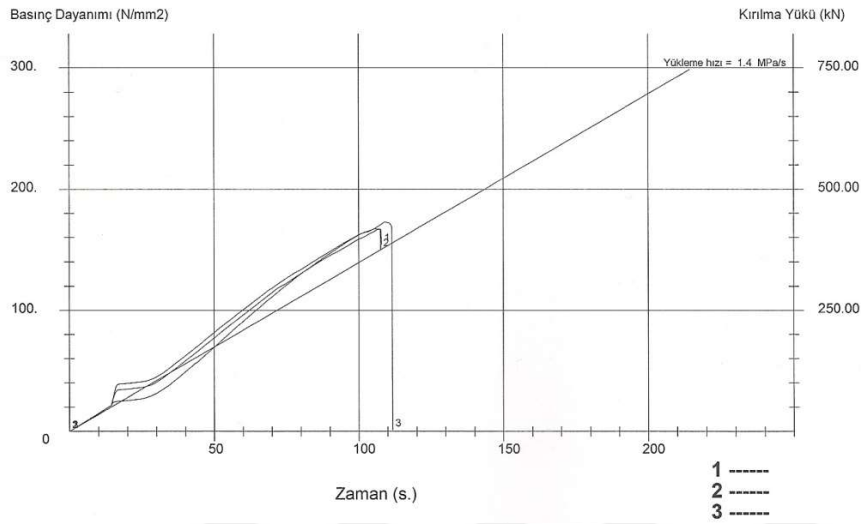
Deney Grafiği

Şekil 3.12. D10 serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

EK-3.(devam) Küp beton numunelerin basınç dayanımları

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	419.1	167.64	D9B	
2	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	420.	168.	D9B	
3	25.	125.	312.	2.5			19.09.16	433.9	173.56	D9B	
Ortalama:								424.33	169.73		

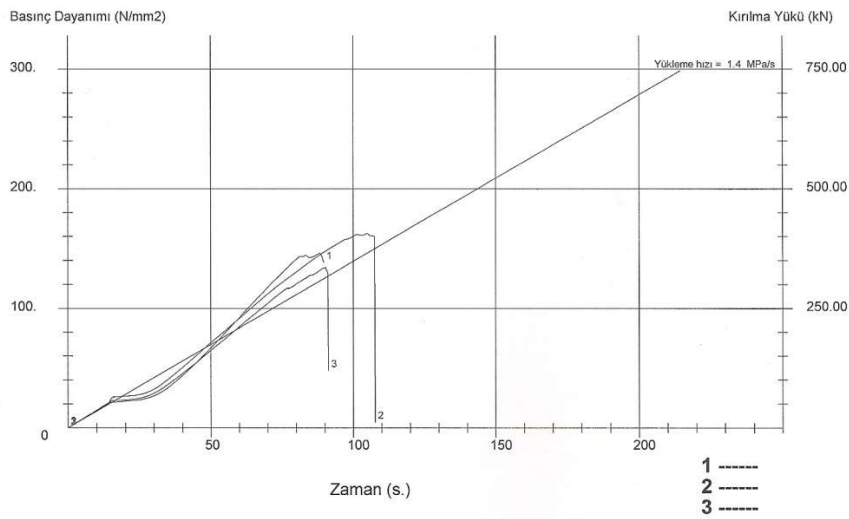
Deney Grafiği



Şekil 3.13. D9b serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağır. kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	310.	2.48			19.09.16	367.2	146.88	D7B	
2	25.	125.	310.	2.48			19.09.16	408.2	163.28	D7B	
3	25.	125.	310.	2.48			19.09.16	336.9	134.76	D7B	
Ortalama:								370.77	148.31		

Deney Grafiği

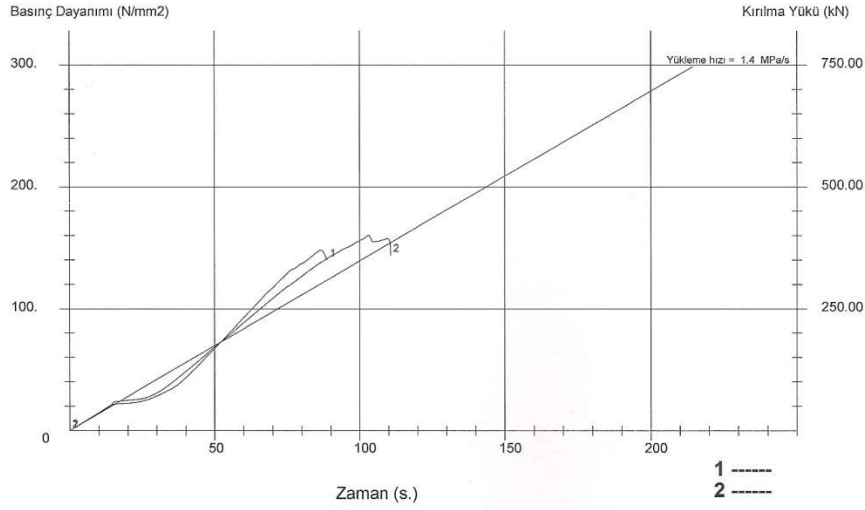


Şekil 3.14. D7b serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

EK-3.(devam) Küp beton numunelerin basınç dayanımları

Nr.	Kesit Alanı cm ²	Hacim cm ³	Ağırlık gr.	Birim Ağırlık kg/dm ³	Num. Yaşı gün	Alınış Tarihi	Test Tarihi	Kırılma Yüğü kN.	Basınç Dayanımı N/mm ²	Beton Sıcak. °C	Trans. No
1	25.	125.	315.	2.52			19.09.16	371.8	148.72	EK	
2	25.	125.	315.	2.52			19.09.16	402.8	161.12	EK	
Ortalama:								387.3	154.92		

Deney Grafiği



Şekil 3.15. Referans serisinin küp beton basınç dayanım grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERKAN, Volkan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.10.1988, Çankaya
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (530) 426 82 93
 e-mail : ins.muh.volkanerkan@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Osmangazi Üniversitesi /İ.M.B.	2011
Lise	75. Yıl Cumhuriyet Lisesi (Y.D.A.)	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-2015	Ö.Y.M. İnş. Turz. Taah. Ltd. Şti.	Saha Mühendisi
2012-2013	Ankara Erdem Yapı Denetim. Ltd.Şti.	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, Fransızca

Yayınlar

1. Erkan V., Arslan A., (2016). *Betonun Çarpma Etkisi Altındaki Davranışının İncelenmesi İçin Yeni Bir Aparat*. 1. Uluslararası Akdeniz Bilim ve Mühendislik Kongresi, ADANA

Hobiler

Fitness, Keman, Satranç



GAZİ GELECEKTİR..