

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BİR BETONUN YÜKSEK GERİNİM
HIZLARINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

AHMET REHA GÜNAY

DOKTORA TEZİ

ANKARA - 2021

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BİR BETONUN YÜKSEK GERİNİM
HIZLARINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

AHMET REHA GÜNAY

DOKTORA TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. SAMİ KARADENİZ

ANKARA - 2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Doktora Programı çerçevesinde Ahmet Reha GÜNAY tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 07 / 01 / 2021

Tez Adı: Çok Yüksek Dayanımlı Bir Betonun Yüksek Gerinim Hızlarındaki Davranışının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)	İmza
Prof. Dr. Sami KARADENİZ, Başkent Üniversitesi
Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI, Başkent Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa KAYA, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Prof. Dr. Bedri TUÇ, Başkent Üniversitesi
Prof. Dr. Ferhat KADIOĞLU, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 14 /01/ 2020

Öğrencinin Adı, Soyadı:Ahmet Reha GÜNAY

Öğrencinin Numarası:21310129

Anabilim Dalı:Makine Mühendisliği

Programı:Makine Mühendisliği.

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Sami KARADENİZ

Tez Başlığı: Çok Yüksek Dayanımlı Bir Betonun Yüksek Gerinim Hızlarındaki Davranışının Deneysel Ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 99 sayfalık kısmına ilişkin, 13/01/2020 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6'dır. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... /

Öğrenci Danışmanı Unvan, Ad, Soyad, İmza:

Prof. Dr. Sami KARADENİZ

Bu tezi neşe ve güven içinde oyun oynamaları gerekirken patlamaların ve yıkık binaların gölgesinde çocukluklarını yaşamaya çalışan savaş mağduru tüm çocuklara ithaf ediyorum.

Ahmet Reha GÜNAY

Ankara – 2021

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kişi ve kuruluşlara içtenlikle teşekkür eder.

Sayın Prof. Dr. Sami KARADENİZ'e (tez danışmanı), çalışmanın sonuca ulaştırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında her zaman yardımcı ve yol gösterici olduğu için...

Sayın Prof. Dr. Faruk ELALDI ve Doç.Dr. Mustafa KAYA'ya, tez sürecinin sürekli takip edilmesi ve fikri katkıları için...

Sayın İlhan ALTINÖZ ve YAPIRAY A.Ş çalışanlarına, beton üretim çalışmalarındaki yardımları için...

Sayın Dr. Hakan HAFIZOĞLU ve TÜBİTAK SAGE Hedef Balistiği ve Tapa Birimi çalışanlarına, deneysel ve analiz çalışmalarındaki yardımları için...

Sayın Mehmet Akif HAMARAT ve TÜBİTAK SAGE Yapım Bakım İşletme Birimi çalışanlarına, tez hazırlanması sürecindeki katkıları için...

Babam Prof. Dr. Cevdet İlhan GÜNAY ve Annem Jale GÜNAY'a, akademik çalışmayı özendirildiği ve katkıları için.....

Eşim Av. İrem SOLMAZ GÜNAY ve canlarım kızım Beyza Alya GÜNAY ile oğlum Arın Mert GÜNAY'a akademik çalışmam süresince manevi olarak sürekli destek oldukları ve hep yanımda oldukları için...

ÖZET

Ahmet Reha GÜNAY

ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BİR BETONUN YÜKSEK GERİNİM HIZLARINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2020

Dünya'daki savaşlarda, askeri unsurlar ve siviller zarar görmektedir. Ülkeler Savunma Sanayii'ndeki yatırımlarını artırmakta, yüksek hız ve tahribatlı mühimmat sistemleri geliştirmeyi sürdürmektedir. Günümüzde, tehditlerin gelişimine paralel olarak korumanında etkin biçimde sağlanabilmesi önemlidir. Bu tez çalışmasında, mühimmat çarpması gibi yüksek hız ve enerjili seyreden dinamik etkiler altında, çok yüksek dayanımlı bir betonun dinamik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenecektir. Normal betonlara kıyasla basınç dayanımı ve dürabiletesi yüksek 135 MPa basınç dayanımına sahip çok yüksek dayanımlı bir beton (ÇYDB) üretilmiştir. Üretilen bu beton, dinamik davranışının bilgisayarlarda benzetiminin sağlanması amacıyla, sayısal olarak modellenmesi ve gerekli malzeme parametrelerinin tespiti için Split Hopkinson Basınç Çubuğu (SHBÇ) test düzeneğinde 353 ila 1288 s⁻¹ gerinim hızlarına erişilerek test edilmiştir. İlave olarak, balistik testlerde kullanılmak üzere 500x500x500 mm ölçüsünde hedef numuneleri üretilmiş ve tungsten ağır alaşımı parça yaklaşık 795-934 m/s hız aralığında ÇYDB hedef yapısına çarptırılmıştır. Deneysel çalışmaların benzetimi ve sayısal çalışmalar için yarı-statik ve SHBÇ testlerinden elde edilen veriler, Matlab programında çok değişkenli regresyon analiziyle değerlendirilmiş ve Holmquist Johnson Cook (HJC) malzeme modelinin parametreleri belirlenmiştir.

Geliştirilen ÇYDB'ye ait Holmquist Johnson Cook (HJC) malzeme modeli kullanılarak bir dizi sayısal analiz gerçekleştirilmiş ve sayısal analiz sonuçları ile çarpma testlerinde elde edilen son hedefin penetrasyon ve krater derinliği, hasar yüzey alanı, delik çapı ölçümleri ve hedef ile çarpan parça görselleri balistik testlerle doğrulanmıştır.

Bu tezle özgün olarak üretilen çok yüksek dayanımlı beton, ses üstü hızlarda ve yüksek tahribat sağlayan mühimmat sistemleri karşısında etkinliğin azaltılması, hasarının minimize edilmesi ve yapılarda korumanın sağlanması amacıyla kullanılarak literatüre katkı sağlayacaktır.

ANAHTAR KELİMELELER: Çok Yüksek Dayanımlı Beton, Split Hopkinson Basınç Çubuğu, Yüksek Gerinim Hızı, Balistik, Parçacıklanma ve Sayısal Analiz.

ABSTRACT

Military elements and civilians are harmed in wars in the world. Countries increase their investments in the Defense Industry and continue to develop high speed and destructive ammunition systems. Nowadays, in parallel with the development of threats, it is important to provide effective protection. In this thesis, the dynamic behavior of a ultra high strength concrete under high speed and energetic dynamic effects such as ammunition impact will be studied experimentally and numerically. A ultra-high strength concrete (UHSC) having 135 MPa compressive strength and higher durability compared to normal concretes was produced. In order to simulate the dynamic behaviour of this concrete numerically on a computer a number of experimentally produced material parameters are required . to generate such data the samples produced from this concrete were tested by reaching strain rates of 353 to 1288 s⁻¹ in a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test rig . In addition, 500x500x500 mm target samples were produced to be used in ballistic tests and the tungsten heavy alloy specimen was impacted to the UHSC target structure in the velocity range of approximately 795-934 m/s. Simulation of experimental studies and data obtained from quasi-static and SHPB tests for numerical studies were evaluated by multivariate regression analysis in Matlab program and parameters of the Holmquist Johnson Cook (HJC) material model were determined.

A series of numerical analysis was carried out using the Holmquist Johnson Cook (HJC) material model of the developed ultra-high strength concrete, and the penetration and crater depth, damage surface area, hole diameter measurements and images of the target and the striking part of the final target obtained in the impact tests were compared with the numerical analysis results. Hence , the numerical model has been verified.

The ultra-high strength concrete produced uniquely in this thesis will contribute to the literature by using it in order to reduce the effectiveness, minimize the damage and protect the buildings against the ammunition systems that provide high damage and at supersonic speeds.

KEY WORDS: Ultra High Strength Concrete, Split Hopkinson Pressure Bar, High Strain Rate, Ballistics, Fragmentation and Numerical Analysis.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLOAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi	2
1.2. Tezin Yapısı.....	3
2. ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BETON GELİŞTİRME ÇALIŞMASI.....	4
2.1. Giriş	4
2.2. Çok Yüksek Dayanımlı Betonla İlgili Genel Bilgiler ve Literatür Özeti.....	4
2.3. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Üretimi	9
2.3.1. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Üretim Malzemeleri Seçimi	9
2.3.2. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Tasarımı.....	11
2.3.3. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Üretim Aşamaları	12
2.3.4. Test Sonuçları ve Değerlendirmeler	14
3. ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BETONUN YÜKSEK GERİNİM HIZLARINDAKİ DAVRANIŞI	17
3.1. Giriş	17
3.2. Betonların Yüksek Gerinim Hızındaki Davranışı ile İlgili Literatür Özeti... ..	17
3.3. SHBÇ Testi Hazırlık Çalışmaları.....	20
3.3.1. Numune Boyutları	21
3.3.2. Numunelerin Hazırlanması	21
3.3.3. Numune Kontrol Çalışmaları.....	23
3.4. SHBÇ Testleri	24
3.4.1. SHBÇ Test Düzenegi ve Çalışma Prensibi	25
3.4.2. Deneysel Çalışma	26
3.4.3. Sonuçlar ve Genel Değerlendirme	31
4. BALİSTİK TEST ÇALIŞMALARI.....	39

4.1. Giriş	39
4.1.1. Balistik Testlerle İlgili Literatür Özeti.....	39
4.2. Balistik Test Hazırlık Çalışmaları	44
4.2.1. Çok Yüksek Dayanımlı Betondan Hedef Numune Üretimi.....	45
4.2.2. Delici Parça Üretimi.....	48
4.2.3. Barut Silahı Test Düzenegi ve Çalışma Prensibi	50
4.3. Balistik Test Çalışması	52
4.4. Balistik Testler ve Değerlendirilmesi.....	53
5. MALZEME MODELİ	63
5.1. Giriş	63
5.2. Holmquist Johnson Cook Malzeme Modeli	63
5.2.1. Dayanım	63
5.2.2. Hasar.....	64
5.2.3. EOS	64
5.3. Model Parametrelerinin Belirlenmesi	65
5.4. Deneysel Verilerin Değerlendirmesi ve Malzeme Parametreleri	66
6. SAYISAL ANALİZ VE DEĞERLENDİRMELER	69
6.1. Giriş	69
6.2. Literatür Özeti	69
6.3. Sayısal Analizler	74
6.4. Sayısal Analiz ve Balistik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	80
7. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMA ÖNERİLERİ	84
7.1. Sonuç Değerlendirmeleri	84
7.1.1. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Gelişimi	84
7.1.2. Çok Yüksek Dayanımlı Betonun Yüksek Gerinim Hızındaki Davranışı	85
7.1.3. Balistik Testler	85
7.1.4. Malzeme Modeli ve Analizler	86
7.2. Gelecek Çalışmalar.....	87
KAYNAKLAR.....	88

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Normal Dayanımlı Betonlar (NDB),Yüksek Dayanımlı Betonlar (YDB) ve RPB'lerin karşılaştırılması.....	6
Tablo 2.2. 135 MPa basınç dayanımına sahip betonun karışım tablosu.....	12
Tablo 2.3. Çok yüksek dayanımlı beton yarı-statik sonuçları.	15
Tablo 3.1. ÇYDB çimento ve agrega mikrosertlik değerleri.....	24
Tablo 3.2. Split Hopkinson Basınç Çubuğu test sonuç tablosu.....	36
Tablo 4.1. Tungsten ağır alaşımları değerlendirme tablosu	48
Tablo 4.2. Tungsten ağır alaşımı mekanik özellikleri tablosu.....	49
Tablo 4.3. Tungsten delici özellikleri.....	50
Tablo 4.4. Tungsten delici özellikleri.....	54
Tablo 4.5. Balistik test sonuç tablosu.....	54
Tablo 4.6. Balistik test sonuç tablosu.....	60
Tablo 5.1. C135 MPa deney parametre tablosu.....	67
Tablo 5.2. ÇYDB'nin parametre tablosu.....	68
Tablo 6.1. Tungsten ağır alaşımı parça Johnson Cook (JC) malzeme modeli parametre tablosu.....	74
Tablo 6.2. Durum denklemi parametre tablosu EOS GRUNIESEN.	75
Tablo 6.3. Analiz sonuç tablosu	78

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Tez akış diyagramı	3
Şekil 2.1. Normal ve yüksek dayanımlı betonların karşılaştırmalı gerilme-şekil değiştirme eğrileri	6
Şekil 2.2. (1) 0-5 mm kum, (2) 5-12 mm ince agrega, (3) 12-19 mm kaba agrega ve (4) 19-25 mm kaba agrega görseli.	10
Şekil 2.3. (a) Curuf Görseli, (b) Süperakışkanlaştırıcı görseli.	11
Şekil 2.4. (a) Etüv görüntüsü, (b) Betoniyer görüntüsü.....	13
Şekil 2.5. (a) Silindir numune alma kalıbı,(b) Kür havuzu.	14
Şekil 2.6. (a) Yarı-statik test düzeneği (b) Silindirik bir numunenin test sonrası görünümü.	14
Şekil 2.7. ÇYDB'nin zamana bağlı yarı-statik bası testi davranışı grafiği.....	15
Şekil 3.1. Farklı yükleme koşullarındaki gerinim hızı değerleri ve test sistemleri.	17
Şekil 3.2. (a) Ø150X300 mm ebadında numunelerden dairesel plak kesimi, (b) Plak görseli.	22
Şekil 3.3. Dairesel plakların 10 mm çaplı numunelerin kesilmesi ve genel görünüm.	22
Şekil 3.4. Test numuneleri (a) L/D = 1,20; (b) L/D = 1,00; (c) L/D = 0,60.	23
Şekil 3.5. Vickers sertlik testi öncesi numunelerin görünümü.	24
Şekil 3.6. SHBÇ test düzeneğinin şematik görüntüsü.	25
Şekil 3.7. 17 numaralı numunenin test öncesi ön, sağ yan, sol yan ve arka yüzey görseli.	27
Şekil 3.8. Numunenin test düzeneğindeki görüntüsü.	27
Şekil 3.9. Bir SHBÇ testinde Voltaj-zaman ilişkisi.....	28
Şekil 3.10. ÇYBD-16'nın SHBÇ test sonuç grafiği- (a) Gerinim zaman ilişkisi; (b) Gerilme zaman ilişkisi; (c) Gerinim hızı zaman ilişkisi; (d) Gerilme gerinim ilişkisi.....	29

Şekil 3.11. ÇYDB-16'nın yaklaşık 960 s^{-1} gerinim hızında dinamik gerilme-gerinim davranışı (a) Mikron saniye aralıkta hızlı kamera ile çekilen davranış görselleri (b) Gerilme-gerinim ilişkisinde görsellerin işaretlenmiş grafiği.	30
Şekil 3.12. ÇYDB 1-5 Gerilme-gerinim ilişkisi.	32
Şekil 3.13. ÇYDB 1-5 Gerinim hızı-zaman ilişkisi.	32
Şekil 3.14. ÇYDB 6-10 Gerilme-gerinim ilişkisi.	33
Şekil 3.15. ÇYDB 6-10 Gerinim hızı-zaman ilişkisi.	33
Şekil 3.16. ÇYDB 11-15 Gerilme-gerinim ilişkisi.	34
Şekil 3.17. ÇYDB 11-15 Gerinim hızı-zaman ilişkisi.	34
Şekil 3.18. YDB 16-21 Gerilme-gerinim ilişkisi.	35
Şekil 3.19. YDB 16-21 Gerilme-gerinim ilişkisi.	35
Şekil 3.20. Boy/Çap oranı ile gerinim hızı ilişkisi	37
Şekil 3.21. Test basıncı-gerinim hızı ilişkisi	38
Şekil 4.1. Patlayıcı kaynaklı parçacık etkinliği	40
Şekil 4.2. (a) Gerilme dalgasına bağlı ilk kırılma, (b) Radyal kırılma,(c) Kabuklaşma,.....	41
Şekil 4.3. Hedef betonu kalıpları görseli.	46
Şekil 4.4. Hedef beton üretimine ilişkin görsel.	46
Şekil 4.5. Kanca görseli.....	47
Şekil 4.6. Hedef betonları görseli.	47
Şekil 4.7. Tungsten alaşımı parça (a) Yan yüzey, (b) Üst yüzey görüntüsü.	49
Şekil 4.8. Barut silahı görseli.....	50
Şekil 4.9. Hedef bölgesi görseli.....	51
Şekil 4.10. Hızlı kamera sistemi.....	52
Şekil 4.11. (a) Sabo görseli,(b)Atış öncesi parça görseli.....	53
Şekil 4.12. Test sonrası tungsten delicinin hasar görüntüsü.....	54

Şekil 4.13. C35/45 hedef betonu test hasar görüntüleri.....	55
Şekil 4.14. Tungsten parçanın test sonrası görüntüsü (a) Yan yüzey, (b) Üst yüzey	56
Şekil 4.15. 5 nolu balistik testin zamana bağlı kaydedilen görüntüleri.....	57
Şekil 4.16. Çok yüksek dayanımlı hedef betonların balistik test sonrası görüntüleri.	59
Şekil 4.17. Hız penetrasyon ilişkisi	61
Şekil 4.18. Hız krater derinliği ilişkisi.....	62
Şekil 6.1. Bazı Eleman geometrileri.....	70
Şekil 6.2. (a) Örnek Lagrange-Lagrange model, (b) Örnek SPH modelleme	71
Şekil 6.3. Modelin Görünüşü.....	75
Şekil 6.4. 790 m/s hızda ve zamana bağlı tungsten parçanın hedefe çarpma prosesinin nümerik görseli.	76
Şekil 6.5. 790 m/s’de koşturulan analizin (a) Penetrasyon derinliği 68,10 mm,(b) Delik çapı 27,20 mm,(c) Krater derinliği 73 mm görseli.	77
Şekil 6.6. Tungsten hız-zaman ilişkisi.....	78
Şekil 6.7. $t=0,22$ ms’de 820 m/s hızda koşturulan analizin sonuç görseli.....	79
Şekil 6.8. 850 m/s hızda koşturulan analizin sonuç görseli.....	79
Şekil 6.9. 930 m/s hızda koşturulan analizin sonuç görseli.....	80
Şekil 6.10. (a) 4 nolu balistik test hasar görüntüsü, (b) 13 nolu sayısal analiz hasar görüntüsü.	81
Şekil 6.11.(a) Orijinal delici , (b) Delici hasar görüntüsü,(c) Sayısal analiz hasar görüntüsü.	82

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ε_T	yükleme gerinim vuruş şiddeti
ε_R	ileten gerinim vuruş şiddeti
E_b	çubuğun elastisite modülü
A_b	çubuğun kesit alanı
c_b	çubukta oluşan dalga hızı
A	dinamik test numunesi alanı
L	dinamik test numesi boyu
μs	mikron saniye
$\dot{\varepsilon}$	gerinim hızı
V_1	çıkış bölgesi hızı
V_2	giriş bölgesi hızı
σ^*	normalize edilmiş gerilme
σ	gerilme
f_c	betonun karakteristik basınç dayanımı
P^*	normalize edilmiş basınç
P	basınç
$\dot{\varepsilon}^*$	normalize edilmiş gerinim hızı
$\dot{\varepsilon}_0$	referans gerinim hızı
T^*	normalize edilmiş çekme gerilmesi
T	betonun çekme gerilmesi
S_{max}	maksimum gerilme
ε_P^f	kırılma anına kadar plastik gerinim
μ_P^f	kırılma anına kadar hacimsel gerinim
$\Delta\varepsilon_P$	efektif plastik gerinim değişimi
$\Delta\varepsilon\mu_P$	plastik hacimsel gerinim değişimi
ρ_0	ilk yoğunluk
ρ	yoğunluk
K	bulk modülü
$P_{bası}$	elastik limitteki basınç
$\mu_{bası}$	elastik limitteki hacimsel gerinim
P_{kilit}	kompakt durumda basınç
μ_{kilit}	kompakt duruma kadar oluşan gerinim
μ_{kilit}	kompakt durumda gerinim
$\rho_{kompakt}$	kompakt durumda betonun yoğunluğu
$\bar{\mu}$	hacimsel gerinim dönüşümü
E_S	statik elastisite modülü
ν	poisson oranı
G	kayma modülü
ε	hata terimi
EOS	Equation Of State
HJC	Holmquist Johnson Cook
EPS _O	HJC malzeme modeli sabiti
$E_{f_{min}}$	HJC malzeme modeli sabiti
MDF	Büyük Boşluklarından Arındırılmış Çimento
DSP	Yoğunlaştırılmış Çimento Sistemler

SİFCON	Çimento Katkılı Lifli Beton
UYPB	Çok Yüksek Performanslı Lifli Beton
NDB	Normal Dayanımlı Betonlar
YDB	Yüksek Dayanımlı Betonlar
RPB	Reaktif Pudra Beton
TÜRKAK	Türk Akreditasyon Kurumu
DAF	Dinamik Artış Faktörü
ÇYDB	Çok Yüksek Dayanımlı Beton
SHBÇ	Split Hopkinson Basınç Çubuğu
SPHB	Split Hopkinson Pressure Bar
ACI	American Concrete Institute
HJC	Holmquist Jhonson Cook
SPH	Smooth Particle Hydrodynamics
CDP	Concrete Damage Plasticity
JH-2	Johnson Holmquist Hasar Modeli
LDPM	Lattice Discrete Particle Model
JC	Johnson Cook

1. GİRİŞ

Günümüzde Savunma Sanayii alanında mühimmat sistemleri geliştirme çalışmalarına yönelik Ar-Ge faaliyetleri hız kazanmaktadır. Bu durumun en önemli nedeni ise ülkelerin ekonomi ve enerji gibi temel alanlarda varlık gösterebilmesine olanak sağlamak için savunma alanında öncü olma istekleridir. Bu sebeple, Dünya’da Endüstriyel ve Savunma Sanayii alanlarında araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Ülkemizde son yıllarda kazandığı ivme ile sivil, askeri sistemlerinin tasarımı ve üretimi konusunda bilgi, belge ve doküman üretme çalışmalarında hayli mesafe kat ederek ürünler geliştirmektedir. Birçok gelişmiş ülke, sanayilerindeki gelişime paralel olarak stratejik öneme sahip tesisler ve altyapılar kurmaktadır. Bu tesisler şüphesiz ki önemli amaçlara hizmet eden sistemleri bünyelerinde barındırmaktadır. Yatırımlar ise büyük ölçekli ve yüksek maliyetlere katlanılarak hayata geçirilmektedir. Enerji alanında nükleer santraller, barajlar, ulaşım alanında geniş açıklıklı köprüler, demiryolu sistemleri, tüneller ve savunma alanında harekât kontrol merkezleri, askeri karargâhlar, sığınak yapıları, yüksek maliyetli yatırımlara örneklerdir. Yapılar ise çeşitli doğa olayları ve dış tehditlerin etkisi altında yer almaktadır. Bu sebeple kritik öneme sahip tesisler korunmalıdır. Korumanın sağlanması ve tehditlerin bertaraf edilmesi için yapının kurulum aşamasında geleneksel yöntemlerin aksine günümüz teknolojisine uygun çözümlere odaklanmak gereklidir.

Birçok kritik tesisin yapımı için kullanılan temel yapı malzemesi betondur. Diğer yapı malzemelerine kıyasla beton sağladığı ekonomik avantajlar sebebiyle tercih edilmektedir. Geçmişten günümüze kullanılan beton, özellikle son yıllarda tasarım, üretim yöntemlerinin gelişimi ve son teknoloji ekipmanlar kullanımı ile birlikte yüksek nitelikli yapı malzemesi halini almıştır. Betonlar dayanım sınıflarına göre normal, yüksek ve çok yüksek dayanımlı olarak gruplandırılmaktadır. Dünya üzerinde bu konuda genel bir mutakabata varılmamış olmakla birlikte, bası dayanımı 60 MPa kadar olan betonlar normal dayanımlı beton (NDB), 60-120 MPa arası yüksek dayanımlı beton (YDB) ve 120 MPa ile üzeri dayanımda yer alan betonlar çok yüksek dayanımlı beton (ÇYDB) olarak sınıflandırılmaktadır.

Beton üzerine gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmaları genellikle dayanım ve dürabilite koşullarının iyileştirilmesine yöneliktir. Birçok araştırmacı çalışmalarında, betonun yarı-statik (statiğe benzer, sanki statik) 10^{-5} - 10^{-6} s⁻¹ gerinim hız aralığındaki davranışlarını gözlemlemişlerdir. Yüksek gerinim hızlarında oluşan dinamik etkiler altındaki davranış üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. Zira beton yaşam döngüsü

boyunca sadece statik yükleme koşullarına maruz kalmaz. Aynı zamanda rüzgâr, deprem, fırtına ve sel vb. doğal afetlerle oluşan dinamik etkilere de karşı koymaktadır. İlâveten doğal afetler dışında insan faktörü ile oluşabilen dinamik etkiler de betonun hasarına yol açmaktadır. Bu duruma en iyi örnek ise mühimmat sistemlerinin sebep oluşturduğu parçacıklanma ve darbe basıncı etkileridir. Dinamik etkilerin beton üzerindeki sağladığı hasarı belirlemek, önlem alabilmek için malzeme davranış biçimi ve özelliklerinin kavranması gereklidir.

Olağan yükler dışında yapıların davranışının belirlenmesine yönelik araştırma çalışmalarında [1,2] malzeme ölçeğinde çok yüksek dayanımlı betonun dinamik davranışının belirlenmesi sonucu, yapı tasarımlarında hesap güvenilirliği artacaktır. Bu sebeple yüksek hız ve enerjili seyreden olayların oluşturduğu dinamik etkilerin, betonda yansımalarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, mevcut yapıların iyileştirilmesi ve yeni yapıların güvenli tesis edilmesine yönelik önemli katkılar sunacaktır.

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

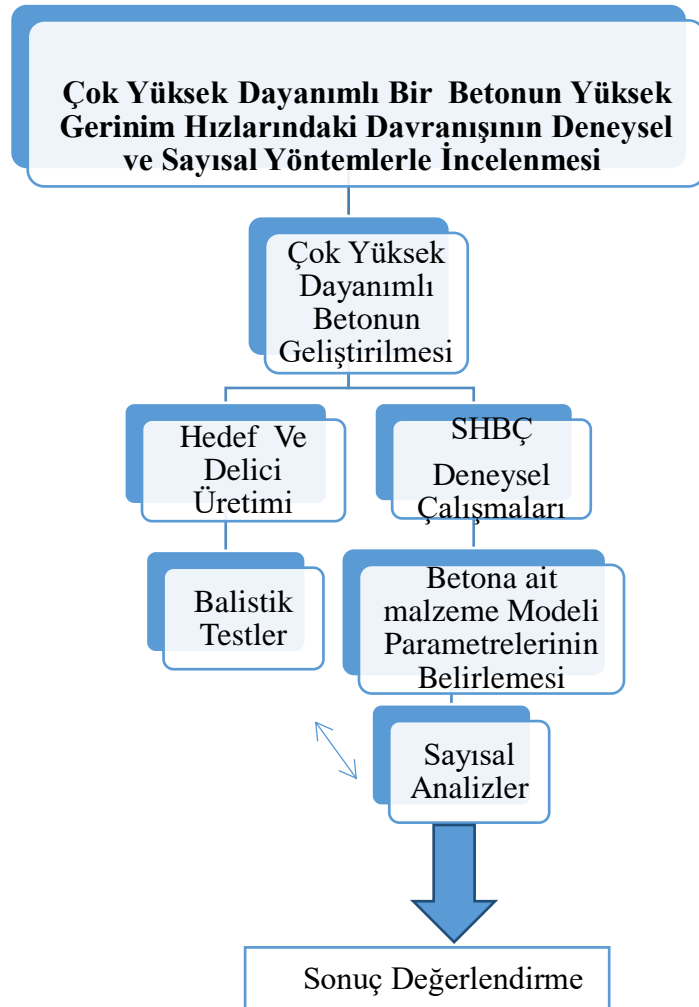
Bu tez çalışması, ses üstü hızlarda gerçekleşen çarpma olaylarında ve özellikle parçacıklanma etkisi altında, çok yüksek dayanımlı betonun davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Yapılacak çalışmada çok yüksek dayanımlı beton üretimiyle dinamik performans belirleme çalışmaları, laboratuvar ölçeğinde SHBÇ ve büyük ölçekli olarak balistik testlerle deneysel ölçüde sağlanacaktır. Sayısal çalışma ile balistik testler doğrulanarak üretilen çok yüksek dayanımlı betonun dinamik performansı gözlemlenecektir.

Dünya’da ve ülkemizde beton üzerine yapılan araştırma çalışmalarında, betonların dinamik davranışının deneysel ve sayısal olarak incelendiği görülmektedir. Sayısal çalışmalar literatür kaynaklarının deneysel verileri ile, deneysel çalışmalar ise sonuç paylaşımı şekliyle sunulmaktadır. Ayrıca deneysel çalışmaların genellikle, küçük ölçekli üretimle laboratuvar koşullarında gerçekleştirildiği ve endüstriyel uygulamalarla desteklenmediği görülmektedir. Malzeme geliştirmede dâhil olmak üzere bir bütünün parçası olan değerlendirme başlıklarında birçok araştırmacı kendisine ait olmayan verileri devreye alarak çalışmalarını sonuca ulaştırmışlardır. Hâlbuki çalışmalardaki hatalar gerçekleştirilen çalışmaya özgüdür. Hataları tespit etmeden sağlanan ilerleme ise yanılgı oluşturmaktadır. Bu tezin önemi ise bu noktada göze çarpmaktadır. Malzemenin gelişimi,

deneysel ve sayısal olarak incelenmesine ilişkin tüm bölümler bu tez çalışmasının kapsamı içerisinde gerçekleştirilmeye çalışılacaktır.

1.2. Tezin Yapısı

Tezin İkinci Bölümünde çok yüksek dayanımlı betonun gelişim süreçleri, Üçüncü Bölümünde yüksek gerinim hızlarında beton davranışlarının belirleme çalışmaları kapsamında Split Hopkinson Basınç Çubuğu (SHBÇ) düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, Dördüncü Bölümünde balistik test çalışmaları, Beşinci Bölümünde malzeme modeli parametre belirleme çalışmaları, Altıncı Bölümde sayısal analiz çalışmalarına yer verilmiştir. Yedinci Bölümde deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar literatürde yer alan sonuçlarla kıyaslanarak tüm sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir. Tezin akış diyagramı Şekil 1.1'de yer almaktadır.



Şekil 1.1. Tez akış diyagramı

2. ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BETON GELİŞTİRME ÇALIŞMASI

2.1. Giriş

Bu bölümde, literatür özeti, çok yüksek dayanımlı beton geliştirme kapsamında üretimde kullanılan malzemelerin seçimi, karışım hesaplamaları, yarı-statik testler ve sonuçlarına ait bilgilere yer verilecektir.

2.2. Çok Yüksek Dayanımlı Betonla İlgili Genel Bilgiler ve Literatür Özeti

Beton yaklaşık olarak değişik şekillerde ve genel manada 5000 yılı aşkın süredir hayatımızda yer almaktadır. Eski Mısırlılar kil harcını piramitlerin yapımında, harç kireç taşının (CaCO_3) ısıtılması ve karbondioksit gazının (CO_2) çıkarılması ile elde etmişlerdir. Elde edilen kireç, agrega ile karıştırılarak harç olarak kullanılmış ve daha sonra CO_2 olarak sertleşen yapı orijinal CaCO_3 veya kireç taşına çevrilmiştir. Su ile sertleşen hidrolik çimentonun bulunuşu ise Romalılara kadar uzanmaktadır. Romalılar kireç hamurunu, puzolanik volkanik küle karıştırmışlardır. Bu amorf silisten oluşan puzolan, suyun mevcudiyetinde yer alan alkali ile kimyasal olarak reaksiyona girerek silis jeli olarak sertleşir ve kullanıma hazır hale gelir [3].

Tarihsel gelişimi sonucunda, günümüzde beton çimento, su, agrega ve bazen de katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup şekil verilebilen ve zamanla katılaşıp sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesi olarak tanımlanabilir [4].

Birçok ülke 1900'lü yılların sonrasında hazır beton teknolojisinin kullanıma öncelik vermiştir. Ülkemizde hazır beton üretimine 1976 yılında başlanmıştır. Günümüzde beton üretim teknolojisi hızla gelişmektedir. Betonda en önemli performans ölçüm kriteri ise basınç dayanımıdır. Üretimde 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek basınç dayanımı 15-25 MPa civarındayken 1970'li yıllarda yüksek katlı yapılarda kolon yüklerinin temele taşıtılabilmesi için 40-50 MPa beton basınç dayanımlarına ulaşılmıştır [5]. Basınç dayanımlarının artmasıyla birlikte gelişim devam etmiş ve kullanım alanları artmıştır. Zaman içerisinde dayanımları artan bu betonlara yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman yapısı vb. uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [6]. Yakın geçmişten günümüze kadar geçen sürede yüksek ve çok yüksek dayanımlı betonların kullanımında belirgin seviyede artış gözlemlenmiştir. Çok yüksek dayanımlı betonların gerek beton, gerekse prefabrikasyon sektöründe kullanım yoğunluğu 1985 yılından sonra artmıştır [7,8].

Yeni yapıların yanı sıra mevcut yapılarda onarım ve güçlendirme faaliyetlerinde de çok yüksek dayanımlı betonlar kullanılmaktadır. Onarım ve güçlendirme; mevcut yapının performansını arttırmaya yönelik çalışmalar ve yoğunlukla taşıma kapasitesini yükseltmek olarak ifade edilebilir [9]. Bu tip betonlar (kendiliğinden yerleşen beton vb.) geçmiş dönemde inşa edilen yapıların onarım ve güçlendirmesi için tarihi yapılarda, otoyollarda, köprü ve viyadüklerde, trafik yoğunluğunun artması, trafik yüklerinin arttırılması gibi nedenlerle kullanılmaktadır.

Beton dayanım değerlerine göre;

- Normal betonlar, (NB)
- Yüksek dayanımlı betonlar,(YDB)
- Çok yüksek dayanımlı betonlar,(ÇYDB)

şeklinde sınıflandırılabilir.

Normal betonlar; temel malzemeler (çimento, agrega, su ve belirli katkılar) kullanılarak üretilen ve 20-60 MPa basınç dayanımına sahip yapı malzemesi olarak ifade edilebilirler. Standart üretim koşullarına bağlı olarak üretilmekte ve kolay ulaşılabilir seviyede yer almaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar, normal betonlara kıyasla erken dayanım ihtiyacı oluşabilen ve servis ömrünün uzun olması istenen yapılarda sağladığı avantajlar sebebiyle tercih edilmektedir. Bu tür betonların basınç dayanımları yanında Elastisite Modüllerinin de geleneksel betonlara göre yüksek olması sebebiyle, yapılarda daha küçük kesitli (narin) eleman kullanımına olanak sağlamaktadır [10]. Yüksek dayanımlı beton dayanımı 60-115 MPa aralığında yer almaktadır. Bu tip betonlarda dayanımın artırılması için boşluksuz yapı elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple boşlukların kapatılması için mikrosilisler kullanılmaktadır. Ayrıca bu tip betonlarda basınç dayanımının artmasına paralel olarak çekme dayanımı ve enerji yutma kapasitesinde de artış göstermesine olanak sağlanabilmektedir. Son olarak çok yüksek dayanımlı betonlar ise özellikle yeni çimento teknolojisi kullanılarak üretilen betonlardır. İçeriğinde bulunan çimentonun kimyasal özellikleri iyileştirilerek 200-800 MPa basınç dayanımına sahip çok yüksek dayanımlı bu betonları üretebilmek mümkündür [9]. Çok yüksek dayanımlara erişebilmek üzere kullanılan malzeme ve sistemler aşağıda yer almaktadır. Bunlar;

- Büyük boşluklarından arındırılmış (MDF),
- Homojen dağılı çok incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP),
- Çimento bulamacı enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON)

- Çok yüksek performanslı lif takviyeli betonlar (UYPB)

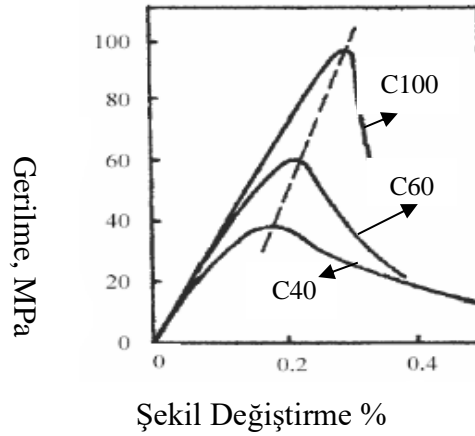
şeklinde verilebilir.

Betonların gösterdiği performansa göre sınıflandırılması Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Normal Dayanımlı Betonlar (NDB),Yüksek Dayanımlı Betonlar (YDB) ve RPB’lerin karşılaştırılması [11].

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç Dayanımı (MPa)	20-60	60-115	200-800
Eğilme Dayanımı (MPa)	4-8	6-10	50-140
Kırılma Enerjisi (Joule/m ²)	100-120	100-130	10000-40000
Elastisite Modülü (GPa)	20-30	35-40	60-75

Beton dayanımlarının artırılması ağır yapılarda yükün hafifletilmesi, uzun servis ömrü ve anlık yüklere karşı avantaj sağlamaktadır. Ancak dayanımın artması gevrek yapıdaki betonun kırılma yönündeki davranışını da aynı orantıda artırmaktadır. Betonun şekil değiştirme kapasitesi (sünekliği) ise bu durumda azalmaktadır. Bu sebeple sünekliğin korunabilmesi için yüksek dayanımlı betonların üretiminde çelik tel ve fiber katkıları kullanılmaktadır. Dayanım artışıyla C40, C60 ve C100 betonların şekil değiştirme değişimi Şekil 2.1’de ifade edilmektedir.



Şekil 2.1. Normal ve yüksek dayanımlı betonların karşılaştırmalı gerilme-şekil değiştirme eğrileri [12].

Genel tanımı verilen yüksek performanslı betonların üretim koşulları normal betonlara göre farklılıklar göstermektedir. Yüksek ve çok yüksek dayanımlı beton iyi kaliteli çimento ve agrega ile süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı gerektiren, su/çimento oranını 0,20 mertebelerine kadar düşürülerek basınç dayanımının 100 N/mm² mertebelerine çıkarıldığı halde yüksek işlenebilirliğini ve pompalanabilirliğini koruyan özel bir beton türüdür [13]. Bu tür betonların üretiminde normal beton üretimine oranla üretim şartları iyi denetlenmeli, kaliteli malzeme kullanılmalı ve işçilik düzgün olmalıdır.

Yüksek ve çok yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan başlıca bileşenler;

- Çimento,
- Agrega (kaba, ince),
- Su,
- Süperakışkanlaştırıcı,
- Mikrosilislerdir.

Betonun dayanımı büyük ölçüde karışımda kullanılan çimento ve agrega tarafından belirlenmektedir. Başka bir ifade ile bireysel olarak iki malzemenin dayanımı arasında yer alan değer betonun dayanım değerini oluşturmaktadır.

Yüksek ve çok yüksek dayanımlı betonun dayanımına etki genel olarak;

- Çimento hamurunun boşluk yapısı,
- Agreganın özelliği,
- Agrega çimento hamuru geçiş bölgesi özelliklerine,

bağlı olarak ifade edilmektedir [13].

Beton kompozit bir malzemedir. Ancak betonun dayanım değerinin artırılması tek başına çimento ve agreganın dayanım değerlerine bağlı değildir. Malzemeler arasındaki kimyasal reaksiyon uyumu, kaliteli malzeme (çimento, süperakışkanlaştırıcı vb.) ve işçiliğe bağlı olarak dayanım değerlerinde değişkenlik görülebilmektedir. Yüksek ve çok yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılacak çimento yüksek kaliteli fiziksel ve kimyasal testleri yapılmış çimento (portland çimento) olmalıdır [14]. Üretimde beton hacminin yaklaşık olarak %70-75'lik kısmını agregalar oluşturmaktadır. Agregalar bazalt, granit, kireç taşı ve kalker gibi türler halinde beton üretimlerinde kullanılmaktadır. Bazalt agregaların yalın halde dayanım değerlerinin yüksek olması sebebiyle yüksek dayanımlı beton üretimlerinde tercih edilmektedir. Ancak agregalar doğadan temin edilmesi sebebiyle, çıkarıldığı bölgede var olan şartlara bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. Örnek olarak, bir bölgede çıkarılan bazalt agrega başka bir bölgeden temin edilen daha kaliteli kireç taşı agregasından daha

düşük dayanım değerlerine sahip olabilir. Bu durumda, üretimde malzemenin sadece türü değil kalitesi de önemli rol oynamaktadır. Ayrıca yüksek ve çok yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılacak agrega boyutlarında, en büyük dane boyutunun 22-25 mm' den büyük ve 9,5 -12,7 mm' den küçük olmamasına, agreganın ideal granülometri dağılımına sahip ve toplu şekilde olmasına dikkat edilmelidir [13].

Agregaların yalın halde dayanımları ve boyutları dışında reaksiyon içindeki davranışları da önemlidir. Agrega seçiminde temiz ve su emme gereksinimi az olan malzemeler seçilmelidir.

Yüksek ve çok yüksek dayanımlı betonun üretiminde yer alan diğer önemli parametre su/çimento oranıdır. Bu tip betonlarda su/çimento oranı 0,20 veya daha düşüktür. Çok yüksek dayanımlı beton üretimi çalışmalarında su/çimento oranının düşük olması betonun işlenebilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu sebeple, üretimde kullanılan su ve süperakışkanlaştırıcı iyi oranlanmalıdır. Su özellikle, çimentoda bulunan kimyasallarla reaksiyona girmekte ve beraberinde betonun işlenebilirliği üzerinde etkin rol oynamaktadır. Suyun fazla kullanılması ise, yapıdaki boşlukların artmasına ve dayanımın düşmesine sebep olmaktadır. Üretimin ihtiyaç duyduğu suyun miktarının azaltılması ve kimyasal reaksiyonlardaki başarının artırılabilmesi için yüksek su indirgeyen süper akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır.

Süper akışkanlaştırıcılar içeriklerine göre;

- Yoğun melarnin formaldahid sülfonatlar,
- Yoğun naftalin formaldahid sülfonatlar,
- Modifiye edilmiş linyosülfonatlar,
- Çökme kaybını önleyici maddeler karıştırılarak üretilenler,

olarak sınıflandırılabilirler [14].

Normal dayanımlı betonlarda çimento hamuru ve agrega arasında boşluklar fazla miktarda bulunmaktadır. Çok yüksek dayanımlı betonlarda boşlukların azaltılması gereklidir. Normal dayanımlı betonlarda kapiler ve toplam boşluk oranı %8,3 ve %15'ken çok yüksek dayanımlı betonlarda %1,5 ve %6 değerini almaktadır [15]. Üretimde çimento ve agrega arasındaki boşlukların doldurulması işlemi mikrosilisler tarafından sağlanmaktadır. Mikrosilis malzemeler çimento ile agrega arasındaki boşlukları kapatarak yapıyı kuvvetlendirirler. Özellikle boşlukların uygun malzeme ile doldurulması çimento hamurunun topaklanmasını önlemektedir [16]. Üretimlerde sıklıkla uçucu kül, curüf veya silis dumanı gibi mikro silisler kullanılmaktadır. Mikro silisler ayrıca puzzolanik etki

oluştururlar. Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az olan, fakat ince taneli durumdayken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özeliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemelerdir [17]. Üretimde kaliteli ve denetlenebilir malzeme seçimi kadar üretimdeki işçilik ve kür çalışmaları da önemlidir. Genellikle üretimde vibrasyon sağlayan modüler ekipmanlar (vibratör, tokmak, vibrasyon masası vb.) kullanılmalıdır. Betonun kalıplara uygun bir biçimde (içinde boşluk kalmayacak şekilde) yerleştirilmesi önemlidir. Yerleştirme çalışmaları sonrasında beton kür işlemine tabii tutulmalıdır. Özel bir şart bulunmuyorsa (erken dayanım eldesi vb.) genellikle sertleşmiş beton numuneler 28 günlük dayanım sonucu alınana kadar 24°C oda sıcaklığında içi su dolu kür havuzlarında bekletilmelidir.

2.3. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Üretimi

Üretime başlangıç aşamasında laboratuvar araştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Üretimlerin belgelendirilmiş laboratuvarlarda yapılmasının sonuçlara sağlayacağı katkılar yatsınamaz. Bu sebeple, üretimler TÜRKAK tarafından Akredite edilmiş olan, Afyon İli, İhsaniye ilçesinde konumlanan YAPIRAY A.Ş firmasına ait beton laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Normal beton sınıfında yapılacak üretimler için çok sayıda beton reçetesi bulunmaktadır. Çok yüksek dayanımlı beton üretiminde ise aynı durum geçerli değildir. Bu nedenle, üretim bilgi ve tecrübe ile tekrarlı deneme üretimlerinin yapılması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Zira karışım hesapları yapılırken bulunması gerekenden fazla malzeme kullanılması dayanım değerlerini olumsuz olarak etkilemektedir. Çok yüksek dayanımlı beton üretimi için 135 MPa (silindirik basınç dayanımı) ve üzerinde değerlere erişebilmek hedef kriteri olarak belirlenmiştir.

2.3.1. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Üretim Malzemeleri Seçimi

Başlangıç aşamasında kaliteli ve denetlenebilir malzeme seçimine öncelik verilmiştir. Beton içeriğinde hacimce en yüksek oranda bulunan agregaların seçimi ile çalışmalara başlanmıştır. Agregalar genellikle üretim yapılan bölgelerden temin edilmektedir. Bu sebeple bölgede yer alan tedarikçi firmalar olan Doğan Yapı, Eray Bazalt ve Haz Betona ait agregalara laboratuvar test sonuçları temin edilerek malzemenin kalitesi hakkında bilgiler edinilmiştir. Agregaların seçimi aşamasında su emme gereksiniminin çok düşük olmasına, bünyesinde kil, silt gibi malzemelerin bulunmamasına ve kirli olmamasına özen

gösterilmiştir. Agregalar için sırasıyla iki tip ince agrega 0-5 mm kum, 5-12 mm, 12-19 mm ve 19-25 mm kaba kireç taşı agrega tipinin belirlenmesi ile seçim gerçekleştirilmiştir.

Üretimde kullanılan agregalara ilişkin görsel Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. (1) 0-5 mm kum, (2) 5-12 mm ince agrega, (3) 12-19 mm kaba agrega ve (4) 19-25 mm kaba agrega görseli.

Agrega kadar betonun dayanımında etki eden çimento malzemesi için Afyon Çimento CEM I 52.5 N seçilmiştir. Çok yüksek dayanımlı beton üretiminde çimento ile agrega arasında oluşabilecek boşlukların kapatılması önemlidir. Bu tip boşluklar dayanımın düşmesine neden olabilmektedir. Üretimde bu açığın kapatılması ve boşluksuz kompakt yapı elde edilmesi için mikrosilis malzeme kullanılmıştır. Mikrosilis malzemeler öğütülmüş yüksek fırın cürufu olarak belirlenmiş ve KARÇİMSA firmasından temin edilmiştir. Çok yüksek dayanımlı beton üretiminde su/çimento oranının 0,20 ve daha düşük mertebelerde olması beklenmektedir. Bu halde dökümü sağlanan betonun işlenebilirliği zor ve zahmetlidir. İşlenebilirliğin artması için yüksek su indirgeyiciler (süper akışkanlaştırıcılar) üretimde kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcılar üretimde kimyasal reaksiyona girerek su ihtiyacını minimize ederek kıvam ve işlenebilirliği artırmaktadır. Üretimde Polisan ürünleri süper akışkanlaştırıcılar kullanılmıştır. Cüruf ve süperakışkanlaştırıcıların görseli Şekil 2.3’de yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.3. (a) Curuf Görseli, (b) Süperakışkanlaştırıcı görseli.

Arıtılmamış halde temin edilen kuyu sularının içinde kimyasallar bulunabilir. Planlama dışında karışıma dahil olan kimyasallar ise beton üretiminde farklı reaksiyonları tetikleyerek sonuçları anlamsızlaştırabilir. Bu sebeple üretimde şebeke suyu kullanılmıştır.

2.3.2. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Tasarımı

Malzemelerin seçilmesi sonrası hedeflenen dayanıma erişilebilmesi için karışım hesaplamalarıyla ilişkili olan tasarım faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Beton karışım hesabı için karışım tablosu oluşturulmuştur. Öncelikle teorik bilgiler ile hesaplamalar, dayanım tahminleri ve sonrasında deneme üretimleri hayata geçirilmiştir. Bu süreçte tasarım ve üretim kısa dönem aralığında birbirini takip ederek sürdürülmüştür. Sırasıyla, karışım hesabı gerçekleştirilmiş, beton üretilmiş ve sertleşmesi sonrası belirlenen takvim aralığında yarı-statik testler gerçekleştirilmiştir. Tasarıma uygun üretilen betonlar üretimde zaman kazanmak için üretim sonrası beton 1, 3, 7 günlükken kırım testlerine tabii tutulmuşlardır. Betondaki dayanım eğrisi kontrol edilerek, dökümün nihai dayanım hedefine ulaşım ulaşamayacağı yönünde ön değerlendirmelerde bulunulmuştur. Kısa zaman aralıklarında deneme çalışmalarının tekrarlanması sebebiyle, beton hızlı kür uygulamalarına (buhar odasında bekletilmesi vb.) tabii tutulmuştur. Yapılan 20 adet deneme üretimi sonucunda 135 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Numunelerin içeriğinde yer alan malzemeler ve 1 m^3 üretimde hacimce kütleli bilgileri ve oranlar Tablo 2.2'de yer almaktadır.

Tablo 2.2. 135 MPa basınç dayanımına sahip betonun karışım tablosu.

Malzemeler	Yoğunluk (kg/m ³)	Oran (%)
Çimento	450	
Cüruf	45	
Kum (0-5 mm)	39	
Kireç taşı (5-12 mm)	33	
Kireç taşı (12-19 mm)	16	
Kireç taşı (19-25 mm)	12	
Su/Çimento		13
Süperakışkanlaştırıcı		2,5

Tablo 2.2’de yer alan değerler incelendiğinde, üretimde ağırlıkça çimentonun %10’u kadar mikrosilis kullanımı ile agrega ve çimento arasındaki mikro boşlukların kapatılması hedeflenmiştir. Tasarımda agregalar iki sınıf halinde ince ve kaba agrega olarak kullanılmıştır. Özellikle 19-25 mm dağılım granülometrisine sahip kaba agregaların dayanımın artırılması yönünde olumlu katkılar sağladığı değerlendirilmektedir. Kıvamı sağlamak üzere su/çimento oranı %13 mertebesinde gerçekleşmiş ve işlenebilirliğin sağlanması için toplam hacmin %2,5 seviyesinde süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

2.3.3. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Üretim Aşamaları

Malzemelerin seçimi ve tasarım hesaplamalarının gerçekleştirilmesi sonucu çok yüksek dayanımlı nihai beton üretim çalışmalarına başlanmıştır. İlk fazda agregalar hazırlanmıştır. Üretimin yapıldığı yer aynı zamanda fabrika olması sebebiyle dış ortam koşullarında bekletilen agregalar yağmur, kar vb. dış etkenlere maruz kalmıştır. Üretimden önce su muhtevalarının azaltılması için agregalar laboratuvar ortamında etüvde kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Agregalar etüvden çıkarılarak bir süre bekletilmiş, tasarım hesabına göre tartılmış ve betoniye yerleştirilmiştir. Agregaların yerleştirilmesi sonrasında tasarım hesap miktarlarına uygun olarak çimento ve cüruf eklenerek kuru karışımın hazırlanması için betoniye çalıştırılmıştır. Üretim ekipmanları olan etüv ve betoniye görseli Şekil 2.4’de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.4. (a) Etüv görüntüsü, (b) Betoniyer görüntüsü.

Betoniyerin yaklaşık bir dakika çalıştırılması sonrası kuru karışımın oluşumu gözlemlenmiştir. Kuru karışıma kıvam verilmesi için süper akışkanlaştırıcı ve su tasarımı hesabına uygun, çimentoda yaşanabilecek topaklaşmanın önlenmesi için kademeli olarak ilave edilmiştir. Kıvamın sağlanması için yaklaşık 3-4 dakika betoniyerde karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Oluşumun tamamlanması sonrası, çok yüksek dayanımlı betonun slump (kıvamı) değeri yaklaşık 0-1 arasında ölçümlenmiştir. İlaveten beton kısa sürede sertleşme eğiliminde davranış göstermiştir. Betoniyerde üretilen beton hızlı biçimde kürek yardımı ile Ø150X300 mm ebatlarında olan silindir numune kalıplarına yerleştirilmiştir. Ancak ilk safhada numune kalıbının içinde betonun boşluksuz dağılım gösterebildiğini söylemek mümkün değildir. Düşük işlenebilirliğin negatif etkilerinin ortadan kaldırılmasına yönelik olarak, kalıplar titreşim tezgâhının üzerine alınmış vibrasyonla üç aşamalı olarak ve ara katmanlarda sürekli tokmaktama çalışması gerçekleştirilerek yerleştirilmiştir. Silindir kalıplara yerleştirilen numuneler bir saat süre ile sertlik kazanması için üretim alanında bekletilmiştir. Göreceli olarak sertleşen beton, kalıpların içinde farklı bir bekleme alanına alınmış ve yaklaşık bir gün sonra tamamen sertleşen numuneler kalıptan çıkarılarak test gününe kadar bekletilmek üzere kür havuzuna aktarılmıştır. Numuneler 24 °C ve %97 nem oranına sahip ortamda kür işlemine tabii tutulmuştur. Üretimde kullanılan metal silindir numune alma kabı ve sertleşmiş çok yüksek dayanımlı betonların bekletildiği kür havuzu Şekil 2.5'te yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.5. (a) Silindir numune alma kalıbı,(b) Kür havuzu.

Numuneler kür havuzundan teste tabi tutulacakları gün ve saatte alınmış ve kuruması için laboratuvar ortam şartlarında bekletilmişlerdir. Tamamen kuruyan numuneler kırım için beton presinde teste tabii tutulacaktır.

2.3.4. Test Sonuçları ve Değerlendirmeler

Üretimi tamamlanan numunelerin yarı-statik testleri laboratuvarda bulunan universal beton presinde $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği ve bir numunenin test sonrası görüntüsü Şekil 2.6'de yer almaktadır.



(a)



(b)

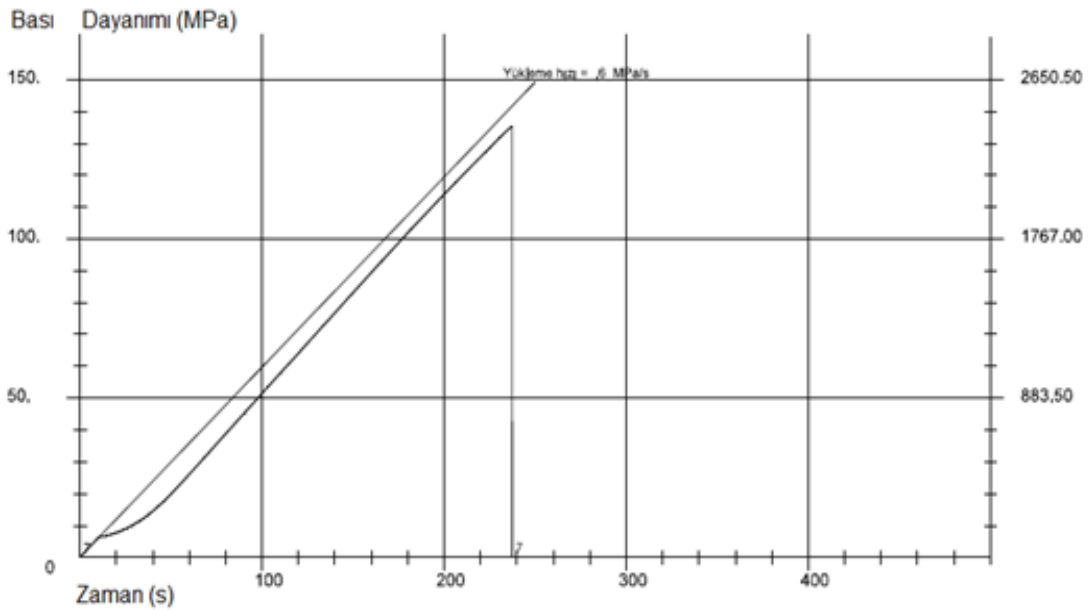
Şekil 2.6. (a) Yarı-statik test düzeneği (b) Silindirik bir numunenin test sonrası görünümü.

ÇYDB'nin nihai üretimlerindeki dayanım aşamalarını gözlemlemek için her bir üretimde 1. ,7. ,28. ve 56. günlerde test yapabilmek üzere toplamda 12 adet şahit numune alınmıştır. Alınan numuneler 1. ,7. ,28. ,56. günlerde 3'er adet olmak üzere kırım testine tabii tutulmuştur. Kırım sonuçlarının ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Betonların %70'lik dayanıma yaklaşık 7 günde ulaştıkları değerlendirilmektedir. Bu sebeple zamanın verimli kullanılması için dört farklı zamanda kırım testi gerçekleştirilmiştir. Üretilen ÇYDB'nin nihai dayanıma kadar geçen süre zarfında gerçekleştirilen kırım testlerine ilişkin sonuç bilgileri Tablo 2.3'de yer almaktadır.

Tablo 2.3. Çok yüksek dayanımlı beton yarı-statik sonuçları.

Sıra No	Gün	Bası Dayanımı (MPa)	Standart Sapma (MPa)
1	1.	108	7,35
2	7.	115	7,84
3	28.	125	3,70
4	56.	135	3,22

56. günde çok yüksek dayanımlı betonun zamana bağlı olarak gösterdiği performans Şekil 2.7'de yer alan grafikte açıklanabilir.



Şekil 2.7. ÇYDB'nin zamana bağlı yarı-statik bası testi davranışı grafiği.

Üretim aşamasında çeşitli malzemeler ve karışım hesaplamaları denenerek toplamda 25 adet üretim gerçekleşmiştir. 20 adet deneme üretimi sonrasında tasarım ve üretime en uygun tasarım karışım hesabı belirlenmiştir. Dayanım sonuçlarının tekrarlanabilir olması için 5 adet üretim tekrarlanmış ve benzer sonuçlara ulaşılarak 135 MPa basınç dayanımına sahip çok yüksek dayanımlı beton geliştirme süreci tamamlanmıştır.

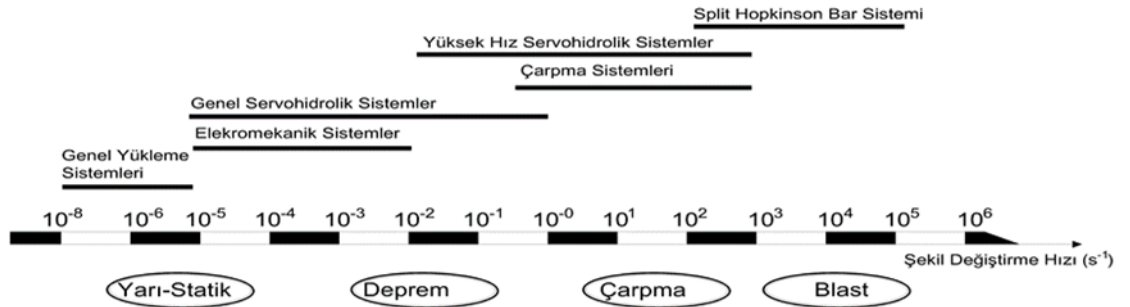
3. ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BETONUN YÜKSEK GERİNİM HIZLARINDAKİ DAVRANIŞI

3.1. Giriş

Bu bölümde, üretilen çok yüksek dayanımlı betonun yüksek gerinim hızlarındaki davranışını belirleme çalışmaları kapsamında, literatür özeti, dinamik test numunesi elde edilmesi, Split Hopkinson Basınç Çubuğu test sistemi çalışma prensibi, deneysel çalışma ve sonuçları hakkında bilgilere yer verilecektir.

3.2. Betonların Yüksek Gerinim Hızındaki Davranışı ile İlgili Literatür Özeti

Doğa'da bulunan ve insan yapımı malzemeler yükleme hızına karşı duyarlıdır. Betonda bu malzemeler arasında yer almaktadır. Malzeme üzerine gerçekleşen etkilerin zaman periyodu ve yükleri farklılıklar göstermektedir. Test çalışmalarında bu durum yükleme hızındaki değişimlerle ifade edilebilir. Yükleme hızına bağlı olarak ise şekil değiştirme hızı oluşur. Şekil değiştirme hızı, malzemenin ne kadar hızda deformasyona uğradığını gösteren birimsiz bir niceliktir. Bazı malzemelere anlık kuvvet uygulandığında dislokasyon sayısındaki artış ile şekil değiştirme hızlanır ve şekil değiştirmenin artmasıyla birlikte malzemenin mukavemeti artar. Bu durum malzemede gerinim sertleşmesi veya pekleşme olarak ifade edilebilir [16]. Bu noktada gerinim hızına bağlı olarak betonların statik ve dinamik testlerde elde edilen sonuçları ve kullanılacak test cihazları farklılık göstermektedir. Dünya'da yapılan çalışmalarda, yükleme koşulları uyarınca öngörülen gerinim hızı aralık baremi ve erişilmesi hedeflenen gerinim hızı değerleri için kullanılan test sistemleri Şekil 3.1'de ifade edilmektedir.



Şekil 3.1. Farklı yükleme koşullarındaki gerinim hızı değerleri ve test sistemleri.

Gerinim hızının etkileri ve dinamik koşulların değerlendirilmesi için gerçekleştirilen çalışmalar, yarı-statik test çalışmalarına kıyasla karmaşık ve zordur. Birçok parametre test üzerinde etkinlik sağlar ve doğru denetlenmediğinde sonucu anlamsızlaştırabilir. Dinamik testlerde durağanlık etkisi, numune geometrisi, gerilme ve gerinimin numunenin üzerinden üniform geçişi, gerilme dalga ilerlemesi etkileri ve numune boy/çap oranı önemlidir [19]. Tasarımın güvenilir yapılabilmesi için dinamik etki doğru olarak belirlenmeli ve yükleme hızına karşı gelen gerinim hızı öngörüsü doğru yapılmalıdır. Bununla birlikte hedeflenen gerinim hızı değerlerine göre en uygun test sistemi belirlenmelidir. Bischoff ve Perry [19] betonun yüksek gerinim hızında davranışını ifade ettikleri çalışmada, geçmişte yapılan test metotları ve ulaşılan gerinim hızlarını aktarmışlardır. Buna göre, Bresler ve Bertero [20] and Takeda ve Tachikawa [21] hidrolik test cihazları kullanarak 1 s^{-1} gerinim hızının üzerinde değerlere erişmişlerdir. Hughes ve Gregory [22], Watstein [23] ve Hughes ve Watson [24] ağırlık düşürme testi ile gerinim hızını 10 s^{-1} seviyelerine ulaştırmıştır. İlave olarak, yakın geçmişte yapılan çalışmalarda Split Hopkinson Basınç Çubuğu (SHBÇ) test düzeneği kullanılarak çeşitli malzemelerin (metal, polimer beton vb.) 10^2 - 10^3 s^{-1} gerinim hızlarında test edildiği bilinmektedir. Deneysel çalışmalarda bazı araştırmacılar betonu yalın halde fiber katkısız olarak SHBÇ sisteminde deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarda, Tuan Ngo vd. [25], 50 mm çapında dayanımları 32-160 MPa olan normal ve çok yüksek dayanımlı betonları 300 s^{-1} gerinim hızlarına erişerek test etmişlerdir. D.L Grote vd. [26], 30-46 MPa dayanıma sahip beton ve çimentonun yarı-statik testleri ve sadece çimentonun SHBÇ test düzeneği altında testini gerçekleştirerek 250 - 1700 s^{-1} gerinim hızlarına erişmişlerdir. M. Yousuf vd. [27] çalışmalarında 75 mm çapında ve 37,5 mm boyunda 12,43 MPa dayanıma sahip betonu SHBÇ basınç testine tabii tutarak, yarı-statik dayanımının yaklaşık dört katı fazla dayanım ve yaklaşık 54 s^{-1} gerinim hızına erişmişlerdir. Y.B.Guo vd. [28], ürettikleri C60, C80 ve C110 betonların yarı-statik ve SHBÇ testlerini gerçekleştirmişler ve 30 - 110 s^{-1} gerinim hızına ulaşmışlardır. Zhang, M vd.[29], 74 mm çapında ve 34 mm boyunda 45-50 MPa basınç dayanımına sahip betonu test etmişler ve 10 - 10^2 s^{-1} gerinim hızlarına erişmişlerdir. B, Riisgaard vd. [30], 15 mm çap ve 10 mm boy, 50 mm çap olmak üzere iki farklı tipte 100-160 MPa dayanıma sahip yüksek dayanımlı betonları 100 - 700 s^{-1} gerinim hızlarında test etmişlerdir. Lu, Y., Chen vd.[31], 100 mm çap ve 50 mm boyda hazırladığı geleneksel beton numunesini 10 - 100 s^{-1} gerinim hızlarında basınç testine tabii tutmuşlardır.

Günümüzde betonun zayıf yönü olan çekme davranışını iyileştirme yönünde fiber katkıları kullanarak dinamik davranış değerlendirme çalışmaları da gerçekleştirilmektedir.

Beton içinde yer alan fiberler özellikle yüksek gerinim hızlarında oluşan hasarın minimize edilmesi için araştırma çalışmalarına konu olmaktadır. Araştırmacıların bir bölümü hacimce % 0,5, 1, 1,5 fiber katkılı numuneler hazırlayarak SHBÇ test düzeneğini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarda, Yifei Hao vd. [32] SHBÇ test düzeneği altında dinamik çekme testi gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde fiber katkılı 75 mm çap ve 37,5 mm boyunda beton numuneler kullanmışlardır. Çalışma sonucunda betonun içine %1,5 oranında katılan fiberlerin çekme dayanımını yaklaşık %50 oranında artırdığını ve kırılmayı geciktirerek yüklenme kapasitesini artırdığını, beton matrisini sararak dağılmayı geciktirdiğini, fiber kullanımının betonun çarpma davranışı üzerine olumlu etki gösterdiğini ve enerji yutma kapasitesini artırdığını ifade etmişlerdir. Yifei Hao vd. [33] bir önceki çalışmayı genişleterek hacimce %1,5 fiber katkılı 35 MPa dayanımlı betonları üreterek, SHBÇ test sistemi altında deneysel olarak incelemişlerdir. 50-200 s⁻¹ gerinim hızlarına erişim sağladıkları çalışmada, yarı-statik çalışmalara göre beton içine katılan fiberin basınç dayanımına ve Elastisite Modülünün yükselmesine olanak sağladığını ifade etmişlerdir. A. Saadun vd. [34] çalışmasında 50 mm çapında C35 beton üreterek içerisine 1 kg/m³ ve 2 kg/m³ üretim hacmine oranla fiber ilave etmiştir. Ürettiği betonları SHBÇ test düzeneğinde 10 s⁻¹ gerinim hızına erişerek test etmiştir. Testlerin sonucunda Dinamik Artış Faktörü (DAF) değerlerini 4,15, 2,14 ve 1,97 olarak ölçmüştür. Lai, J. vd. [35], 200 MPa dayanımlı yüksek dayanımlı ve fiber katkılı 70 mm çap ve 35 mm boyunda beton numunelerin SHBÇ test sisteminde tekrarlı çarpma altındaki davranışını belirli gerinim hızı seviyesinde incelemişlerdir. Lai, J. vd. [36], dayanımları 143-227 MPa arasında yer alan ve 70 mm çap ve 35 mm boydaki Reaktif Pudra Beton (RPB) numuneleri tekrarlı çarpma altında ve 10 s⁻¹ gerinim hızında teste tabii tutmuşlardır. Yu. V. Petrov vd. [37], beton ve kaya gibi malzemelerin yüksek gerinim hızlarındaki davranışını inceledikleri çalışmalarında, yarı-statik çalışmada çimentonun dayanım değerinin betona kıyasen daha yüksek olduğunu, ancak dinamik test sonuçlarına göre bu durumun tam tersinir seyrettiğini ifade etmişlerdir. Araştırma çalışmalarında, Q.M. Li vd. [38], SHBÇ test düzeneğini nümerik olarak modelleyerek, literatür kaynaklarındaki deneysel verilerle karşılaştırmış ve doğrulama sağlamıştır. Y Hao vd. [39], betonun çekme yükü altındaki davranışını nümerik olarak incelemişlerdir. Modellemede genellikle ihmal edilen agregayı dahil ederek SHBÇ test düzeneğini sayısal olarak incelemiş ve 1-150 s⁻¹ gerinim hızlarında çalışma ile literatür deneysel verilerini davranış biçimi olarak doğrulamışlardır. P. Forquin [40], çalışmasında gevrek malzemelerin dinamik etkiler altında deneysel ve nümerik olarak hangi test metodlarıyla incelenebileceğini irdelemiştir. Bu kapsamda, SHBÇ test düzeneğiyle betonun

1 s⁻¹ ve 10 s⁻¹ gerinim hız mertebesinde test edileceğini ifade etmiştir. Ayrıca, plaka çarpma testiyle betonun dinamik etkiler altında gerilme ve gerinim grafiğinin çıkarılabileceğini 10³ –10⁶ s⁻¹ gerinim hız mertebesinde ölçümlerin alınabileceğini ifade etmiştir.

Son yıllarda dinamik davranış değerlendirme çalışmalarının dayanım, dürabilite ve kırılma dayanımı yüksek olan, Reaktif Pudra Betonu (RPB) çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Shaojun Cao vd. [41], 2020 yılında yayınlanan değerlendirme makalelerini RPB' nin dinamik, statik dayanımı, Dinamik Artış Faktörü (DAF), gerinim hızı, numune boyut ve fiber etkisi başlıkları altında inceleyerek SHBÇ deneysel çalışmalarına ait verileri aktarmışlardır. Beton üzerine gerçekleştirilen dinamik davranış değerlendirme çalışmalarında, SHBÇ sistemiyle elde edilen verilerin nümerik çalışma veri tabanına aktarılacak düzeyde irdelenmediği görülmektedir. Deneysel çalışmanın benzetiminin sağlanması için uygun malzeme modellerinin bulunmasına rağmen, SHBÇ verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilecek parametre değerlerinin malzeme modeline entegre edilerek çözümlene çalışmalarının gerçekleştirilmediği görülmektedir. Halbuki yeni ve çok yüksek dayanımlı betonların mevcut malzeme modellerine entegre edilmesi ile araştırmacılara, çalışmalarında çeşitlilik, deneysel çalışma yükünün azaltılması, ekonomi ve zamanın etkin kullanımı konularında pozitif katkılar sağlanabilir. Bu sebeple tez çalışmasında, RPB yerine üretim maliyeti düşük ve geleneksel yöntemlerle üretilebilen çok yüksek dayanımlı beton (yalın halde fiber katkısız) yüksek gerinim hızlarında ve sayısal çalışmalar için malzeme parametrelerinin belirlenebilmesine olanak sağlayacak biçimde SHBÇ test düzeneğinde deneysel çalışmaya tabii tutulacaktır.

3.3. SHBÇ Testi Hazırlık Çalışmaları

SHBÇ test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen dinamik test çalışmalarında numune geometrisi ve boy/çap oranının doğru belirlenmesi önemlidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, araştırmacıların SHBÇ test düzeneğinde kullanılan çubukların çapı, uzunluğu ve amplifikatörlerin özelliğini denetleyerek değişik çap ve boylarda beton numuneleri teste tabii tuttuğu görülmektedir. Ayrıca dinamik test çalışmalarında kullanılan beton numunelerinin çap ve boylarının, yarı-statik testlerde kullanılan numunelere kıyasla çok küçük olması nedeniyle, beton içeriğinde yer alan agregalar ebatlar üzerinde etkinlik sağlamaktadır. SHBÇ testlerinde kullanılacak beton numuneler test düzeneğinde yer alan Maraging çubukların 3340 mm boy ve 19 mm çap ölçülerine uygun ve agrega faktörüne uygun aralıkta üretilecektir.

3.3.1. Numune Boyutları

Deneysel çalışmanın gerçekleştirileceği test sisteminde yer alan Maraging çeliği çubukların çapı 19 mm'dir. Numunenin çapı 19 mm altında değere sahip olmalıdır. Numune boyunun da gerinim hızı üzerindeki etkisi ve buna bağlı boy/çap oranı değerlendirildiğinde numunelerin çapının 10 mm ve boyunun değişken değerlere sahip olması hedeflenmiştir. SHBÇ testinde kullanılması planlanan numunelerin boy/çap oranı aşağıdaki gibidir;

$$L/D=1,2,$$

$$L/D=1,0,$$

$$L/D=0,6.$$

3.3.2. Numunelerin Hazırlanması

Numunelerin ebatlarının belirlenmesi sonrasında dinamik test numunesi üretim yöntemleri değerlendirilmiştir. Karışım hesabı yapılarak tasarlanan ÇYDB'den üretim yapabilmek mümkündür. Ancak SHBÇ testinde kullanılacak numunelerin ebatları beton üretimleri açısından çok küçük ölçekli üretimi simgelemektedir. Küçük ölçekli üretimde kalıbın küçük olması, ÇYDB'nin yeterince işlenebilir olmaması ve kaba agregaların varlığı doğru üretimi sınırlandırabilir. İlave olarak, ÇYDB kalıba uygun olarak yerleştirilemeyebilir, üretimde boşluklar oluşabilir ve dayanım negatif yönde etkilenebilir. Bu nedenle, yarı-satik testler için üretilen silindir geometrili numuneden (Ø150X300 mm), su jeti yönteminin kullanılması ile dinamik test numunelerinin elde edilmesi planlanmıştır.

Su jeti kesimi yöntemiyle katı halde bulunan birçok parçanın kesimi sağlanabilmektedir. Su jeti ile kesim, suyun yüksek basınçla kesme aparatına yüksek kapasiteli pompalar aracılığıyla iletilmesi ile düzgün geometrili hassas kesim yapabilmeye olanak sağlayan bir yöntemdir. Ayrıca ölçüm hassasiyetinin yüksek olması üretimde avantaj sağlamaktadır.

Numunelerin hazırlanmasına ilişkin aşamalar aşağıda yer almaktadır.

- Silindir geometrili Ø150X300 mm ebadında ÇYDB' den 150 mm çap ve 6, 10, 12 mm kalınlığında üç adet dairesel plak su jeti yöntemi ile kesilerek çıkarılmıştır. Şekil 3.2'de kesime ilişkin görsel yer almaktadır.



(a)

(b)

Şekil 3.2. (a) $\text{Ø}150 \times 300$ mm ebadında numunelerden dairesel plak kesimi, (b) Plak görseli.

- Dairesel kesilen plaklardan çap kesimi yaklaşık 10 mm olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3’de kesime ilişkin görsel yer almaktadır.

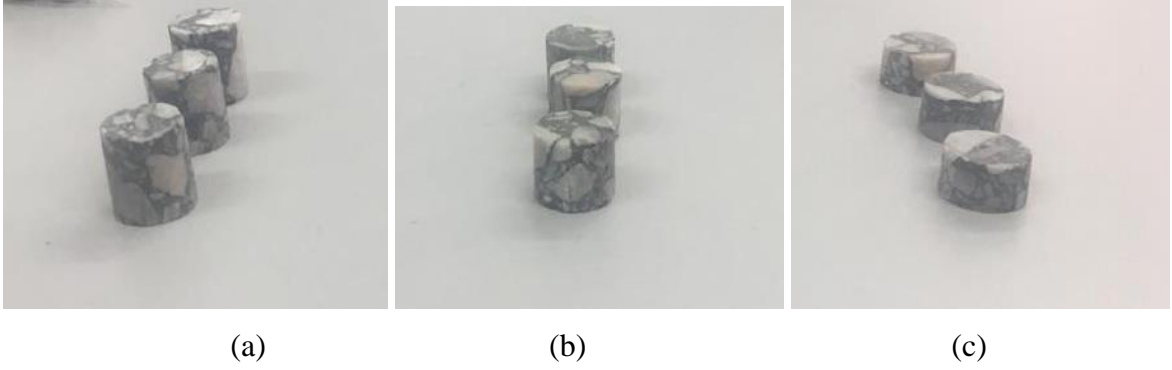


Şekil 3.3. Dairesel plakların 10 mm çaplı numunelerin kesilmesi ve genel görünüm.

- Numunelerin kesimi sonrasında uygun çap ve boyda hazırlanmış numuneler dairesel beton plaktan ayrılmıştır. Ayrılan parçalarda özellikle kenar bölgelerde çentiklerin varlığı tespit edilmiştir.
- Son aşamada numunelerdeki çentik ve yüzey bozuklukları zımpara makinesi yardımıyla düzeltilerek bütün numunelere silindirik numune görünümü verilmiştir.

- Kesim sonrası numune çaplarının yaklaşık olarak 10 mm olarak düzgün biçimde kesildiği, boylarında sapsmalar, yüzeylerinde bozuklukların olduğu ve genel olarak numunelerin beton malzemeyi simgelediği gözlemlenmiştir.

SHBÇ testi için hazır hale getirilen numunelerin görüntüsü Şekil 3.4’de verilmiştir.



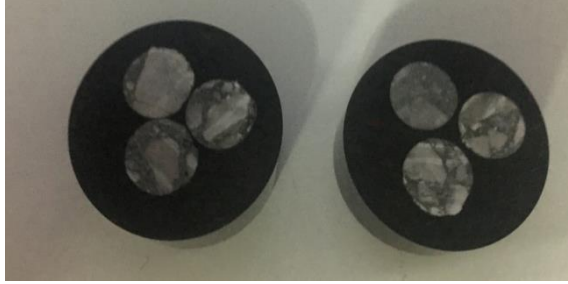
Şekil 3.4. Test numuneleri (a) $L/D = 1,20$; (b) $L/D = 1,00$; (c) $L/D = 0,60$.

ÇYDB’ nin kırılğan yapıda olması durumu gözetilerek, numune sayısının yeterli olması için her çap/boy oranında en az 33 adet toplamda 99 adet numune üretimi hedeflenmiştir. Ancak su jetinde gerçekleşen vuruşlar sonrasında kesilen birçok numunede çatlak olduğu ve yüzey bozuklukların düzeltilemeyecek seviyede olduğu görülmüştür. Kesim sonrası SHBÇ testinde kullanıma uygun 28 adet numune üretimi gerçekleştirilebilmiştir.

3.3.3. Numune Kontrol Çalışmaları

SHBÇ test düzeneğinde genellikle metal ve polimer malzemeler test edilmektedir. Test düzenekleri ise bu tip malzemelerin testine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Son dönemlerde yapılan çalışmalarda ise beton malzemelerin de bu tip düzeneklerde test edildiği bilinmektedir. Metal ve beton numunelerin testlerinde, düzenekte yüksek dayanımlı Maraging çeliği çubuklar kullanılmaktadır. Sistem kapalı çevrimde çalışması sebebiyle, test edilecek numunenin akma dayanımının kullanılan çubukların akma dayanımından düşük olması gerekmektedir. Aksi takdirde kullanılan çubuklarda deformasyonlar oluşabilir. Bu sebeple, düzeneğe zarar vermemek ve ön kontrol sağlamak amacıyla, malzemenin akma dayanım düzeyi ile doğrudan ilişkili olarak çok yüksek dayanımlı betonun sertlik değerlerinin ölçülmesi ve Maraging çeliği çubuk sertlik değeri arasındaki yaklaşım sınırının belirlenmesi gerekmektedir. Sertlik değerinin ölçülmesi için Vickers mikro

sertlik deneyi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deney’de $L/D = 1,2$ ve $L/D = 0,6$ oranına sahip olan altı adet numune bakarite gömülmüş ve mikro sertlik cihazında vuruşlara tabii tutulmuştur. Bakarite gömülen ÇYDB’nin görüntüsü Şekil 3.5’te yer almaktadır.



Şekil 3.5. Vickers sertlik testi öncesi numunelerin görünümü.

Vickers mikrosertlik testinde çimento hamuru ve agregaya yüzeylerine vuruşlar gerçekleştirilmiş ve ölçümler alınmıştır. Tablo 3.1’de ÇYDB’ nin mikrosertlik sonuçları yer almaktadır.

Tablo 3.1. ÇYDB çimento ve agregaya mikrosertlik değerleri.

Numune Boy/Çap oranı	Agrega(HV2)	Çimento(HV2)
1,2	140	143
1,2	150	160
0,6	109	174
0,6	143	112
0,6	142	113

Tablo 3.1 incelendiğinde çimento ve agregaya yapılan vuruşlarda ölçümlenen sertlik değerlerinin 109-174 HV2 aralığında olduğu ve çimento ile agreganın sertlik değerlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Sonuç olarak, Maraging çeliği test çubuğunun Vickers sertlik değerinin 370 HV2 olması nedeniyle, ÇYDB numunelerin test düzeneğine zarar vermeyeceği tespit edilmiştir.

3.4. SHBÇ Testleri

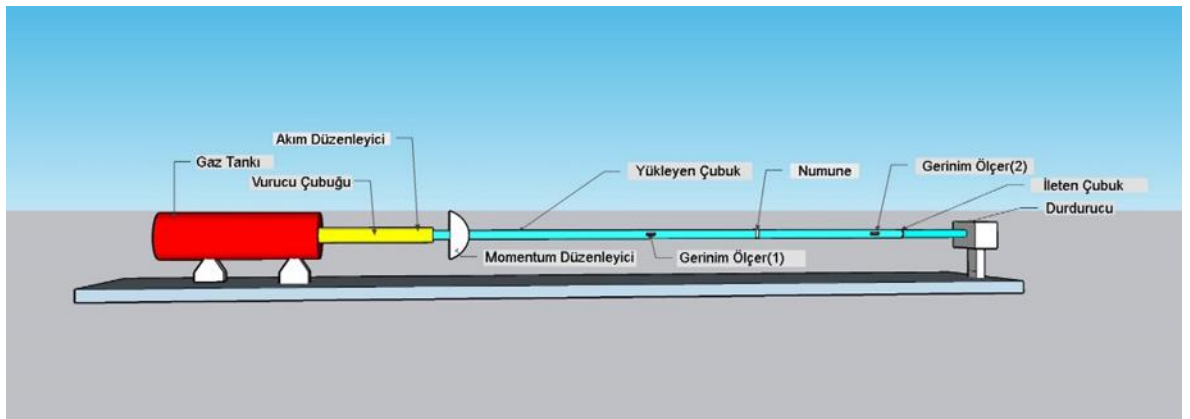
Çok yüksek dayanımlı betonun geliştirilmesi ve test hazırlık çalışmalarının gerçekleştirilmesinin sonrası SHBÇ testlerine yönelik çalışmalar başlatılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak düzeneğin çalışma prensibi incelenmiştir. Sonrasında deneysel

çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonuçları değerlendirmeye alınmıştır. Çalışmalara ilişkin bilgiler altbaşlıklarda ayrıntılı biçimde ifade edilecektir.

3.4.1. SHBÇ Test Düzeneği ve Çalışma Prensibi

SHBÇ test düzeneği malzemelerin yüksek enerjili ve yüksek gerinim hızında seyir eden olaylar karşısında davranışının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Sistemde malzemelerin basınç ve çekme davranışları incelenebilmektedir.

SHBÇ test sistemi ilk olarak Hopkinson [42] tarafından icat edilmiş, Kolsky [43] tarafından geliştirilmiştir. Günümüzdeki kullanımına yönelik araştırmaları içeren en detaylı çalışma ise Ross [44] tarafından sağlanmıştır. SHBÇ test düzeneği gaz tankı, vurucu çubuğu (striker bar), yükleme çubuğu (incident bar), ileten çubuk (transmitted bar), iki bar arasında numune yerleşim bölgesi ve durdurucu mekanizmasından oluşmaktadır. Düzenekte ayrıca ölçümde oluşabilecek farklı frekans etkilerinin azaltılması için akım düzenleyici (pulse shaper), vurucunun yükleme (incident) çubuğuna elastik dalga şiddetinin doğrusal aktarımının sağlanması için momentum düzenleyici (momentum trap) ve gerinimlerin ölçülmesi için gerinim ölçerler (strain gauge) kullanılmaktadır. SHBÇ düzeneğine ait şematik bir çizim Şekil 3.6'da yer almaktadır.



Şekil 3.6. SHBÇ test düzeneğinin şematik görüntüsü.

DeneySEL çalışmada kullanılan SHBÇ test sisteminde Maraging çeliği çubukların çapı 19 mm, vurucu çubuğun uzunluğu 300 mm ve yükleme-iletim çubukları boyu eşit ve 3340 mm ölçüsündedir. Test çalışmasında, gaz tankı içine sıkıştırılan hava aracılığıyla vurucu mekanizması hareketlendirilir, vurucu çubuğu yükleme çubuğunu tahriklendirir ve yükleme çubuğunda ses hızında elastik basınç dalgası oluşur. Yükleme çubuğunun üzerinden geçerek

numune yüzeyine ulaşan elastik dalgaların oluşturduğu gerinim şiddeti ε_i , numune yüzeyine çarparak geri dönen elastik dalgaların oluşturduğu gerinim şiddeti ε_r ve numune üzerinden geçerek ileten çubuğa ulaşan elastik dalgaların oluşturduğu gerinim şiddeti ε_t olarak ifade edilebilir. Gerinim şiddetleri yükleme ve iletim çubuklarının tam ortasında yer alan gerinim ölçerler tarafından, vuruşlarda gerçekleşen elastik dalgaların empadans farklarının hesaplanması ve veri toplama sistemine iletilmesi ile hesaplanmaktadır. Veri toplama sistemine iletilen veriler aşağıda yer alan formüller aracılığıyla değerlendirmeye alınmaktadır.

$$\sigma(t) = E_b \frac{A_b}{A} \varepsilon_t(t) \quad (3.1)$$

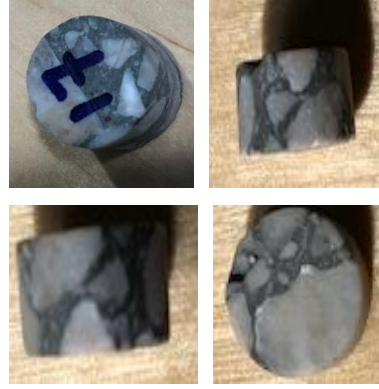
$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{-2c_b}{L} \varepsilon_r(t) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{-2c_b}{L} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \quad (3.3)$$

Yukardaki denklemlerde yer alan $\varepsilon_i, \varepsilon_r$ yükleme ve ε_t iletim çubuklarında oluşan gerinim şiddetini, E_b, A_b, c_b sırasıyla, sistemde yer alan çubukların Elastisite Modülünü, kesit alanını ve çubukta oluşan dalga hızını ifade etmektedir. A ve L ise numunenin kesit alanı ve boyunu ifade etmektedir.

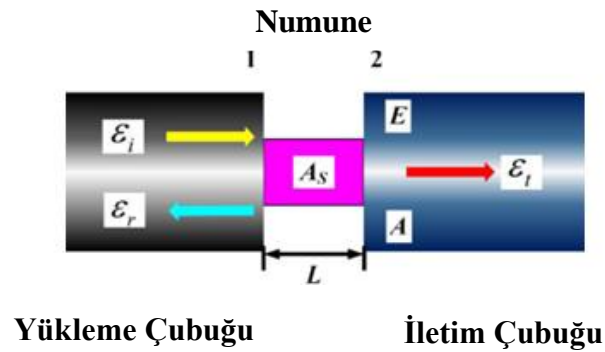
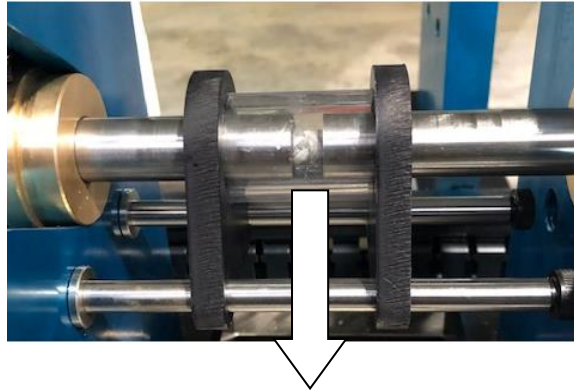
3.4.2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmada ilk olarak, SHBÇ test düzeneğinin numune çapı ve boyu üzerindeki sınırlamalar değerlendirilmiştir. ÇYDB üretiminde kullanılan en büyük dane boyutuna sahip agregalar 19-25 mm ölçüsündedir. Test çubuklarının çapı ise 19 mm'dir. Yarı-statik test numunesinden elde edilen dinamik test numuneleri 10 mm çap ve benzer aralıkta değişken boylarda üretilmiştir. Kesim sonrasında ölçü kısıtı nedeniyle, numunelerin sadece agregadan oluşması durumu söz konusu olabilir. Oysaki test etmek istediğimiz kompozit yapıdaki betondur. Bu sebeple, deneysel çalışma öncesinde her bir numune markalanmış, gözle kontrol edilmiş ve betonu simgelemesi veya agreganın ne kadar baskın olduğunun gözlemlenebilmesi için test öncesinde dört farklı düzlemini gösterecek biçimde Şekil 3.7'de gösterildiği gibi görselleştirilmiştir.



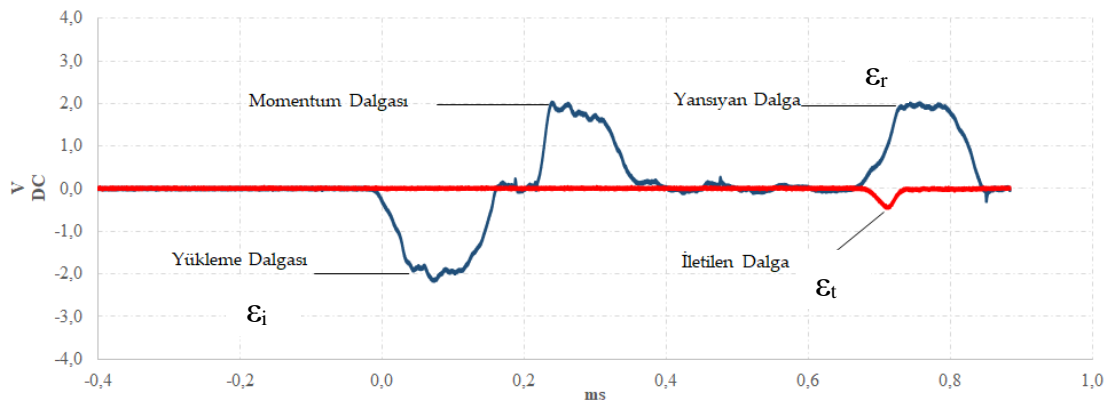
Şekil 3.7. 17 numaralı numunenin test öncesi ön, sağ yan, sol yan ve arka yüzey görseli.

Numunelerin boyları ve çapları, denklem 3.1-3'te değerlendirilecek olması sebebiyle kumpas yardımıyla ölçülerek veri toplama sistemine girilmiştir. Vurucunun en son kısmına (yükleme çubuğuna çarpacağı bölge) akım düzenleyici (pulse shaper) yapıştırılmıştır. Numune iki yüzeyi gres yağı ile yağlanarak yüklem ve iletim çubuğu arasına yerleştirilmiştir. Numunenin test öncesi görseli Şekil 3.8'de yer almaktadır.



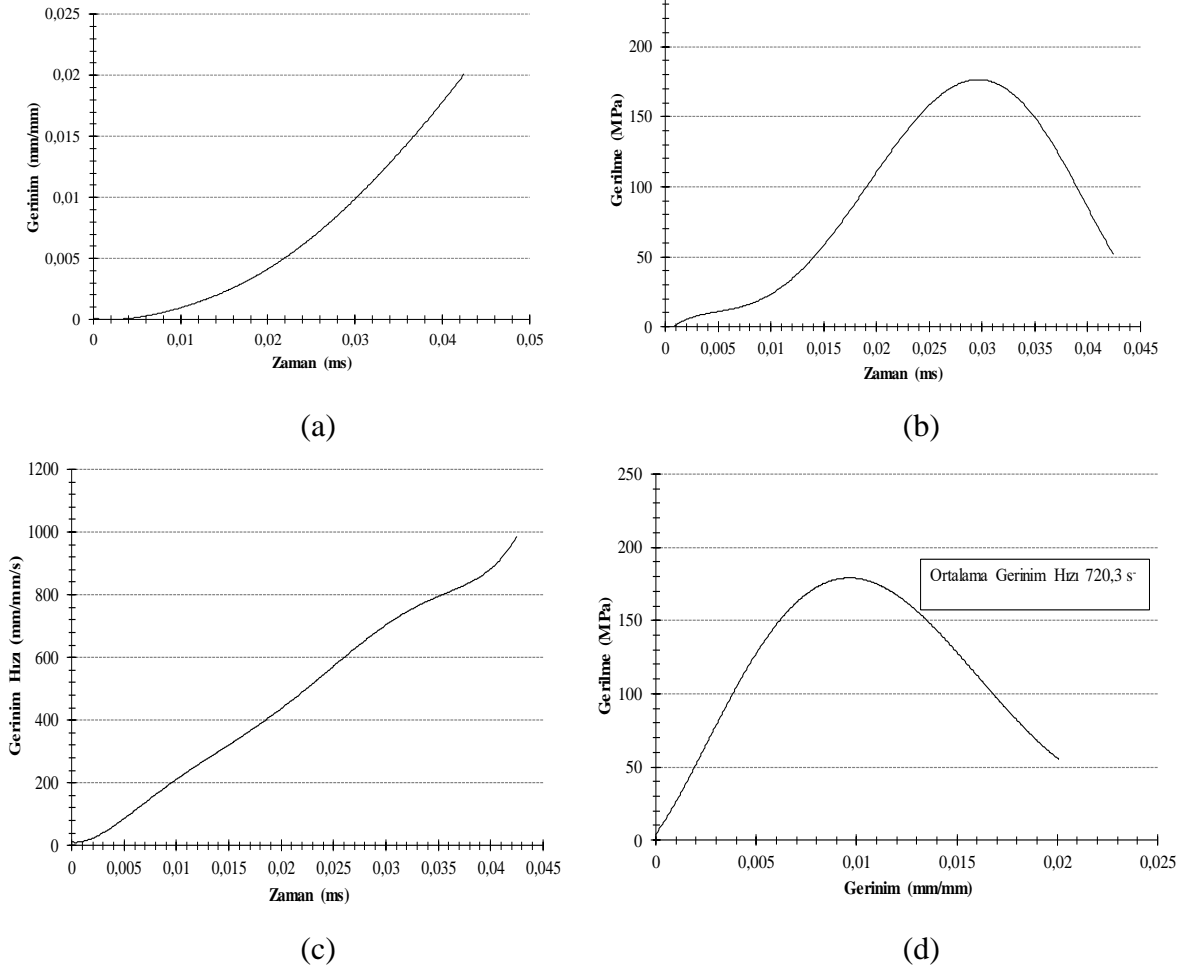
Şekil 3.8. Numunenin test düzeneğindeki görüntüsü.

Test esnasında numuneden kopan parçaların etrafa saçılarak test sistemine zarar vermesinin önlenmesi amacıyla numune bölgesi koruyucu kapak ile kapatılmıştır. Ölçüm sistemleri kontrol edilmiş ve test basıncı sağlanması için gaz tankı basınçlı hava ile doldurulmuştur. Son olarak geri sayım yapılarak tetikleme gerçekleştirilmiştir. Her bir test yaklaşık 2 s'lik sürede gerçekleşmiştir. Test sonrası yapılan incelemede, numunenin kap içerisinde tamamen dağılmış bir şekilde ufak parçalara ayrıldığı gözlemlenmiştir. Testin tamamlanması sonrasında vurucu hızı bilgisayara girilmiş ve veri toplama sistemine iletilen veriler değerlendirmeye alınmıştır. Elastik çubukların üzerinden geçen dalgaların, gerinim ölçerler aracılığıyla veri toplama sistemine iletilmesi ile Voltaj-zaman ilişkisi oluşturulmuştur. Bu ilişkiye ait örnek bir kayıt Şekil 3.9'da görülmektedir.



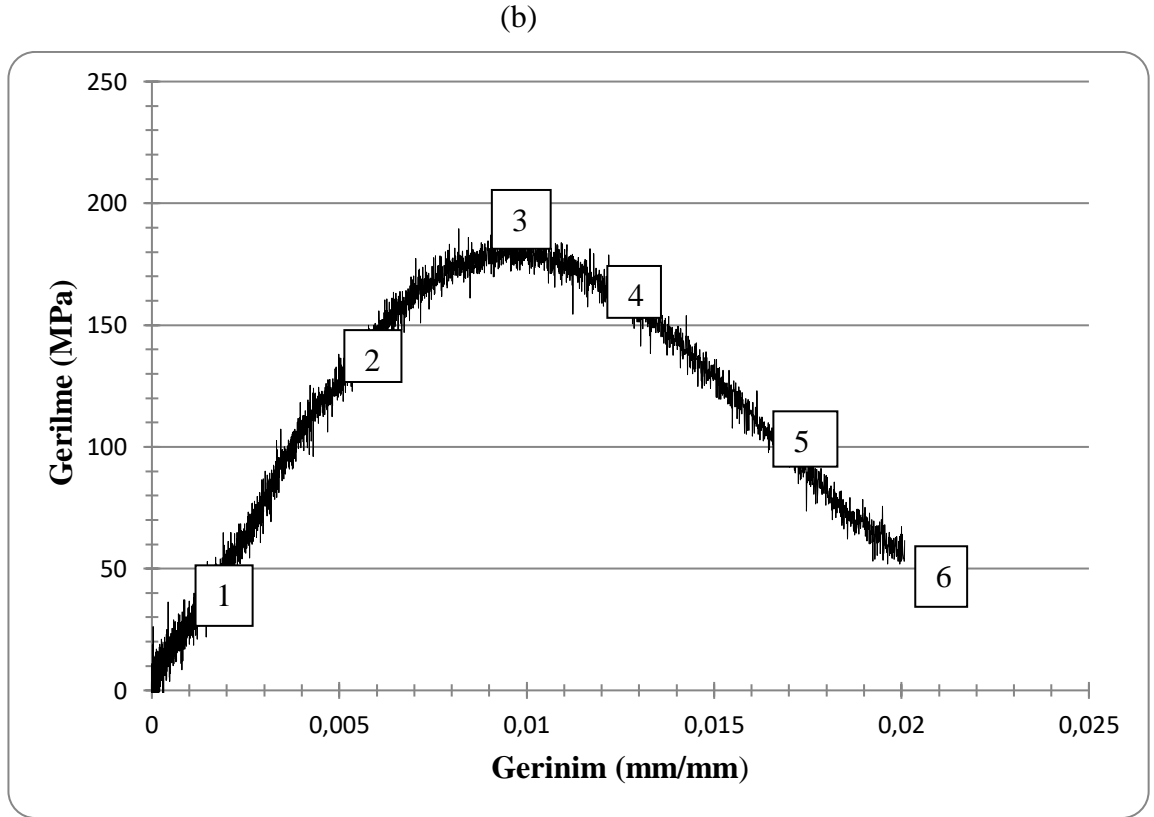
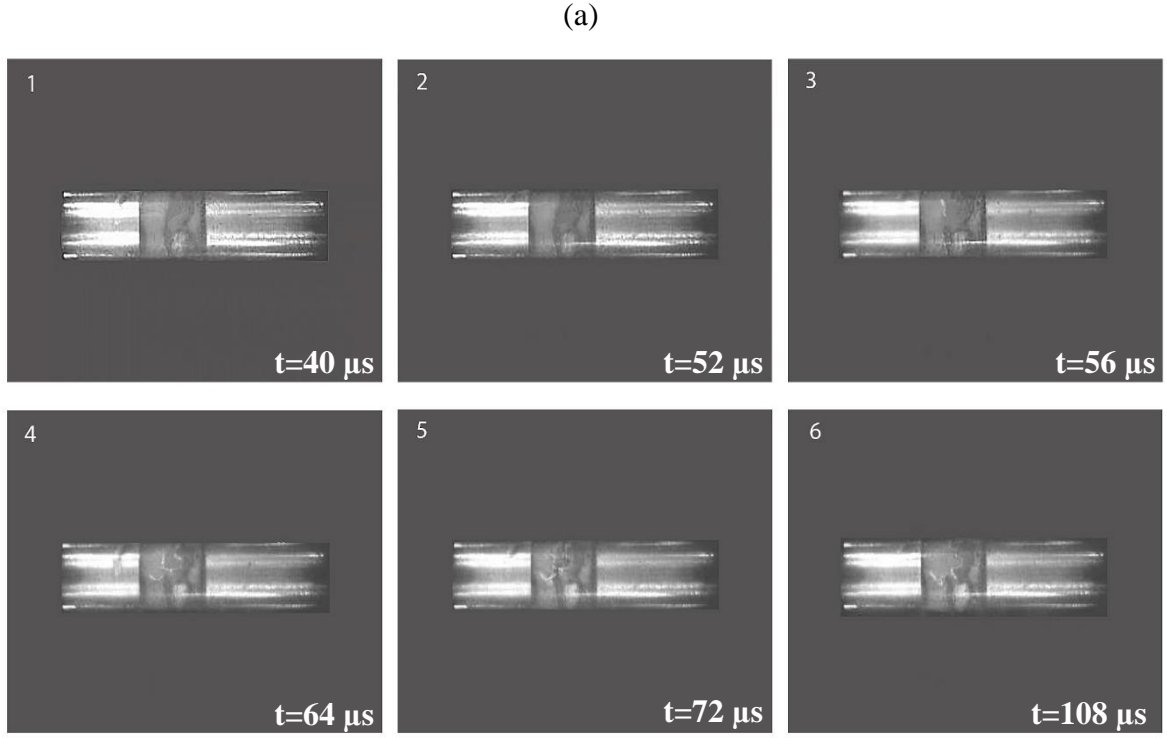
Şekil 3.9. Bir SHBÇ testinde Voltaj-zaman ilişkisi.

Şekil 3.9 bir SHBÇ testinde Voltaj-zaman ilişkisi incelendiğinde yükleme çubuğunun üzerinden geçerek numuneye ulaşan ve bir bölümü geri dönen dalgalar, yükleme ve yansıyan dalgalarla ifade edilmektedir. Momentum dalgası hesaplama dâhil edilmemektedir. Son olarak, mühendislik birimleri sisteme girilerek numunenin zamana bağlı olarak gerilme-gerinim ve gerinim hızı ilişkisi elde edilmiştir. Bu ilişkileri gösteren örnek grafikler Şekil 3.10'da yer almaktadır.



Şekil 3.10. ÇYBD-16'nın SHBC test sonuç grafiği- (a) Gerinim zaman ilişkisi; (b) Gerilme zaman ilişkisi; (c) Gerinim hızı zaman ilişkisi; (d) Gerilme gerinim ilişkisi.

Ayrıca SHBC test çalışmasında dinamik davranışının görselleştirilmesi için hızlı kamera kullanılmıştır. Hızlı kamera mikro saniye mertebesinde fotoğraflar çekerek, ÇYDB'nin zamana bağlı davranışıyla ilgili bilgiler aktarmış ve sayısal veriler ile davranış arasındaki ilişkinin doğrulanmasına katkı sağlamıştır. Şekil 3.11'de test sırasında farklı zamanlarda çekilen görseller ve davranış grafiği yer almaktadır.



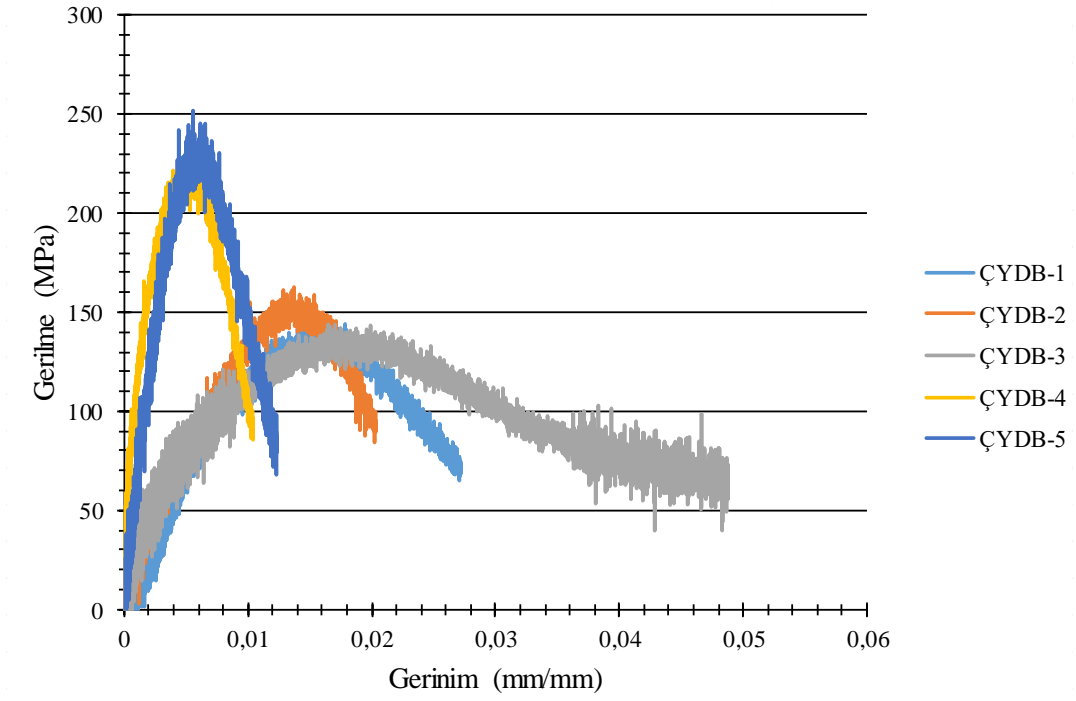
Şekil 3.11. ÇYDB-16'nın yaklaşık 960 s^{-1} gerinim hızında dinamik gerilme-gerinim davranışı (a) Mikron saniye aralıkta hızlı kamera ile çekilen davranış görselleri (b) Gerilme-gerinim ilişkisinde görsellerin işaretlenmiş grafiği.

Birinci görselde, numune elastik davranış sergilemektedir. Gerilme-gerinim eğrisi lineer haldedir. Bu aşamada numune üzerinde oluşan gerinimler geri döndürülebilir. İlk kırılma davranışı ikinci görselde gözlemlenebilir. Numune artık lineer olmayan davranış göstermeye başlamıştır. Artık gerinimler geri döndürülemez hal almıştır. İlk kırılma sonrasında aynı bölgede yeni, daha büyük ve derin kırılma üçüncü görselde görülebilir. Bölgesel kırılmanın numunenin diğer noktalarına ulaşacak olması sebebiyle, numunenin orantılılık sınırını bu aralıkta aştığı değerlendirilmektedir. Gerilmenin azalmasıyla numunenin birçok bölgesine yayılım gösteren kırılmalar dördüncü görselde yer almaktadır. Beşinci ve altıncı görsellerde gerilmenin azalmasıyla çatlak ve kırıklar numunenin bütün bölgelerini ele geçirmiş durumdadır. Numuneden parça kopması gerçekleşerek test çalışması tamamlanmıştır.

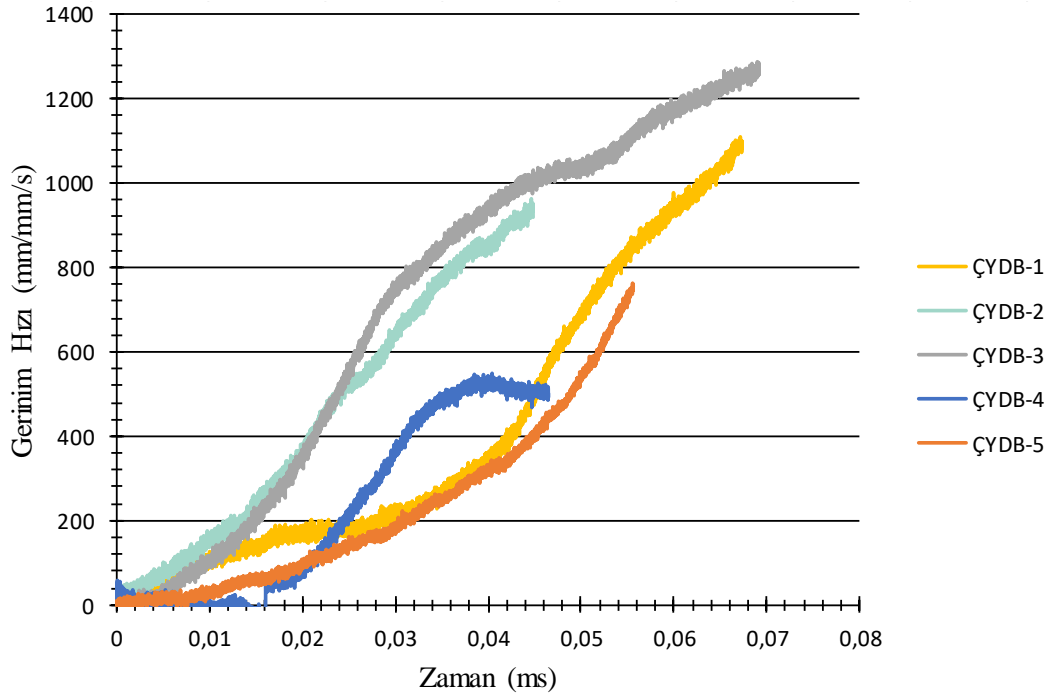
3.4.3. Sonuçlar ve Genel Değerlendirme

DeneySEL çalışma kapsamında yarı-statik testler için üretilen Ø150X300 mm ebatlarında numuneden, su jeti yöntemiyle çıkartılan 28 adet dinamik test numunesi SHBÇ düzeneğinde teste tabii tutulmuştur. Ancak 7 numunenin dinamik dayanım değerleri statik dayanım değerlerinden düşük seviyede kalmış ve değerlendirme dışı bırakılmıştır. Bu duruma, numunelerdeki yüzeysel bozukluklar, geometrik saplamalar ve içsel çatlakların sebep olduğu değerlendirilmektedir. Numunelerdeki hatalı üretimin, zayıf bölge davranışını tetiklediğini ve ÇYDB 'nin maksimum dayanıma ulaşmadan kırılma eğilimine girdiğini göstermektedir.

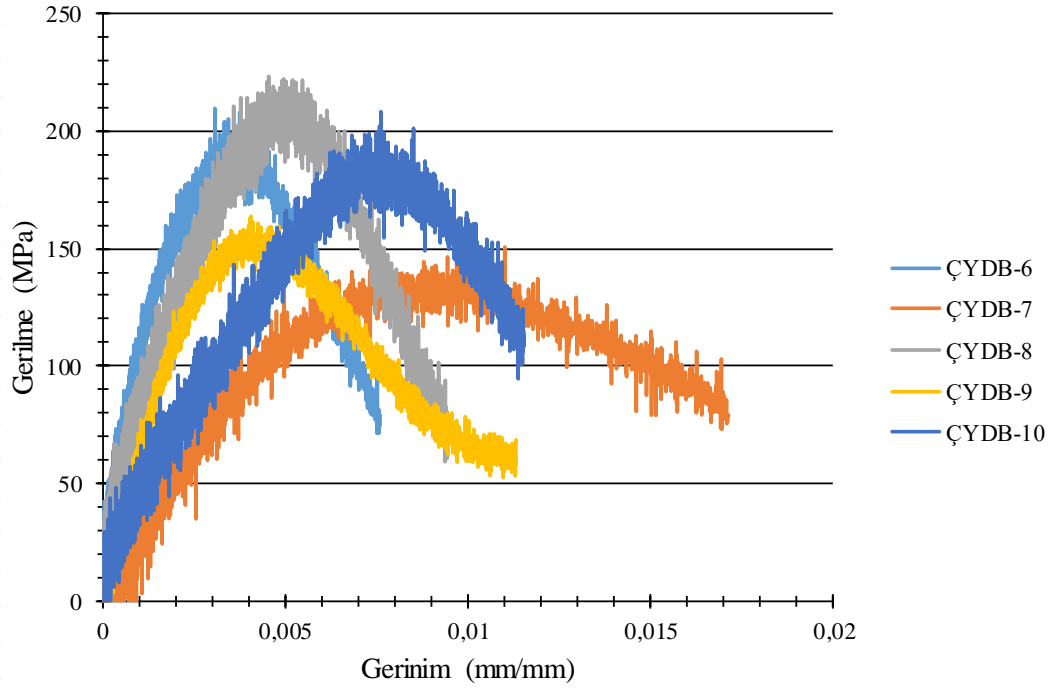
Test çalışması 0,1-0,3 MPa test basıncı aralığında, vurucu hızı 7,89-13,48 m/s aralığında üç farklı yaklaşık boy/çap oranına sahip toplamda 21 numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Gerilme-gerinim ilişkisi ve zamana bağlı olarak gerinim hızının değişimi numune bazında gruplandırılarak Şekil 3.12-19'da gösterilmişlerdir. Numunelere ait test sonuçları Tablo 3.2'de yer almaktadır.



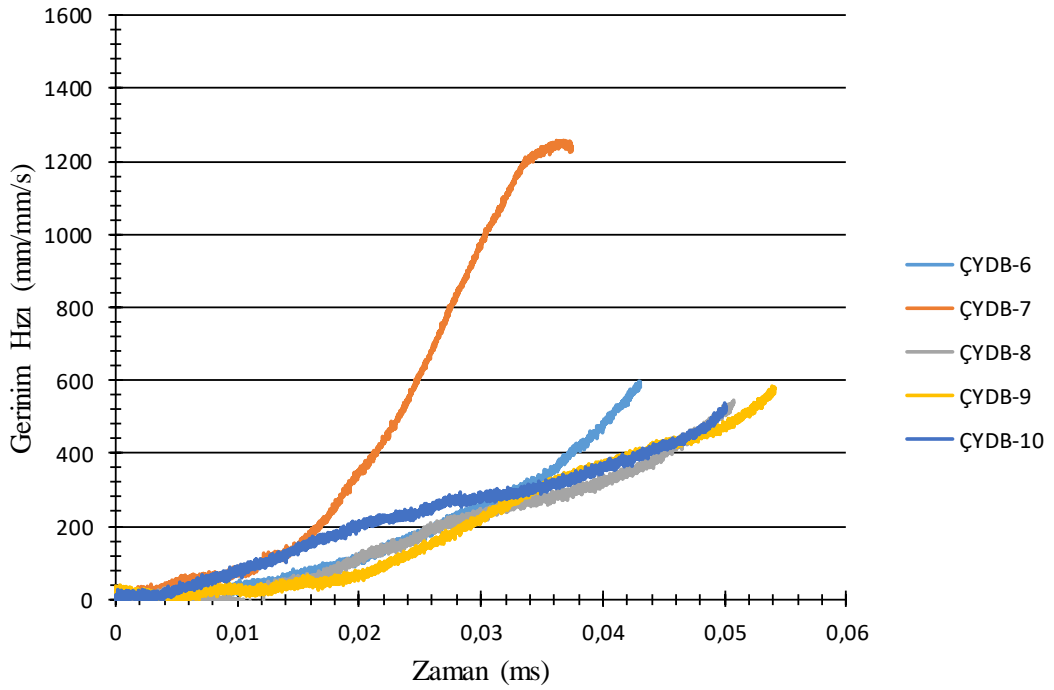
Şekil 3.12. ÇYDB 1-5 Gerilme-gerinim ilişkisi.



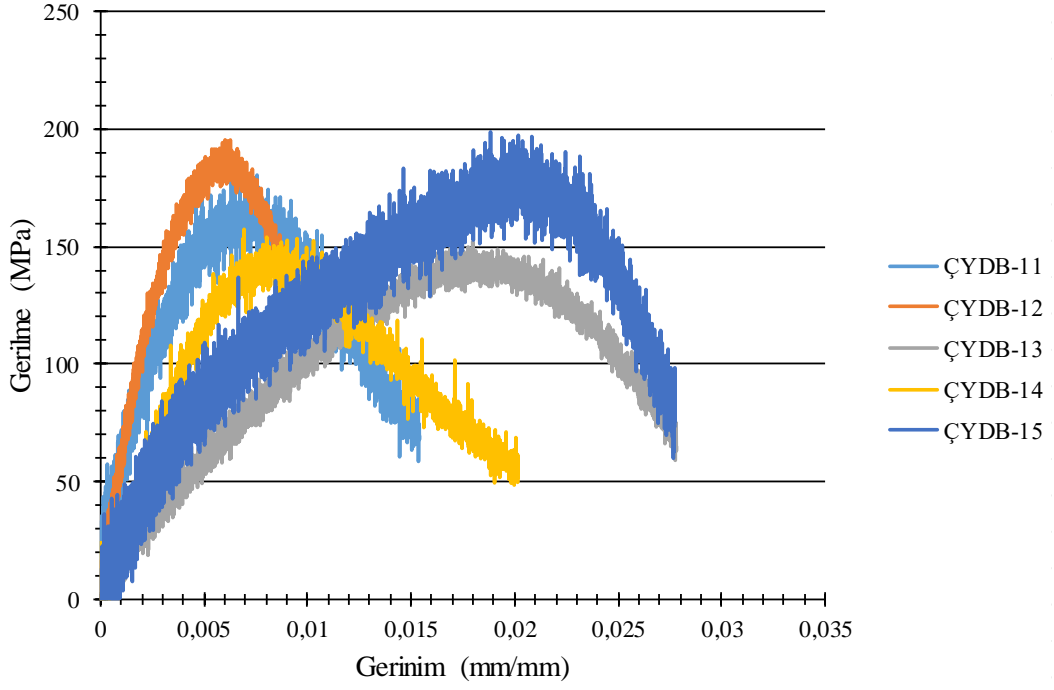
Şekil 3.13. ÇYDB 1-5 Gerinim hızı-zaman ilişkisi.



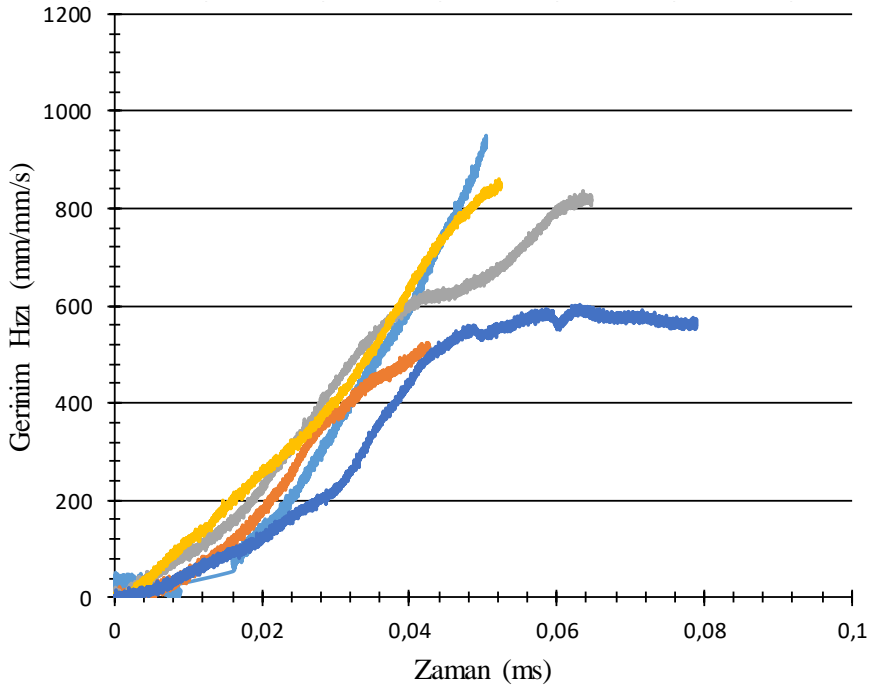
Şekil 3.14. ÇYDB 6-10 Gerilme-gerinim ilişkisi.



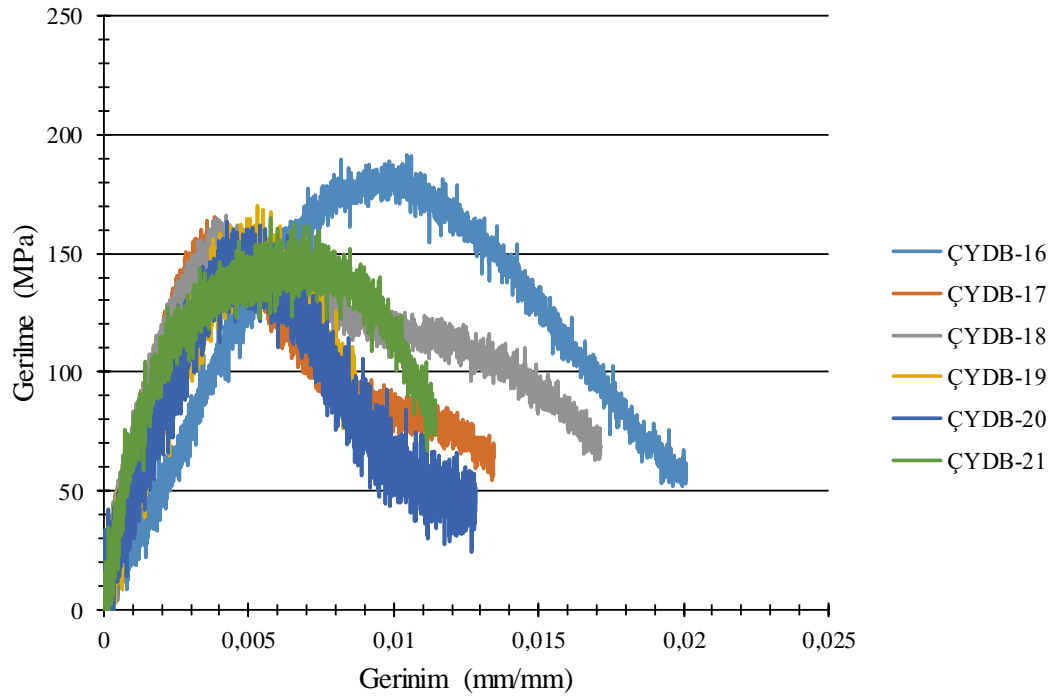
Şekil 3.15. ÇYDB 6-10 Gerinim hızı-zaman ilişkisi.



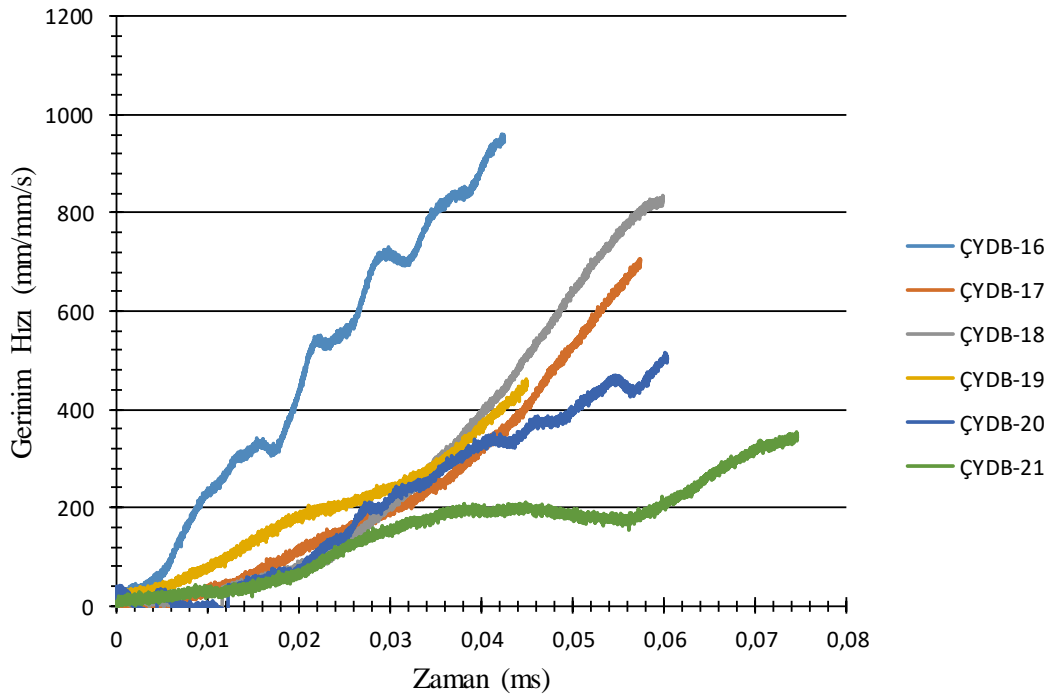
Şekil 3.16. ÇYDB 11-15 Gerilme-gerinim ilişkisi.



Şekil 3.17. ÇYDB 11-15 Gerinim hızı-zaman ilişkisi.



Şekil 3.18. YDB 16-21 Gerilme-gerinim ilişkisi.



Şekil 3.19. YDB 16-21 Gerilme-gerinim ilişkisi.

ÇYDB, üretimi heterojen yapıyı simgelemesine rağmen homojen ve düşük seviyedeki plastik deformasyonların ihmal edilebilmesi sonucu lineer izotrop malzeme olarak

tanımlanabilir. Gerilme-gerinim ilişkisinde, ÇYDB'nin maksimum dayanıma ulaşması sonrasında gerilme değerinde ani düşüş oluşmuş ve düşük miktarda plastik deformasyona uğramıştır. Bu noktada gevrek yapıdaki ÇYDB gerilme değerine karşın düşük deformasyon kapasitesiyle öngörülen davranışı sergilemiştir. Gerinim hızının zamana göre değişimi ilişkisinde, gerinim hızının tepe seviyeye erişmesiyle birlikte sonlandığı görülmektedir. ÇYDB'nin anlık gerilmeler karşısında deformasyon kapasitesi sınırlıdır. Anlık deformasyonların hızla artması sonucu numuneden parça kopmuş ve kesit kayıpları meydana gelmiştir. Kesit kaybı nedeniyle numune üzerinden geçen hız farkları dengelenmiş ve numunenin boyu kararlılığını kaybetmiştir. Bu sebeple, gerinim hızı değerlerinin numunenin akma sınırına kadar ölçülebildiği değerlendirilmektedir. Gerinim hızının hesaplamasına ilişkin ifade denklem 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.2. Split Hopkinson Basınç Çubuğu test sonuç tablosu.

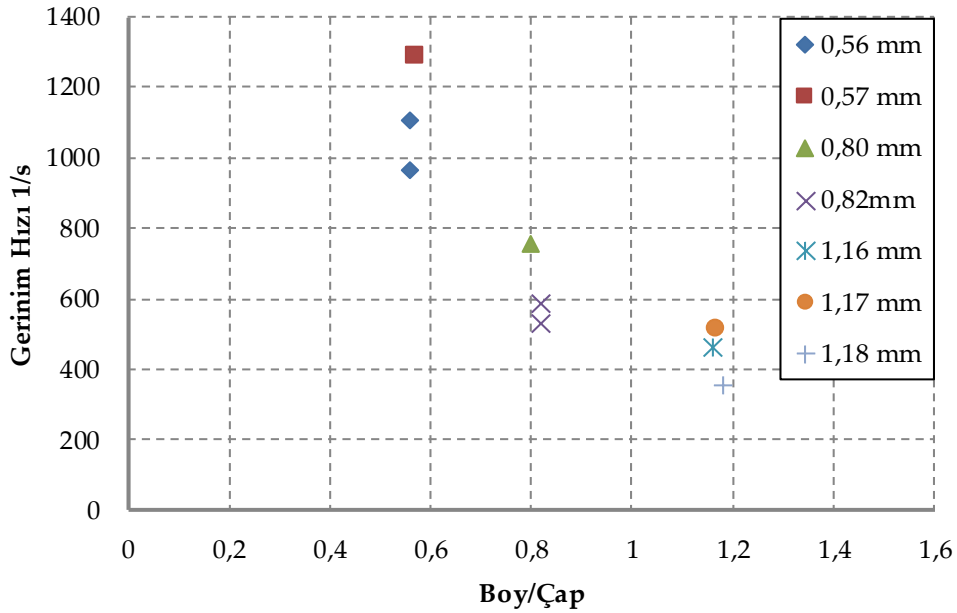
Numune No	Boy/Çap	Test Basıncı (MPa)	Çarpma Hızı (m/s)	Dinamik Gerilme (MPa)	Dinamik Gerinim	Gerinim Hızı 1/s	DAF (Dinamik Artış Faktörü)
ÇYDB-1	0,56	0,12	8,46	146	0,027	1109	1,08
ÇYDB-2	0,56	0,15	7,92	162	0,02	963	1,20
ÇYDB-3	0,57	0,12	8,53	143	0,048	1288	1,06
ÇYDB-4	0,57	0,15	11,12	231	0,01	549	1,71
ÇYDB-5	0,80	0,27	12,64	253	0,012	753	1,87
ÇYDB-6	0,81	0,30	13,48	210	0,007	593	1,56
ÇYDB-7	0,81	0,20	11,10	150	0,017	1257	1,11
ÇYDB-8	0,82	0,23	11,86	223	0,009	545	1,65
ÇYDB-9	0,82	0,20	11,14	163	0,011	584	1,21
ÇYDB-10	0,82	0,17	9,99	209	0,011	531	1,55
ÇYDB-11	0,82	0,30	13,38	180	0,015	950	1,33
ÇYDB-12	0,83	0,20	10,97	195	0,009	523	1,44
ÇYDB-13	1,06	0,20	11,04	154	0,027	814	1,14
ÇYDB-14	1,08	0,27	12,68	158	0,019	843	1,17
ÇYDB-15	1,08	0,10	7,84	198	0,027	602	1,33
ÇYDB-16	1,09	0,30	13,35	191	0,02	960	1,41
ÇYDB-17	1,10	0,23	11,77	166	0,013	696	1,23
ÇYDB-18	1,15	0,30	13,45	166	0,017	835	1,23
ÇYDB-19	1,16	0,20	10,94	170	0,008	461	1,26

Numune No	Boy/Çap	Test Basıncı (MPa)	Çarpma Hızı (m/s)	Dinamik Gerilme (MPa)	Dinamik Gerinim	Gerinim Hızı 1/s	DAF (Dinamik Artış Faktörü)
ÇYDB-20	1,17	0,20	11,12	163	0,012	515	1,21
ÇYDB-21	1,18	0,10	7,89	164	0,011	353	1,21

Tablo 3.2’de ÇYDB’ nin dinamik performansına yönelik ifade edilen bilgilere ilave olarak standart sapma değerleri gerilme, gerinim ve gerinim hızı için sırasıyla 30,34 MPa, 0,009 ve 262,68 s⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Gerinim hızı denklem (3.4)’teki şekli ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_2 - v_1}{L} \quad (3.4)$$

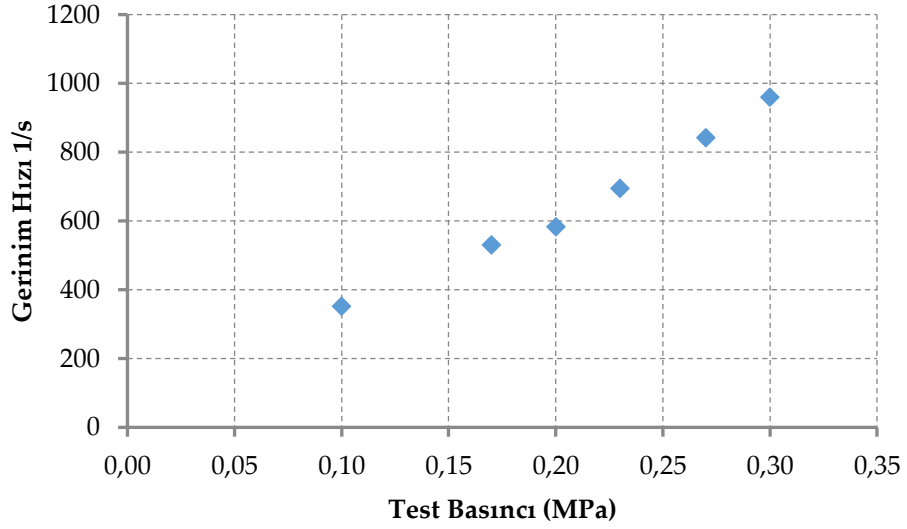
- Burada, V₁ çıkış, V₂ giriş bölgesi hızı ve L numunenin boyudur. Benzer test koşulları altında, boy/çap oranı düşük olan numunelerde, yüksek olanlara oranla ölçülen gerinim hızının fazla olduğu görülmektedir. Boy/çap oranı ile gerinim hızı arasındaki ilişki Şekil 3.20’de yer almaktadır.



Şekil 3.20. Boy/Çap oranı ile gerinim hızı ilişkisi

- Test basıncının artırılması ile vurucu hızı doğru orantılı olarak artmıştır. Vurucu hızındaki artış benzer boy/çap oranına sahip numunelerde gerinim

hızının artmasına neden olmaktadır. Şekil 3.21’de test basıncı ile gerinim hızı ilişkisi yer almaktadır.



Şekil 3.21. Test basıncı-gerinim hızı ilişkisi

- ÇYDB yükleme hızına duyarlı davranış göstermektedir. Yarı-statik testlerde gerinim hızı $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ve basınç dayanımı 135 MPa ölçümlenmişken, dinamik gerilme değerleri, statik dayanım değerlerine göre 1,06-1,87 kat daha fazla ölçümlenmiştir. DAF (Dinamik Artış Faktörü) birimsiz nicelik olarak gerinim hızına duyarlı malzemelerde dinamik gerilme değerinin statik gerilme değerine oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Test çalışması sonuçlarıncı, DAF değeri 1,06-1,87 belirlenmiş ve gerinim hızı $353\text{-}1288 \text{ s}^{-1}$ aralığında ölçümlenmiştir.
- Yarı-statik test numunesinden elde edilen dinamik test numunelerinin her birinde, agrega veya çimentonun yoğunluğu, bağ yapısı ve mikrosilislerin boşlukları kapatma durumu farklılık göstermektedir. Özellikle kaba agregaların hacimsel olarak yoğunlaştığı bölgelerden çıkarılan test numunelerinde ölçülen dinamik dayanım değerlerinin, çimentonun veya daha küçük boyutlu agregaların yoğunlaştığı bölgelerden çıkarılan numunelere oranla daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir. Ancak tek başına çimento veya agrega betonun nihai dayanımını belirleyemez sadece belirli aralıkta farklı sonuçlar elde etmemize neden olur. Bu nedenle, ÇYDB’ nin gerilme değerleri 143-253 MPa arasında geniş bir aralıkta ölçülmüştür.

4. BALİSTİK TEST ÇALIŞMALARI

4.1. Giriş

Bu bölümde, beton üzerine yapılan balistik test çalışmaları ile ilgili literatür özeti, balistik test çalışması için 135 MPa basınç dayanımına sahip çok yüksek dayanımlı betondan hedef beton numune üretimi, çarpan parça üretimi ve özellikleri, balistik test düzeneği çalışma prensibi ve test sonuçlarına ilişkin bilgilere yer verilecektir.

4.1.1. Balistik Testlerle İlgili Literatür Özeti

Dünya’da canlıların ve yapıların dış tehditlere karşı güvenliğinin nasıl ve ne gibi önlemler alınarak sağlanabileceğinin değerlendirilmesi üzerine birçok araştırma çalışması yürütülmektedir. Gereksinim olarak başlayan bu süreç esasen asırlar ve çağlar öncesine dayanmaktadır. İnsanoğlu tarih boyunca kendini ve çevresinde bulunan yapıları korumak için her zaman bir çalışma içinde olmuş ve bunun sonucu olarak balistik bilimi gelişmiştir [45].

Balistik bilimi çalışma konularına göre 3’e ayrılmaktadır.

- İç balistik,
- Dış balistik,
- Terminal balistik.

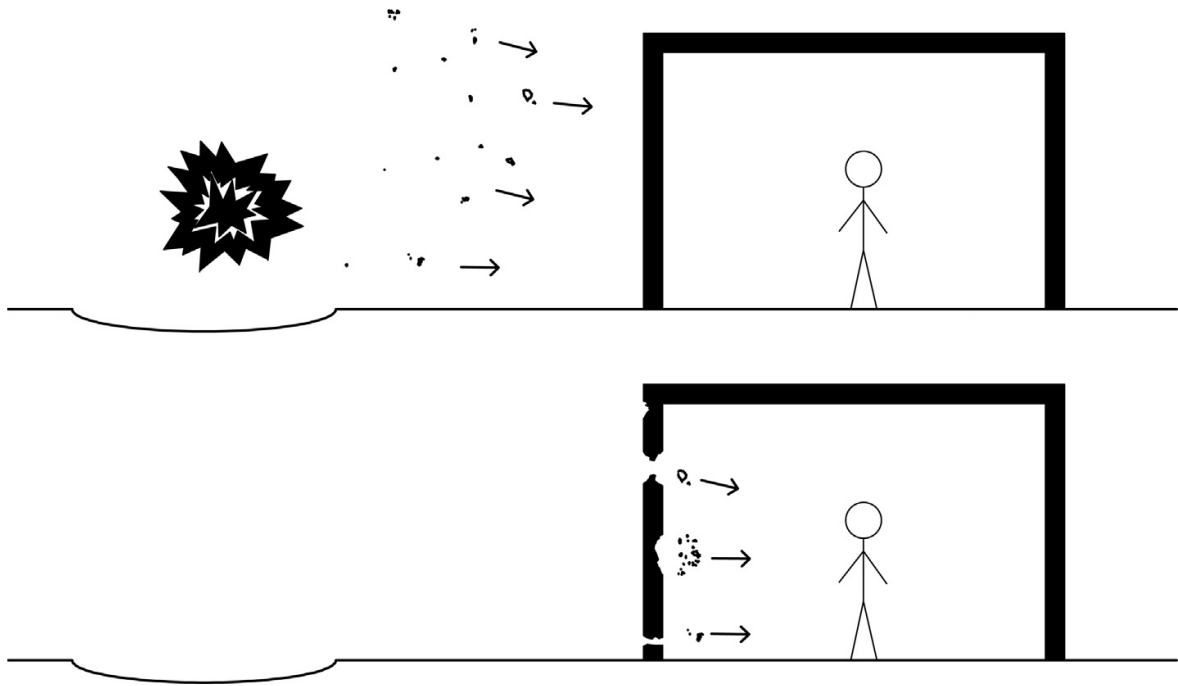
İç balistik ve Dış balistik: Mermi, harp başlığı, füze, roket vb. enerjetik malzemelerin namlu içindeki davranışı iç balistik ve ateşlenme sonrasında havadaki davranışı dış balistik bilim koluyla incelenmektedir.

Terminal balistik: Mermi, harp başlığı, füze, roket vb. sistemlerin hedefe çarpması sonucu, hedefte oluşan değişimlerin incelenmesi terminal balistik bilim koluyla gerçekleştirilmektedir.

İç ve dış balistiğe oranla terminal balistik alanındaki çalışmaların geri planda kaldığı görülmektedir. Günümüzde iç ve dış balistik çalışma alanlarında reel duruma çok yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Terminal balistik alanında hedefin davranışı üzerine çeşitli tahmin modelleri yapılabilmesine rağmen net sonuçlar henüz alınamamaktadır. Ancak son yıllarda terminal balistik alanında da radyografi yöntemi ve hızlı fotoğraf çeken kameraların kullanımı ile reel sonuca yaklaşımlar sergilenebilmektedir.

Mühimmat sistemlerin tasarım ve üretim çalışmalarında hedef üzerinde hasarın artırılmasına yönelik olarak yüksek dayanımlı parçacıklar (metal ve alışımlar vb.)

kullanılmaktadır. Mühimmat düzeneklerinin infilak etmesi sonucunda, tahribatın artırılması için içerikte yer alan parçacıklar yüksek hız ve sıcaklıkta etrafa saçılım göstermektedir. Saçılım halinde bulunan parçalar hedef yapılara çoğul ve tekrarlı olarak çarpma sağlamaktadır. Hedef yapıları ise değişkenlik gösterebilir. Örnek olarak saçılım gösteren yüksek miktardaki parçacıklar uçağın düşürülmesinde veya gelen başka bir mühimmatın imha edilmesi için kullanılabilir. İlâveten, parçacık etkinliğinin korunaksız yapıların içerisinde bulunan canlılara zarar vereceği ve öldürücü sonuçlar ortaya koyabileceği değerlendirilmektedir. Şekil 4.1'de görülen şematik çizimde kaynağın patlaması sonucu korunaksız yapının içinde bulunan insan zarar görebilecektir.



Şekil 4.1. Patlayıcı kaynaklı parçacık etkinliği[46].

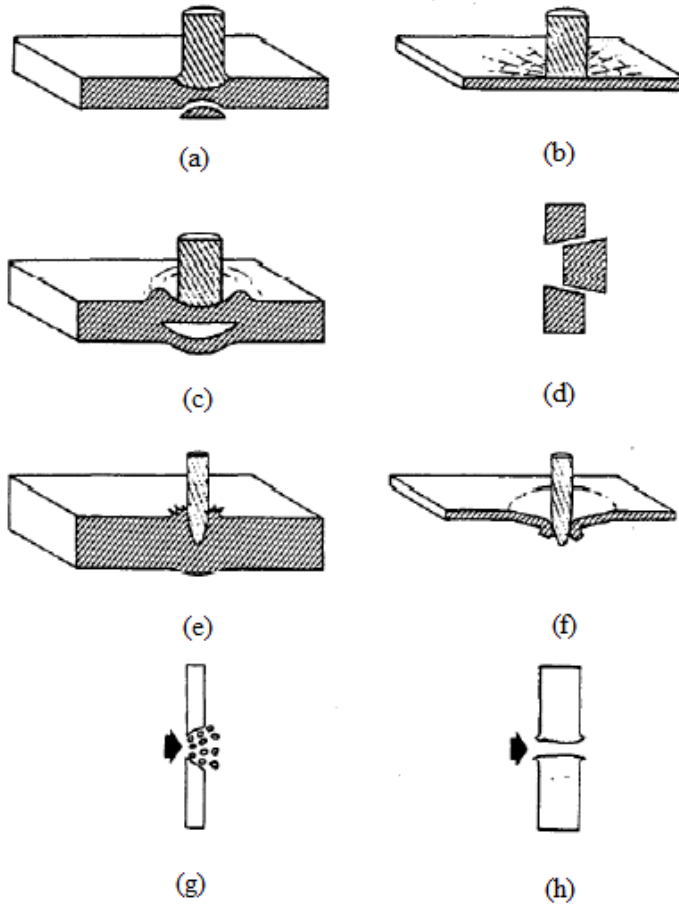
Ayrıca günümüzde ve yakın gelecekte, gelişen teknoloji ile parçaların hızlandırılması için enerjik malzemeler dışında elektromanyetik silah sistemlerinin kullanımı da söz konusudur. Geliştirme çalışmaları yapılan silahlardan çok seri biçimde yüksek etkinliğe sahip ve farklı ebatlarda parçaların yüksek hızlarda fırlatabileceği ve uzak mesafedeki hedeflere tehdit oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

Balistik çalışmalarda parça ve hedef etkileşimi sonucu aşağıda belirtilen üç durum meydana gelebilir.

- Çarpan parçanın hedef içeriğine giriş sağlamadan durması. Bu durumun Taylor çarpma testi ile ifadesi mümkündür.

- Çarpan parçanın hedef içine nüfuz etmesi ancak hedefin arka yüzeyini geçmeden durması halidir. Bu durum penetrasyon olarak ifade edilmektedir.
- Son olarak parçanın hedef içine nüfuz ederek yolculuğunu devam ettirmesi ve hedefin arka yüzünden yapıyı terk etmesidir. Bu durum perforasyon olarak ifade edilmektedir.

Balistik testlerin analizinde çarpan parçanın çarpma hızı ve açısı, çarpan ve hedef malzemenin dayanımları ve çarpan ile hedef arasındaki L/D oranı önemlidir [47]. Burada L hedefin yüzey boyutları ve D çarpan parçanın çapını ifade etmektedir. Yapıda oluşan hasarın ve iyileştirme yöntemlerinin değerlendirilebilmesi için çarpma olayını aşamalarıyla kavramak önemlidir. Şekil 4.2'de çarpan ile hedef arasındaki deformasyon ilişkisine ait süreçler yer almaktadır. Süreçler hedef türüne, çarpan parçanın özelliklerine ve diğer etkenlere göre değişiklik gösterebilir.



Şekil 4.2. (a) Gerilme dalgasına bağlı ilk kırılma, (b) Radyal kırılma,(c) Kabuklaşma, (d) Tıpalaşma, (e) Ön hedef yüzeyi yapraklanma, (f) Arka hedef yüzeyi yapraklanma, (g) Parçalanma hali, (h) Süneklige bağlı delik genişlemesi [48].

Çarpma malzemenin oluşturduğu basınç gerilmelerinin hedef malzemesi akma dayanımından yüksek olması sonucu hedefte deformasyon oluşumu başlamaktadır [47]. İlk açılma sonrasında çarpma yönünde basınç dalgaları hedef üzerinde ilerlemektedir. Gevrek hedeflerde basınç gerilmelerinin etkisiyle oluşan çarpışma bölgesindeki çekme gerilmeleri radyal kırılmalara sebep olur. Beton türünde olan hedeflerde bu tip kırılmaların görülmesi mümkündür. Basınç gerilmeleri, hedefin arka yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Hedefin çekme dayanımından yüksek oluşan gerilmeler kabuklaşma oluşumuna sebep olur. Bazı çarpmalarda hedef ve çarpma parçasının özelliğine bağlı olarak tıpalaşma durumu da söz konusu olabilir. Yapraklanma ise, ince hedeflerin ön ve arka yüzeyinde yüksek hızlı testlerde basınç gerilmelerinin çarpma bölgesinde oluşturduğu değişimlere bağlı olarak meydana gelmektedir. Yüksek hızlı çarpışmalarda, gerilmelere bağlı olarak çarpma ve hedef malzemede kesit kaybı ve parçalanmalar gerçekleşebilir. Son olarak yüksek sünekliğe sahip hedeflerde, konik başlıklı parçanın hedefe çarpması sonucu parçacık hedef içinde ilerlerken açtığı delik çapı genişlemekte ve hedefte sünek delik genişlemesi görülebilmektedir [49]. Yapılarda dayanımı ve yoğunluğu yüksek olan beton malzemeler yüksek hızlı ve enerjili gerçekleşen çarpma olayında koruyucu eleman olarak görev yapmaktadır. Bu sebeple birçok araştırmacı betonların çarpma olayı karşısında dayanımını ve özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Bu çalışmalarda, M.H. Zhang vd. [50], çalışmalarında 45-235 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkılı ve katkısız çok yüksek dayanımlı betonlar geliştirmişlerdir. Malzemenin dökümünü 300x170x150 mm ebatlarında kalıplarda gerçekleştirerek hedef yapısını oluşturmuşlardır. Test çalışmasında 12,60 çap ve 23,93 mm boyda çelik parçayı 620-700 m/s hız aralığında hedefe çarptırarak penetrasyon derinliğini 15-71 mm aralığında ölçmüşlerdir. Fan Wan vd. [51], 57 MPa basınç dayanımında ve fiber katkısız geleneksel betonu 89-405 mm ebatlarında hegzagon ve silindirik formda hedef yapısı olarak üretmişlerdir. Balistik test çalışmasında 7,5 çap 10,30 mm boyda çelik parçayı 820 m/s hızda hedefe çarptırarak, penetrasyon derinliğini 188-300 mm aralığında ölçümlemişlerdir. R.Yu vd. [52], çalışmalarında 500x500x100 mm ebatlarında 125-142 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkılı hedefe 7,62 mm ölçüsündeki mermiyi 830 m/s hızla fırlatarak balistik teste tabii tutmuşlardır. Sonuç olarak penetrasyon derinliğini 57-70 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Dawson vd. [53], çalışmalarında 28-34 MPa basınç dayanımına ve inşaat çeliğine (donatı) sahip geleneksel beton üretmiş ve atış testlerinde kullanmak üzere 1370x1370x152 mm ölçüsünde hedef yapısı üretmişlerdir. Hedefe 6,25 mm çapında tungsten parçayı 2200 m/s hızla çarptırmışlardır. Toplamda 9 atış gerçekleştirilmiş ve

penetrasyon derinliği 60-70 mm aralığında ölçümlenmiştir. Beppu vd.[54], çalışmalarında 25 MPa basınç dayanımına sahip ve fiber katkısız geleneksel betondan 500x500x3 mm ve 13 mm kalınlıkta metal ile sarılı iki farklı hedef yapısı üretmişlerdir. Mantar görünümlü dış çapı 25 mm ölçüde çelik parçayı hedef yapılarına 200-500 m/s hız aralığında çarptırmışlardır. Sonuç olarak yerleştirdiği hedeflerin durdurucu etkisini incelemiş ve bazı hedeflerde perforasyon gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Penetrasyon olayı gerçekleşen hedeflerde derinlik 10-40 mm aralığında ölçümlenmiştir. H.Wu vd. [55], çalışmalarında 67-142 MPa basınç dayanıma sahip fiber katkılı ve katkısız çok yüksek dayanımlı betonlar üretmişlerdir. 750 mm çapında 3 mm kalınlıkta çelik kalıp içine aldıkları silindirik yapıdaki hedefe boy/çap oranı 0,14 olan ve 30 mm namlu içinden fırlatılabilen çelik parçayı fırlatmışlar ve 115-748 mm aralığında penetrasyon derinliğini ölçümlenmişlerdir. Jason T. Gomez vd. [56], çalışmalarında 38,15 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkısız geleneksel beton üretmişler ve 410x410x410 mm ölçüsünde küp hedef hazırlamışlardır. Hedefe Maraging çeliğinden üretilen 6,4 mm çap ve 64,34 boydaki parçayı 186-616 m/s hızlarda tekrarlı olarak fırlatmışlardır. Test sonucu, penetrasyon derinliğini 24-135 mm aralığında ölçümlenmişlerdir. Joosef Leppanen [57] tez çalışmasında, 25-30 MPa basınç dayanımında ve fiber katkısız geleneksel betondan 750x375x500 mm ölçüsünde hedef yapısı oluşturmuştur. Hedef yapısına tekil ve çoklu atışlar gerçekleştirmiştir. Atışlarda 4 mm çapında silindirik çelik parçayı 1850 m/s hızla hedefe çarptırılmış ve penetrasyon derinliğini 55 mm olarak ölçümlenmiştir. Zhong Cheng Mu vd. [58], çalışmalarında 51 MPa basınç dayanımında betondan ve inşaat çeliği (donatı) kullanarak 360x360x400 mm ebadında hedef betonu üretmiştir. Hedef betona 12,6 mm çap ve 34 mm boyda 38CrSi çelik (sivri uçlu) parçayı 500-1500 m/s hızla çarptırmışlardır. Test sonucunda penetrasyon derinliğini 75-162 mm aralığında ölçümlenmişlerdir. Petr Máca vd. [59], çalışmalarında 132-151 MPa dayanıma sahip fiber katkılı çok yüksek dayanımlı betonu geliştirerek 300x400x50 mm ölçüsünde hedef yapısı üretmişlerdir. Hedefe 7,92 mm çap ve 26,7 mm boyda çelik parçayı 710-730 m/s hızlarda çarptırarak penetrasyon derinliğini 19-50 mm aralığında ölçümlenmişlerdir. L. Guo vd. [60], çalışmalarında 40-45 MPa fiber katkısız geleneksel betondan 1800 mm çap ve 10 mm kalınlıkta çelik ile çevrelenmiş silindir formda hedef üretmişlerdir. Hedef yapısına 60 mm çap ve 300 mm boyda 30CrMnSiNi2A alaşımlı çelik parçayı 843-1400 m/s hızlarda çarptırmışlardır. Sonuç olarak penetrasyon derinliğini 1670-3200 mm aralığında ölçümlenmişlerdir. H. Wu vd.[61], çalışmalarında 41 MPa basınç dayanımına sahip ve inşaat çeliği (donatı) kullanarak üç farklı tipte 100x100-200x200-300x300 mm ve kalınlıkları 300 mm olan, hedefler üreterek sıralı olarak dizilim gerçekleştirmiş ve test düzeneği

oluşturmuştur. Test düzeneğine 25,3 mm çap ve 152 mm boyda 45CrNiMoV alaşımlı çelik parçayı 540-737 m/s hızlarda çarptırmıştır. Çalışmada hedeflerin enerji yutma kapasitelerine göre parçanın durdurulmasına yönelik tespitler gerçekleşmiştir. H. Wu vd. [62], başka bir çalışmalarında, 107-137 MPa basınç dayanıma sahip ve fiber katkılı çok yüksek dayanımlı betonlar geliştirmişler, 750 mm çapında ve 3 mm çelikle çevrili beton hedefler üretmişlerdir. 25,3 mm çap ve 152 mm boyda SiMnCrNiMoV çelik parçayı 510-850 m/s hızlarda hedefe çarptırmışlardır. Test sonucunda hedef yapısı ve hız farkları sebebiyle 37-346 mm aralığında penetrasyon derinliği ölçümlenmişlerdir. Chuang Liu vd. [63], çalışmalarında 45 MPa basınç dayanımında fiber katkısız geleneksel betondan 450 mm çap ve 700 mm boyda silindirik hedef yapısı oluşturmuşlardır. Hedefe 9 mm çap ve 80 mm boyda çelik parçayı 500-1700 m/s hızlarda çarptırarak balistik testler gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak penetrasyon derinliği 24-95 mm aralığında ölçümlenmişlerdir. Jian Liua vd. [64], deneysel çalışmalarında 75-140 MPa basınç dayanıma sahip ve fiber katkılı çok yüksek dayanımlı beton geliştirmişlerdir. Geliştirilen malzemedan döküm sağlayarak 750 mm çap ve 700 mm boya sahip silindirik hedef yapısı oluşturmuşlar ve 25,3 mm çap ve 152 mm boyda çelik parçayı 554-808 m/s değişken hızlarda hedef yapısına çarptırmışlardır. Atış çalışması sonucunda değişken hız ve hedef yapısının dayanım değerlerine bağlı olarak penetrasyon derinliğini 129-414 mm aralığında ölçmüşlerdir.

Literatür araştırma sonuçlarında, normal, yüksek ve çok yüksek dayanımlı fiber katkılı veya katkısız olarak üretilen belirli ebatlardaki hedeflere, genellikle çelik ve alaşımdan üretilen parçalarla çeşitli hızlarda atışlar gerçekleştirildiği görülmektedir. Çelik ve alaşımı malzemelere oranla sahip olduğu yüksek mekanik özelliklerine rağmen tungsten ağır alaşımı parça ile atışlara ait çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Oysaki günümüzde mühimmat sistemlerinde etkinliğin artırılması için bu türde parçacıkların tercih edildiği bilinmektedir. Bu sebeple günümüz koşullarının yansıtılabilmesi için balistik çalışmada tungsten ağır alaşımından imal edilen parça ile testler gerçekleştirilecektir.

Balistik testler, çok yüksek dayanımlı betonun yüksek hızlı çarpma etkisi altında davranışına yönelik bilgiler aktaracak ve sayısal çalışmalarla karşılaştırmada reel davranış örneğini simgeleyecektir.

4.2. Balistik Test Hazırlık Çalışmaları

Balistik atış öncesinde literatür kaynakları değerlendirilerek planlamalar gerçekleştirilmiştir. Hazırlık aşamasında, çok yüksek dayanımlı hedef betonun ebatlarının

test düzeneğinde kullanılabilir olması önceliklendirilmiştir. Beton ağır bir malzemedir. Test sahasına nakliyesi ve sahada yer değiştirmesi kaldırma ekipmanlarıyla gerçekleştirmelidir. Bu durum, kapalı sistem (gaz silahı vb.) içeren düzeneklerde test yapabilme imkânını kısıtlamaktadır. İlave olarak çarpan parçanın ağırlığı ve geometrik ölçüleri hedeflenen hız değerlerine erişilmeye imkân sunmalı ve aynı zamanda test düzeneğinde kullanılan namlu çapına uygun olmalıdır. Bu kapsamda, balistik testlerin açık sahada barut silahı test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

4.2.1. Çok Yüksek Dayanımlı Betondan Hedef Numune Üretimi

Malzeme seçimi, tasarım, üretim ve kırım testleri süreçlerinin tamamlanması sonucu geliştirilen ÇYDB ihtiyaçlar doğrultusunda daha büyük ölçekte üretilebilmeye hazır hale gelmiştir. Balistik testlerde sonuçların doğru biçimde aktarımı ve değerlendirilmenin yapılabilmesi için L/D oranı, hedefin çarpma etkisine maruz kalacağı yüzeyin uzunluğu ile parçanın çapı arasındaki ölçü ilişkisi önemlidir. Bu nedenle hedef bölgesi L, parça çapı D oranı (L/D) olabildiğince yüksek olmalıdır. Balistik testlerde kullanılacak parçanın çapına oranla hedef yapısının yüzey uzunluğu 35 kat daha fazla olarak tasarlanmıştır. Hedef yapısı 500x500x500 mm ebatlarında üretilecektir. Üretim çalışmaları başlangıç aşamasında laboratuvarda yapılan üretimlerde karşılaşılan zorluklara karşın alınması gereken tedbirler değerlendirilmiştir. Özellikle ÇYDB' nin işlenebilirliğinin düşük seviyede olması ve hızlı sertleşmesi büyük ölçekli üretimi zorlaştırabilir. ÇYDB kalıp içine yeterince yerleşmeyebilir ve segregasyonlar oluşarak dayanım değerleri negatif yönde etkilenebilir.

Hedef betonu üretimi sürecine ilişkin ilerleme adımları;

- ÇYDB' nin döküleceği kalıp için, plywood kalıp malzemesi kullanılmıştır. Döküm esnasında basıncın etkisiyle kalıbın açılmaması için ahşap malzemelerle ilave ve nervürlü donatı ile destek sağlanmıştır. Balistik test için iç ölçüleri 500x500x500 mm ebatlarında olan küp kalıp hazırlanmıştır. Döküme hazır hale getirilen kalıplara ilişkin görsel Şekil 4.3.'te yer almaktadır.



Şekil 4.3. Hedef betonu kalıpları görseli.

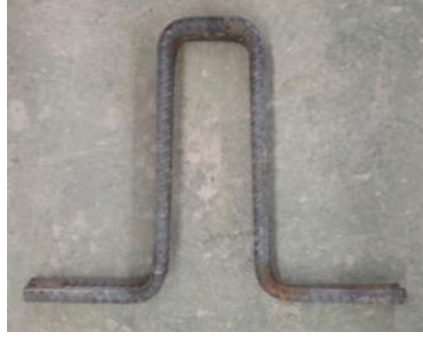
- Kalıpların hazırlanması sonrasında fabrika koşullarında yüksek hacim kapasiteli betoniyerde karışım hesabına uygun olarak ÇYDB karıştırılmış ve üretilmiştir. Üretilen ÇYDB'nin hızlı sertleşmesi sebebiyle, titreşim tezgâhı üzerinde hazır halde bulunan kalıplara hızlı bir biçimde yerleştirilmesi gerekmiştir. Yerleştirme işlemi üç aşamada, ara bölümlerin tokmaklanması ve titreşim tezgâhının döküm süresince sürekli halde çalıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Hedef betonu üretimine ilişkin görsel Şekil 4.4.'te yer almaktadır.



Şekil 4.4. Hedef beton üretimine ilişkin görsel.

- Hedef betonunun ölçüleri ve birim hacim ağırlığının değerlendirilmesi ile yapılan hesaplamada yaklaşık 350 kg ağırlıkta olması beklenmektedir. Çarpma testinde ardışık testler için sahada hedef betonlarının yer değiştirmesi ve atış düzeneğine uygun konumlandırılması gerekmektedir. Bu sebeple ağır hedef betonu ve kaldırma ekipmanı arasında ara yüz oluşturulmuştur. Üretim öncesi hazırlanan 14 mm çaplı inşaat çeliğinden üretilen nervürlü donatı kanca, ÇYDB' nin kalıba dökümü

sonrasında sertleşmeden hemen önce yerleştirilmiştir. Taşıma ara yüzü olarak tasarlanan nervürlü donatı kancaya ilişkin görsel Şekil 4.5.'te görülmektedir.



Şekil 4.5. Kanca görseli

- Hedef betonu üretiminin tamamlanması sonrası, ÇYDB' nin tamamen sertleşmesi beklenmiş ve bir gün sonra kalıptan çıkartılmıştır.
- Hedef betonu vibrasyon ve yerleşme problemlerinin tespitine ilişkin, gözle muayane edilmiştir. Yapılan muayene sonucu üretim kaynaklı sorun bulunmadığı gözlemlenmiştir.
- Altı adet üretilen hedef betonları test gününe kadar kür işlemine tabi tutulmuştur.

500x500x500 mm ebatlarında çok yüksek dayanımlı hedef betonları test günü çalışma sahasına nakil edilmiş ve çarpma testi için konumlandırılmıştır. Hedef betonlarına ilişkin görsel Şekil 4.6.'da yer almaktadır.



Şekil 4.6. Hedef betonları görseli.

4.2.2. Delici Parça Üretimi

Balistik testlerde hedefe çarptırılacak parçanın dağılmadan betona nüfuz etmesi ve mümkün olabilecek en büyük hasarı oluşturması, hedef yapısının davranışının belirlenmesi gerekli ise güçlendirilme tedbirlerinin alınması ve hedef optimizasyonun sağlanması açısından önemlidir. Çalışmada savunma ve uzay sanayinde kullanımını son dönemlerde artan tungsten ağır alaşımı parça kullanılacaktır [65]. Tungsten ağır alaşımı, ısıya dayanıklılığı, oda sıcaklığı ve artan sıcaklıklardaki yüksek dayanımı, yüksek termal iletkenlik özelliği nedeniyle ön plana çıkmaktadır [66]. Stratejik bir ürün olan tungsten kolay elde edilemez ve bağımsız üretim şartlarını gerektirmektedir. Tungsten ağır alaşımları temel olarak ikiye ayrılmaktadır. Alaşımlardan ilki Ni-Fe, diğeri ise bağlayıcı fazın Ni-Cu içerdiği alaşımlardır [49]. İhtiyaç ve kullanım alanlarına göre tungsten ağır alaşımların içeriği belirlenmekte ve üretilmektedir. Çalışmalarda sıklıkla kullanılan alaşımlara ilişkin bilgiler ve sağladıkları avantaj-dezavantajlar Tablo 4.1’de yer almaktadır.

Tablo 4.1. Tungsten ağır alaşımları değerlendirme tablosu [65].

Alaşım İçeriği	Avantaj	Dezavantaj
W-Ni-Cu	Düşük fazlı sinterleme sıcaklığı, düşük manyetik geçirgenlik, yüksek ısı iletkenlik	Düşük Mekanik Özellikler
W-Ni-Fe	Düşük üretim maliyeti	Standart alaşım
W-Ni-Co	Yüksek mekanik özellikler	İntermetalik oluşumu
W-Ni-Fe-Co	W-Ni-Fe’den daha yüksek mekanik özellikler	Radyoaktif alanda kullanım problemi
W-Ni-Fe-Mo	Yüksek sertlik	Sinterleme hassasiyeti yüksek.

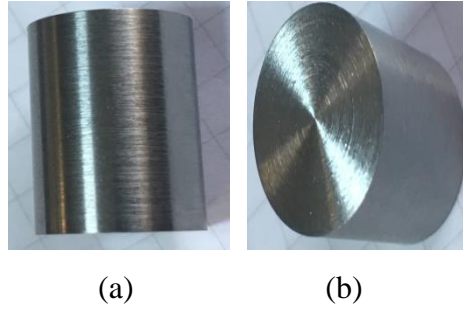
Alaşım İçeriği	Avantaj	Dezavantaj
----------------	---------	------------

Test alışmasında W-Ni-Fe düşük üretim maliyetine sahip standart alaşım parça kullanılacaktır. Tungsten ağır alaşımı delici parçaya ait kimyasal ve mekanik zellikler Tablo 4.2’de yer almaktadır.

Tablo 4.2. Tungsten ağır alaşımı mekanik özellikleri tablosu.

Alaşım İçeriği	Yoğunluk(gr/cm ³)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	ekme Dayanımı (MPa)	Sertlik(HRC)
%92.5W.%5.6Ni.%2.4Fe	17,5-18,00	600	15-25	850-950	29-35

Delici parça toz metalürjisi yöntemiyle üretilmektedir. Geometrisi silindirik ve kt burunlu olarak ifade edilebilir. Delicinin görseli Şekil 4.7’de yer almaktadır.



Şekil 4.7. Tungsten alaşımı parça (a) Yan yüzey, (b) st yüzey görüntüsü.

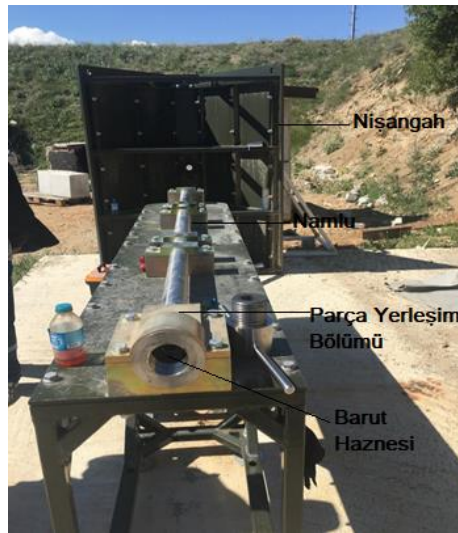
Tez çalışmasında hedeflenen hıza çıkılabilmesi için ağırlık önemli bir parametredir. Ayrıca test düzeneğinin özellikleri delici parça geometrisi üzerinde etkinlik sağlamaktadır. Namlu apı ve hız hedefi değerlendirmeleri sonucu 14 mm çapında ve 20 mm uzunluğunda 54-56 gr kütleli altı adet tungsten alaşımı delici parça temin edilmiştir. Balistik testlerde kullanılacak tungsten ağır alaşımı delici parçaların geometri, ağırlık ve mekanik özellikleri ile ilgili bilgiler Tablo 4.3’te yer almaktadır.

Tablo 4.3. Tungsten delici özellikleri.

Sıra No	Boy(mm)	Çap(mm)	Kütle (gr)	Sertlik (HRC)
1	20	14	56,64	32
2	20	14	53,83	32
3	20	14	56,33	32
4	20	14	56,49	30
5	20	14	54,08	35
6	20	14	54,08	35

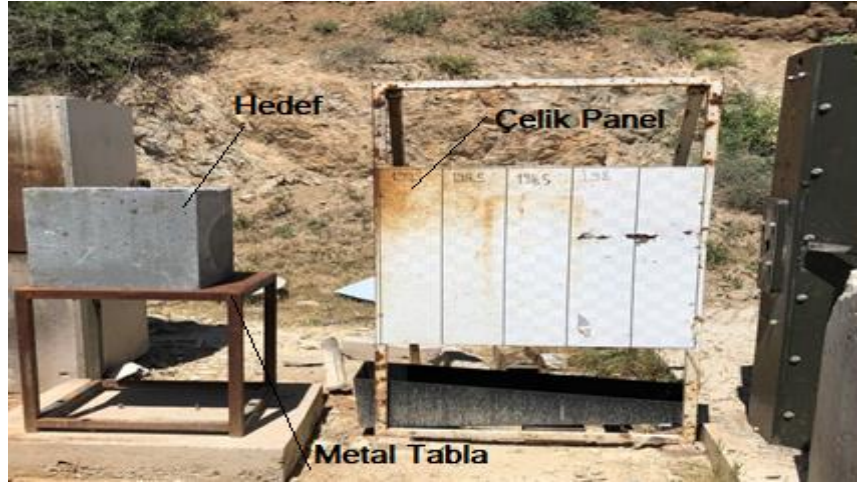
4.2.3. Barut Silahı Test Düzeneği ve Çalışma Prensibi

Barut silahı test düzeneği üç kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım üç parçalı barut silahıdır. Barut silahında yer alana namlular dört noktadan mesnetlenerek, taşıyıcı tablaya monte edilmiş haldedir. Özel alaşımlı çelikten imal edilmiş ve akma dayanımı çok yüksek namlular, test düzeneğinde kullanılan parçaların çaplarına uygun olarak demontable edilebilecek biçimde tasarlanmıştır. Barut silahının arka bölümünde barutun yerleştirildiği hazne ve hazne ön bölümünde delici parçanın yerleştirilebildiği ayrı bir bölüm bulunmaktadır. Ayrıca barut silahı ön bölümünde nişangâh bulunmaktadır. Nişangâh hedefe çarpan parçanın geri tepme yapması durumunda, sisteme zarar vermesinin önlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 4.8’de barut silahı test düzeneği görseli yer almaktadır.



Şekil 4.8. Barut silahı görseli.

Barut silahı test düzeneğinin ikinci kısmı hedef bölgesidir. Hedef bölgesinde, hedef ile barut silahının yükseklik seviyesini ayarlamak için hedef yapısının yerleştirildiği metal tabla ve hız verisini ölçmek üzere ayarlanmış özel çelik panel bulunmaktadır. Çelik panel 1000 mm uzunluğunda, 200 mm’de bir markalanmış ve hızlı kameranın görüntü açısında yer almaktadır. Çelik panel parçanın hızının ölçümlenebilmesi için yol verisini sağlamak üzere düzende yer almaktadır. Hedef bölgesi görseli Şekil 4.9’de yer almaktadır.



Şekil 4.9. Hedef bölgesi görseli.

Barut silahı test düzeneğinin üçüncü ve son kısım ise barut silahı ve hedef bölgesine dik konumlandırılan ve geniş açıyla görüntü alabilen hızlı kamera sistemidir. Test çalışmasında parçanın hedeflenen hızda hedefe çarpmasının tespiti hızlı kameralarla sağlanmaktadır. Testlerde kullanılan hızlı kameralar saniyede 14.400 ve daha üzeri fotoğrafı çekebilecek şekilde tasarlanmış özel kameralardır. Test esnasında parçanın geri tepmesi ve hızlı kameraya zarar vermesinin önlenmesi amacıyla kamera metal koronak arkasından görüntü almaktadır. Hızlı kamera sistemi

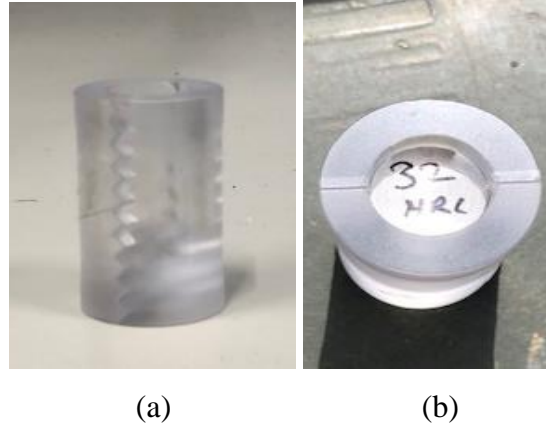
Şekil 4.10’da yer almaktadır.



Şekil 4.10. Hızlı kamera sistemi.

4.3. Balistik Test Çalışması

Çalışmada erişilmesi hedeflenen hız aralığı 800-1000 m/s olarak belirlenmiştir. Delici parçanın kütlesi 50-60 gramdır. Ağırlığa göre yapılan hesaplamalar sonucu 20-25 gr barut kullanılarak parçanın hedeflenen biçimde hızlandırılacağı değerlendirilmiştir. Barut silahının namlu çapı 25 mm ve parçanın çapı 14 mm'dir. Tungsten ağır alaşımı parçanın çapının namlu çapından daha düşük değere sahip olması ve namlu içinde sürtünmeye bağlı hasar oluşturmaya karşın testlerde sabo kullanılacaktır. Sabo dış çapı 25 mm, iç çapı 14,5 mm ve 25 mm boyunda olmak üzere plastik malzemeden ürettirilmiştir. Sabo namludan çıktıktan sonra hedefe çarpmadan önce uçuş sırasında delici parçadan ayrılmakta ve genellikle nişangâh tarafından tutulmaktadır. Sabo ve atış öncesi parçanın sabo içinde görseli Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. (a) Sabo görseli,(b)Atış öncesi parça görseli.

Barut silahı test düzeneğinin atışa hazır hale getirilmesi sürecinde kontrol adımları;

- Namlunun üç parçalı birleşimden oluşması ve atışlarda gerçekleşen geri tepmeler sonucu mesnet noktalarında düzensizlikler oluşmaktadır. Test öncesi mesnetlerin boşluk ve taşıyıcı tablanın düzlemsel kontrolleri su terazisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
- Nişangâh bölümünde yer alan boşluktan parçanın geçiş sağlayarak hedefe çarptırılacak olması nedeniyle barut silahı, nişangâh ve hedefin doğrusalılığı lazer cihazı ile ölçümlenmiştir.
- Tekrarlı atışlarda, her atış sonrasında yanan barut namlunun içinde kalabilir. Atış öncesi namlu içi harbi yapılarak temizlenmiştir.

Test düzeneğinin kurulum ve kontrol çalışmalarının tamamlanması sonrasında, delici parça namlu içine yerleştirilmiştir. Barut özel kâğıda sarılarak silah haznesine yerleştirilmiştir. Test düzeneğinde baruta düşük voltajlı elektrik akımının verilebilmesi için kablo bağlantıları yapılabilecek düzenek bulunmaktadır. Düşük voltajlı elektrik akımı, barutun yanmasını sağlayarak itki oluşturmakta ve delici parçanın yüksek hızda namlu içinden fırlatılmasını sağlamaktadır. Sistemin canlılara risk oluşturması nedeniyle, tetikleme işlemi için test düzeneğine uzak ve korunaklı bölgeye intikal sağlanmıştır.

Sistemin çalışır halde olduğunun tespiti sonrası tetikleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.4. Balistik Testler ve Değerlendirilmesi

Balistik test çalışmasında, ÇYDB'den üretilen hedef betonuna atış gerçekleştirilmeden önce, betonun davranışının kıyaslanabilmesi için 500X500X500 mm ebatlarında C35/45 hedef beton bloklar üretilmiş ve bu bloklara tungsten delici kullanılarak 3 adet referans atışı

gerçekleştirilmiştir. Atışlarla ilgili detaylı bilgiler ÇYDB'ye yapılan atışlar bölümünde verilecektir.

Referans atış çalışmasında kullanılan tungsten delicinin özellikleri Tablo 4.4'de yer almaktadır.

Tablo 4.4. Tungsten delici özellikleri.

Sıra No	Boy(mm)	Çap(mm)	Kütle (gr)	Sertlik (HRC)
1	20	14	54,04	35
2	20	14	54,11	34
3	20	14	53,82	34

Barut silahı sistemi kullanılarak gerçekleştirilen referans atış çalışmasında barut miktarı 20 gr olarak kullanılmış ve hız değerleri 740-750 m/s aralığında ölçümlenmiştir. Atış çalışmaları sonucunda C35/45 hedef betonundan ölçümlenen penetrasyon, hasar yüzeyi, delik çapı ve krater derinliğine ait sonuçlar Tablo 4.5.'te, tungsten delicinin hasar görüntüsü Şekil 4.12.'de ve hedef betonuna ait test hasar görüntüleri Şekil 4.13.'te yer almaktadır.

Tablo 4.5. Balistik test sonuç tablosu.

Hedef no	Hız(m/s)	Penetrasyon(mm)	Hasar Yüzeyi(mm)	Delik Çapı(mm)	Krater (mm) derinliği
1	740	75,60	300X300	26,40	81,20
2	750	150	500X300	28,60	170
3	750	85,20	270X230	27,14	88,30



Şekil 4.12. Test sonrası tungsten delicinin hasar görüntüsü.



(1)



(2)



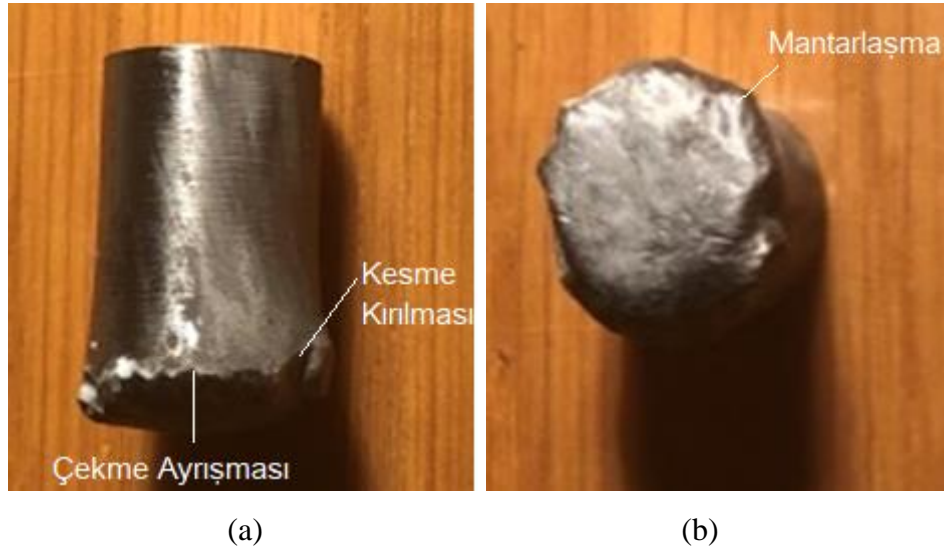
(3)

Şekil 4.13. C35/45 hedef betonu test hasar görüntüleri.

Referans atış çalışması sonucunda tungsten delici tüm kinetik enerjisini hedef beton numuneye aktarmış ve tungsten delici hedef içinde durdurulmuştur. Tungsten delici ön yüzeyinde bir miktar mantarlaşma oluşumu gözlemlenmiş ve ancak kırılma durumu tespit edilmemiştir. Hedef betonlarında hasar yüzeyinin belirgin biçimde gözlemlendiği ve betondan kütleler halinde parça kopmalarının varlığı tespit edilmiştir. Özellikle ikinci test çalışmasında, tungsten delici hedef bölgesinin arka bölümünde etkinlik göstermiş ve derin kırıklarla hedeften büyük boyutta parça kopmasına sebep olmuştur. Bu nedenle kopan parçanın hedef betonu ön yüzeyi ile arasındaki mesafe penetrasyon derinliği olarak değerlendirilmiştir. Birinci ve üçüncü test çalışmasında, parça kopmayan yüzeylerde ise

derin yapısal çatlakların var olduğu ve betonun arka yüzeyine doğru ilerleme sağladığı görülmektedir.

Referans atışlarının sonlandırılması ve alanın tekrar düzenlemesiyle ÇYDB'den üretilen hedef yapısına toplamda 6 başarılı atış gerçekleştirilmiş ve test sonrası hızlı kamera verileri incelenmiştir. Hedef bölgesinde yer alan çelik panelin toplam 1000 mm uzunluğunda ve 200 mm aralıklarla markalandığı bilinmektedir. Hızlı kamera ms zamanda fotoğraf çekmektedir. Parçanın 200 mm aralıktaki uçuşu sırasında çekilen fotoğraf sayısına göre zaman bilgisi elde edilmiştir. $x = v.t$ bağıntısı dikkate alınarak, sırasıyla mesafe, hız ve zaman ilişkisine uygun biçimde hız verisi ölçümlenmiştir. Buna göre, beş test çalışmasında barut miktarı 20 gr olarak uygulanmış ve hız verisi 795-860 m/s aralığında ve altıncı (son) test çalışmasında barut miktarı 5 gr artırılarak 25 gr olarak kullanılmış ve hız verisi 934 m/s ölçümlenmiştir. Ölçümlerin tamamlanması ve bölgenin güvenliğin sağlanması sonrası test düzeneğinin ve hedefin davranışının gözlemlenmesi ve ölçümler için test alanına geçiş sağlanmıştır. İlk olarak tungsten delici parçanın hedef üzerinde veya bölgede bulunmasına yönelik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Ancak 6 testte kullanılan tungsten delici parçalardan beş adedi, çok yüksek dayanımlı hedef betonuna çarptıktan sonra sekerek atış alanında bilinmeyen noktalara düşmüştür. Sadece dördüncü testte kullanılan delici parça bulunabilmiştir. Delici parçanın test sonrası görünümü Şekil 4.14.'te yer almaktadır.



Şekil 4.14. Tungsten parçanın test sonrası görüntüsü (a) Yan yüzey, (b) Üst yüzey

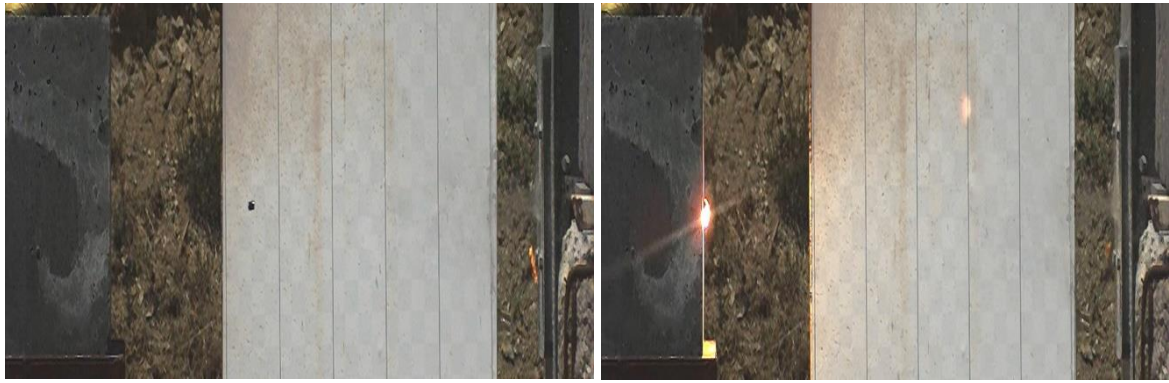
Delici parçada, yüzey bölgesinde kesme kırılması, çekme kuvvetlerinin etkisiyle çekme ayrışması ve mantarlaşma oluşumu gözlemlenmiştir. Hedefin ince olmaması

nedeniyle yapraklanma oluşmamıştır. Balistik testin görsel olarak ifadesi Şekil 4.15.'te yer almaktadır.



(a) 17 ms

(b) 17,30 ms



(b) 18 ms

(d) 20 ms



(e) 22 ms

Şekil 4.15. 5 nolu balistik testin zamana bağlı kaydedilen görüntüleri.

Çok yüksek dayanımlı betondan (135 MPa basınç dayanımında fiber katkısız) 500x500x500 mm ebatlarında üretilen küp hedefe, 14 mm çap ve 20 mm boyda silindirik tungsten ağır alaşımı delici parça 795-960 m/s hız aralığında 6 adet başarılı test atışı ile çarpıtılmıştır. Barutun ateşlenmesi ile tahrik edilen tungsten ağır alaşımı parça hızlı kameranın tetiklenmesi sonrasında namlunun uç kısmından barut silahını terk ettikten yaklaşık 17. ms'de görüntülenmiştir. Sabonun parçadan namlu bitiş bölgesi ile nişangah arasında ayrılmış ve nişangâh tarafından tutulduğu değerlendirilmektedir. Parça 17-20 ms aralığında ise x yönünde (zemine paralel) ve açı değişimi olmaksızın serbest uçuşunu sürdürmüştür. Parça 20. ms'de hedefe ilk temasını gerçekleştirmiş ve hedefe penetre olmaya başlamıştır. Bu aşamada çarpmadan kaynaklı olarak kıvılcım kümesi oluşmuştur. 20-22 ms aralığında delici parça hedef içindeki ilerlemesini sürdürmüş ve 22. ms'de hedeften beton parçaları koparak penetrasyon sonlanmıştır. Test sonrasında hasar yüzeyi, krater derinliği, penetrasyon derinliği ve delik çapı belirlenecektir. İfade edilenler sırasıyla, çarpan parçanın yüzeyde oluşturduğu deformasyon hasar yüzeyi alanı, x yönünde (zemine paralel) hedefe çarpan parçanın beton içinde z yönünde oluşturduğu deformasyon krater derinliği, x yönünde hedefte oluşan deformasyon penetrasyon derinliği ve çarpan parçanın hedefte oluşturduğu deliğin çapı ise delik çapı olarak tanımlanmaktadır. Hedeflerin test sonrası hasar görüntüleri Şekil 4.16'da ve test sonuç bilgileri Tablo 4.6'de yer almaktadır.



(1)



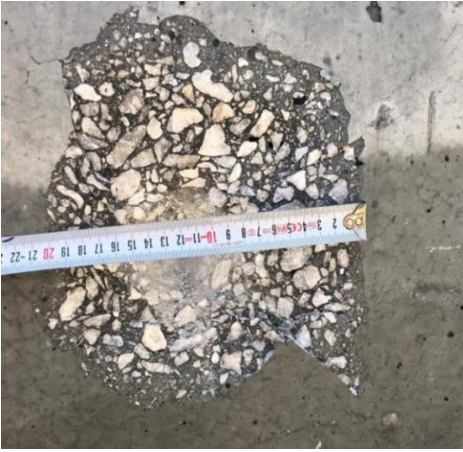
(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

Şekil 4.16. Çok yüksek dayanımlı hedef betonların balistik test sonrası görüntüleri.

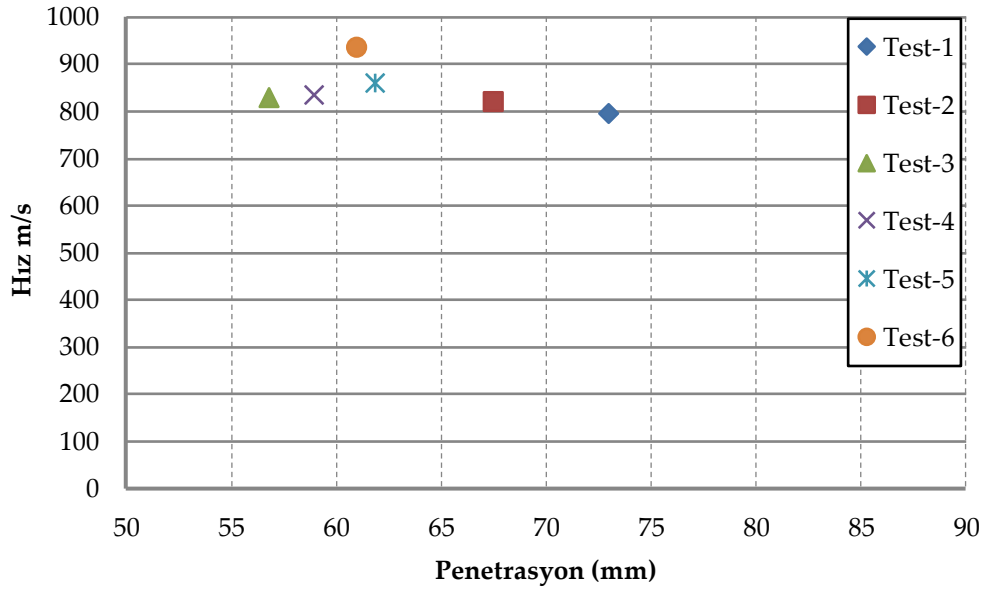
Tablo 4.6. Balistik test sonuç tablosu.

Hedef no	Hız(m/s)	Penetrasyon(mm)	Hasar Yüzeyi(mm)	Delik Çapı(mm)	Krater (mm) derinliği
1	795	73,00	250X230	20,00	70,00
2	820	67,51	200X230	25,70	58,25
3	828	56,84	170X200	26,14	62,23
4	835	59,00	230X210	21,00	63,00
5	860	61,88	200X230	28,20	62,15
6	934	61,00	240X250	24,00	57,00

Şekil 4.16'da yer alan hedef hasar görüntüleri incelendiğinde, çarpma sırasında parçanın çarptığı bölgeye yakın olarak radyal gerilme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmektedir. Radyal gerilme çatlakları parçanın ilk temas anında çarpma bölgesinde oluşan çatlaklardır. Bu tür çatlaklar genellikle gevrek hedef yapılarında görülmektedir. Çatlaklar süresiz ve derin değildir. ÇYDB gevrek malzeme olması nedeniyle radyal gerilme çatlaklarına bağlı olarak çimento hamuru yüzeyden sıyrılmıştır. Agregalarda ise herhangi bir bozulma oluşmamıştır. Balistik testlerde bu bölüm hasar yüzeyi olarak adlandırılmaktadır. Balistik test çalışmasında hasar yüzeyi tüm hedefler için 170X250 mm aralığında ölçümlenmiştir. 2 ve 6 nolu hedef yapılarında radyal gerilme çatlaklarına ilave olarak kesme çatlakları oluşmuştur. 6 nolu hedefte ise daha belirgin haldedir. Çarpma olayında yüzeyde oluşan ve ilerleyen basınç gerilme dalgaları, tersinir olarak çekme gerilme dalgası olarak yansımaktadır. Bu durumda, oluşan çekme gerilme değerinin betonun çekme gerilmesi sınırını aşması sonucu kesme çatlakları görülebilir. Kesme çatlakları sürekli ve hedefle yaklaşık 45⁰ açı yapan ve derin olmayan biçimde oluşmuştur. Bütün hedeflerde üretim şartları aynı olmasına rağmen, 6 nolu hedefe daha yüksek hızda ve daha sert parçanın fırlatılması sonucu kesme çatlaklarının oluştuğu değerlendirilmektedir. Parçanın süneklik yapısı çarpma üzerinde etkinlik sağlayan bir diğer parametredir. 1-6 nolu hedeflere çarptırılan parçanın çapı 14 mm'dir. Hedeflerde ölçülen delik çapı 20-28 mm aralığındadır. Çarpan parça, çapının yaklaşık 2 katı ölçüsünde hedefte delik çapı hasarı oluşturmuştur. 1-6 nolu hedeflerde parçanın penetre ettiği bölgede yer alan çimento hamuru ve agregalardan kopmalar gerçekleşmiştir. Hedefin kesitinden ölçülebilen değer krater derinliği olarak ifade edilmektedir. Testlerde krater derinliği 57-70 mm aralığında ölçümlenmiştir. Son olarak 1-

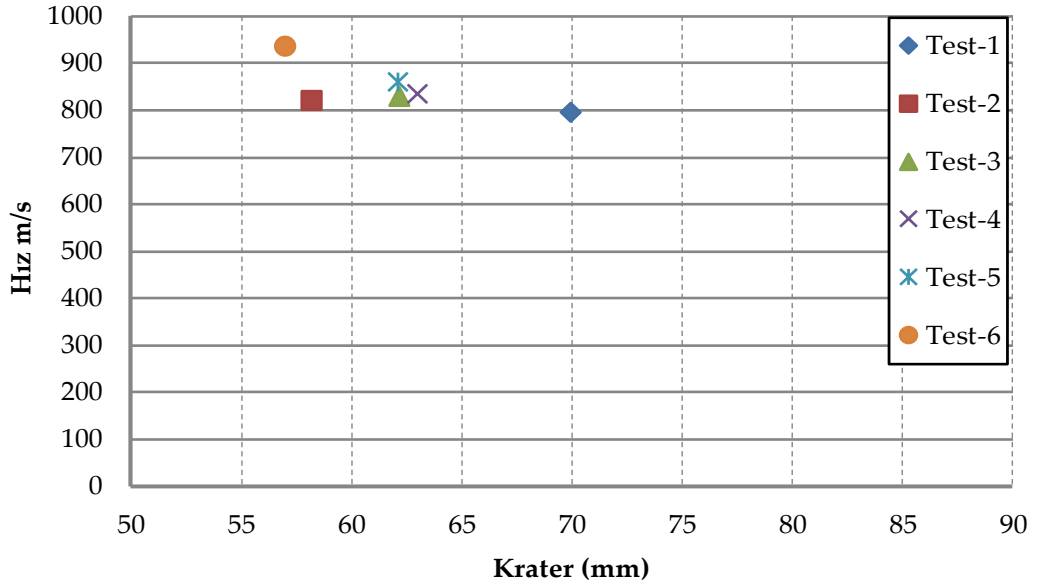
6 nolu hedeflerde 795-934 m/s hız aralığında ve çarpan parçanın özelliğine göre değişkenlik gösterebilen penetrasyon derinliği 56-73 mm aralığında ölçümlenmiştir.

Tablo 4.6 incelendiğinde son teste ulaşılan hız önceki testlere oranla 934 m/s olarak ölçümlenmiştir. Barut miktarının artırılmasının benzer ağırlıktaki parçanın hızlandırılmasına olumlu katkılar sağladığı görülmektedir. Benzer ağırlıkta ve sertlik değerine sahip parçaların, hedefle açı yapmayacak biçimde hızlarının artırılması sonucu penetrasyon derinliği artırmaktadır. Zira hızın artmasıyla kinetik enerjiyi artırmaktadır. Hedefin yüklenen kinetik enerjisi karşısında davranışı değişkenlik göstermektedir. Balistik atış sonuçlarına ait hız penetrasyon ilişkisi Şekil 4.17.'de yer almaktadır.



Şekil 4.17. Hız penetrasyon ilişkisi

Tablo 4.6 incelendiğinde penetrasyon derinliği ilişkisine benzer olarak hızın artması ile birlikte numune benzer numune koşullarında (ağırlık ve sertlik) hedef betonlarda krater derinliğinin arttığı gözlemlenmektedir. Parçanın sivri uçlu olmaması ve silindirik küt burunlu olması nedeniyle ölçülen penetrasyon derinliği ve krater derinliği ölçümleri benzer aralıkta sonuçlanmıştır. Hız-krater derinliği ilişkisi Şekil 4.18'de ifade edilmektedir.



Şekil 4.18. Hız krater derinliği ilişkisi.

Hedef yapılarında donatı (inşaat çeliği) veya fiber katkıları kullanılmamıştır. Bu tip katkıları, çarpma esnasında oluşan basınç dalgalarının çeki dalgası olarak yansıması sonucu betonun zayıf olan çekme davranışının iyileştirilmesine yönelik görev almakta ve betonun dağılmasını önlemekte veya hasar yüzeyinin azaltılmasında olumlu katkıları sunmaktadır. Balistik testlerde hedef yapılarında yüzeysel hasarlar meydana gelmiş ve penetrasyon ile krater derinliğinin 3 katı kadar hasar yüzeyi oluşumu gözlemlenmiştir.

5. MALZEME MODELİ

5.1. Giriş

Bu bölümde, çarpma mekaniği alanında yürütülen sayısal analiz çalışmalarında sıklıkla kullanılan Holmquist Johnson Cook (HJC) malzeme modeli tanımlanacaktır. Geliştirilen ÇYDB'nin HJC malzeme modeline entegrasyonu için yarı-statik testler ve SHBÇ test verileri değerlendirmeye alınacaktır. Modelin parametre belirleme çalışmaları için Matlab programında geliştirilen kodla çok değişkenli regresyon analizi çözümü sağlanacak ve ÇYDB'nin HJC malzeme modeline entegre edilmiş parametre tablosu oluşturulmasına yönelik bilgilere yer verilecektir.

5.2. Holmquist Johnson Cook Malzeme Modeli

Holmquist Johnson Cook (HJC) malzeme modeli genellikle beton malzemelerin çarpma, darbe basıncı ve patlamaya karşı davranışının belirlenmesinde kullanılmaktadır. HJC modeli elastik-viskoplastik model olarak Holmquist tarafından geliştirilmiştir [67]. HJC modeli yüksek gerinim, gerinim hızı ve yüksek basınç altında betonun davranışının tespiti için son günlerde sıklıkla tercih edilen malzeme modelidir. Bu malzeme modeli ticari sonlu elemanlar yazılımı olan Ls-Dyna programına 1997 yılında *Mat-Johnson-Holmquist-Concrete (111#) olarak eklenmiştir [68].

HJC model olarak dayanım, hasar ve EOS (Equation Of State) bölümlerinden oluşmaktadır. Alt başlıklarda malzeme modeli ve matematiksel açıklamalarına yönelik bilgilere yer verilmektedir.

5.2.1. Dayanım

HJC malzeme modelinin matematiksel formu aşağıdaki gibidir;

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}][(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)] \quad (5.1)$$

Denklemden gerilme ve basınç için gösterilenler $\sigma^* = \sigma/f_c$ ve $P^* = P/f_c$ sırasıyla normalize edilmiş gerilme ve basınç değerlerini, ara denklemde kullanılan f_c betonun karakteristik basınç dayanımını, σ eşdeğer gerilmeyi, P gerçek basıncı ifade etmektedir.

Denklemden diğer ifade edilenler, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}^*$ birimsiz nicelik olan normalize edilmiş gerinim hızını, $\dot{\epsilon}$ gerinim hızını, $\dot{\epsilon}_0$ referans gerinim hızını ifade etmekte ve hesaplamalarda genellikle $1 s^{-1}$ olarak değerlendirmeye alınmaktadır. $T^* = T/f_c$ normalize

edilmiş çekme gerilmesi denklemini, T çekme gerilmesini, f_c betonun karakteristik basınç dayanımını ifade etmektedir. S_{max} maksimum gerilmedir.

Denklemden bulunan sabitler A, B, C ve N ise, sırasıyla dayanıma, basınca, gerinim hızına ve basınç sertleşmesine bağlı parametrelerdir.

5.2.2. Hasar

HJC modelinde çarpma sonrasında hasar durumu aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_P + \Delta \varepsilon \mu_P}{\varepsilon_P^f + \mu_P^f} \quad (5.2)$$

Burada $\Delta \varepsilon_P$ efektif plastik gerinim değişimi ve $\Delta \varepsilon \mu_P$ sabit basınç altında plastik hacimsel gerinim değişimi, $\varepsilon_P^f + \mu_P^f$ ise kırılma gerçekleşene kadar sabit basınç altında toplam plastik gerinimi ifade etmektedir.

$$\varepsilon_P^f + \mu_P^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \geq EFMIN \quad (5.3)$$

Bu ifadede EFMIN malzeme sabitidir.

5.2.3. EOS

HJC modelinde çarpma anında betona aktarılan basıncın, beton içindeki boşlukları kapatarak kompakt hale gelmesi durumu EOS (durum denklemleri) ile sağlanmaktadır. EOS üç aşamada gerçekleşmektedir.

Birinci faz elastik durum olarak tanımlanmaktadır. Negatif basınç ile elastik limit noktası aralığında malzeme lineer elastik formdadır.

$$P = K\mu; P < P_{basl} \quad (5.4)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan ifade edilen, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ olarak hesaplanmakta olup, burada ρ_0 ilk yoğunluk, ρ ise o anki yoğunluk, K bulk modülüdür. $K = P_{basl}/\mu_{basl}$ olarak hesaplanmaktadır. P_{basl} elastik limit noktasında oluşan hacimsel gerinim μ_{basl} olarak ifade edilmektedir.

İkinci faz betonun içinde yer alan boşlukların tam olarak kapatılmasına kadar geçen geçiş aşamasıdır. Bu aşama μ_{kilit} ve P_{kilit} noktasına erişinceye kadar devam etmektedir.

İkinci faz aşağıda yer alan denklem ile ifade edilebilir;

$$P = P_{bası} + K_{kilit}(\mu - \mu_{bası}) \quad (5.5)$$

$K_{kilit} = (P_{kilit} - P_{bası})/(\mu_{pkilit} - \mu_{bası})$, μ_{pkilit} sıkışmış durum P_{kilit} anındaki hacimsel gerinimdir.

Son ve üçüncü aşama betonun içinde hiçbir boşluğun kalmadığı kompakt durum olarak açıklanabilir.

$$P = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3 \quad (5.6)$$

Denklemden yer alan, $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{kilit})/(1 + \mu_{kilit})$ hacimsel gerinim dönüşümünü, $\mu_{kilit} = \frac{\rho_{kompakt}}{\rho_0} - 1$, $\rho_{kompakt}$ betonun içinde hiç boşluk kalmadığı kompakt haldeki yoğunluğu ve K_1, K_2 ve K_3 malzeme sabitlerini ifade etmektedir.

5.3. Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Model parametrelerinin belirlenmesine öncelikle betonun fiziksel özelliklerine bağlı olarak belirlenebilecek büyüklüklerin tespiti ile başlanmıştır. ÇYDB üretim esnasında numune alma kalıplarına yerleştirilmiş ve birim hacim ağırlığı (yoğunluğu) 2,7 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. Yarı-statik test sonucunda, ÇYDB'nin basınç dayanımı 135 MPa olarak ölçümlenmiştir. Literatürde, betonun karakteristik basınç dayanımı ile Elastisite Modülü arasında ilişkiler kurulmuştur. ACI (American Concrete Institute) komitesi beton malzemelerin eşdeğer küp basınç dayanımının %45'i ve civarında Elastisite Modülü (GPa) değerlerine sahip olacağını bildirmiştir [69]. Bu sebeple, ÇYDB'nin Elastisite Modülü 76,36 GPa olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Modelde kullanılan kayma modülü G ise $E/2(1+\nu)$ formülü aracılığıyla hesaplanmıştır. Formülde yer alan Poisson oranı ν , eksenel yüke maruz kalmış bir malzemedeki elastik bölge içerisinde yanıl birim deformasyonların eksenel birim deformasyona oranı olarak ifade edilebilir. Betonlarda Poisson oranı 0,15 ile 0,22 değerleri arasında değişkenlik göstermektedir [70]. Bağıntıdan $\nu=0,15$ için G kayma modülü 33,2 GPa olarak hesaplanmıştır. Malzeme modelinde yer alan diğer bir parametre betonun çekme dayanımı T değeridir. Betonun çekme dayanımı değerinin, basınç dayanım değerinin 10'da biri veya daha düşük olması beklenir [71]. Beton sınıflarına göre yapılan

değerlendirme ve interpolasyonlar sonucu T çekme dayanımı 8,4 MPa olarak hesaplamaya dâhil edilmiştir. Son olarak S_{max} maksimum gerilme, literatürde farklı basınç dayanımına sahip betonların sahip oldukları değerlere göre interpolasyonla 12,5 MPa olarak hesaplanmıştır [72-76].

HJC modelinde yer alan diğer parametrelerin belirlenmesine yönelik olarak SHBÇ test verileri değerlendirmeye alınmıştır. 10^2 - 10^3 s⁻¹ gerinim hızları aralığında gerçekleştirilen testlerin sonucunda zamana bağlı anlık gerilme değerine karşı, gerinim ve gerinim hızı değerleri elde edilmiştir.

5.4. Deneysel Verilerin Değerlendirmesi ve Malzeme Parametreleri

ÇYDB' nin yarı statik ve SHBÇ testleri sonuçları uyarınca elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirmeye alınmıştır. Özellikle SHBÇ deneysel çalışmalarında her bir testte zamana bağlı olarak gerilme, gerinim ve gerinim hızına ait farklı 6000 veri ve daha üzeri ölçüm alınmıştır. Bu bağlamda deney verilerin tutarlı hale getirmek ve yaklaşım sergilemek için Matlab arayüzünde geliştirilen kodla çoklu değişkenli regregrasyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntemle, hata analizi gerçekleştirilmiş gözlem ve tahmin değerleri arasındaki farkın en küçük aralıkta tutulması hedeflenmiştir. Geliştirilen kodla HJC malzeme modelinin 5.16 denkleminde yer alan A, B, C, N parametreleri ve D parametresinin içine gömülü halde yer alan D₁, D₂, K₁, K₂ ve K₃ parametrelerinin tespiti için gerçekleştirilen hata analizi sonucu %1 ve altında hata değerlerine sahip sonuçlar değerlendirmeye alınmıştır.

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (5.16)$$

Matlab arayüzünde gerçekleştirilen çalışmayla, 21 numunenin SHBÇ test verilerinin hata analizi sonucu tespit edilen parametre değerleri Tablo 5.1'de yer almaktadır.

Tablo 5.1. C135 MPa deney parametre tablosu.

Deney No	A	B	C	N	K ₁	K ₂	K ₃	D ₁	D ₂
1	0,0055	1,54	0,01374	0,4	14,8	-22,6	25,2	0,003	1
2	0,1425	1,4473	0,010031	0,35	11,2	-25,3	28,9	0,00178	1
3	0,6439	1,2334	0,007536	0,27	15,6	-45,6	27,3	0,00079	1
4	0,2657	1,4488	0,010081	0,75	13,54	-47,8	23,5	0,00202	1
5	0,2204	1,4464	0,010037	0,45	28,96	-29,4	16,2	0,00254	1
6	0,5199	1,533	0,007498	0,83	14,8	-26,2	34,2	0,001	1
7	0,3683	1,309	0,008371	0,37	16,98	-29,4	34,5	0,0066	1
8	0,2555	1,3904	0,009291	0,37	16	-27,5	38,58	0,0012	1
9	0,2407	1,5993	0,009392	0,69	22,67	-56,7	26	0,00121	1
10	0,3126	1,5265	0,008594	0,32	14,8	-60	21,7	0,0087	1
11	0,1509	1,5958	0,009334	0,59	14,8	-30,2	32,5	0,00101	1
12	0,2874	1,4706	0,009066	0,76	9,4	-40,6	36,4	0,00193	1
13	0,5949	1,4434	0,010319	0,65	14,5	-34,8	14,2	0,0032	1
14	0,2563	1,4332	0,009866	0,68	9,8	-40,3	13,25	0,00367	1
15	0,3918	1,4372	0,009836	0,75	8,6	-28,3	12,9	0,00308	1
16	0,3057	1,3325	0,008648	0,86	23,85	-47,2	11,25	0,0077	1
17	0,3356	1,4455	0,010087	0,59	14,8	-43,2	27,4	0,00135	1
18	0,1466	1,7909	0,029085	0,57	22,9	-23,4	28,94	0,00148	1
19	0,2695	1,4484	0,01011	0,55	12,25	-59,8	35,2	0,00209	1
20	0,2865	1,8	0,01567	0,87	24,75	-50,87	28,7	0,0032	1
21	0,3223	1,81	0,0123	0,81	15,23	-67,25	27,8	0,0062	1

SHBÇ testinin sonuçlarındaki farklılıkların Tablo 5.1’de elde edilen parametre sonuç tablosuna yansıdığı görülmektedir. 3.Bölümde sonuçların farklılıkların nedenleri aktarılmıştır. Ancak değerlerin belirli bir aralıkta saçılım gösterdiği görülmektedir. Bu sebeple modelde kullanılacak nihai parametre değerlerinin belirlenmesi için her bir değer ortalama değerlendirilmeye alınmıştır. ÇYDB’nin mekanik özelliklerine göre elde edilen sonuçlarla birlikte HJC modeline entegre edilen ve sayısal analizde kullanılacak ÇYDB’nin parametre tablosu Tablo 5.2’de oluşturulmuştur.

Tablo 5.2. ÇYDB'nin parametre tablosu.

ρ (kg/m ³)	G, GPa	A	B	C	N	f_c, MPa	T,MPa	EPS ₀
2700	33,2	0.30	1,50	0,01	0,59	135	8,4	1,00
E_{fmin}	S_{fmax}	$P_{bası, \text{GPa}}$	$P_{kilit, \text{GPa}}$	D1	D2	K_1, GPa	K_2, GPa	K_3, GPa
0,001	12,5	0,162	0,000095	0,003	1,000	16,2	-40	26

Ayrıca, Holmquist [68] tarafından geliştirilen malzeme modelinde yer alan EPS₀, E_{fmin}, P_{bası} ve P_{kilit} parametrelerinin standart değerleri ÇYDB model parametre tablosuna eklenmiştir.

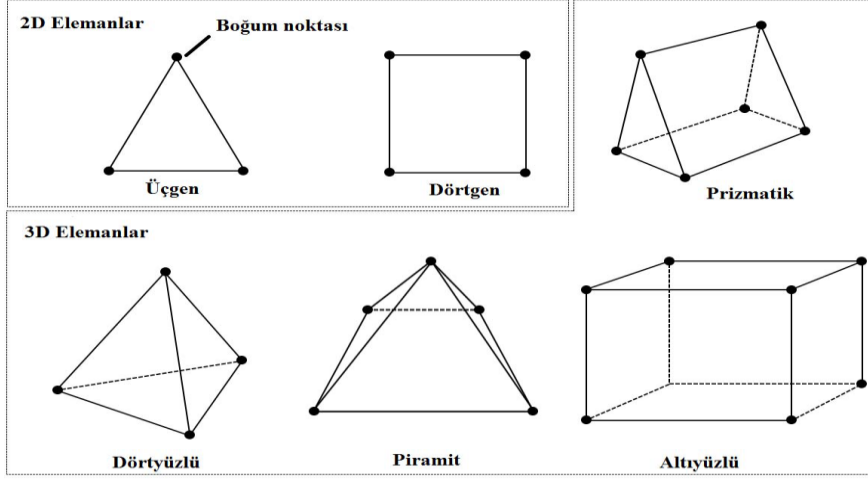
6. SAYISAL ANALİZ VE DEĞERLENDİRMELER

6.1. Giriş

Bu bölümde, literatür özeti, sayısal analizin gerçekleştirilmesi için modelleme çalışmaları, analiz sonuçları, balistik testler ve analiz çalışmasının hedef ve delici parçanın davranışının benzetimine yönelik bilgilere yer verilecektir.

6.2. Literatür Özeti

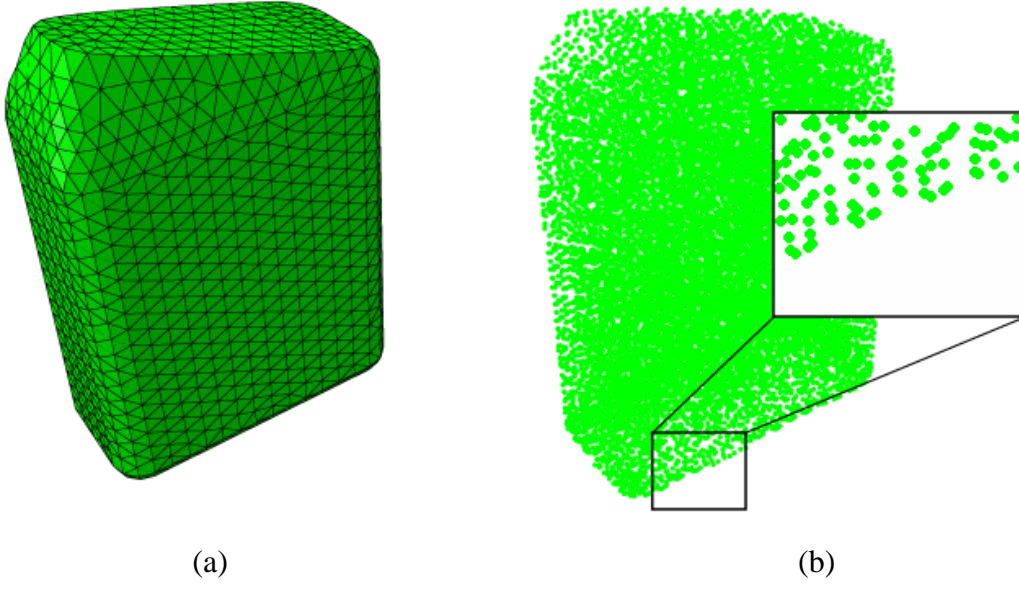
Balistik testler kapsamında yürütülen çalışmalar yüksek hızda ve enerjide gerçekleşen olayların sonuçlarını ölçümlemeyi hedefler. Test çalışmaları, nitelikli altyapı, cihaz ve ekipman, ölçüm sistemi, eğitilmiş personel ihtiyacı sebebiyle yüksek maliyetlere katlanılarak gerçekleştirilebilir. Bu sebeple günümüzde, test çalışmalarının sıklığını azaltarak zamanı verimli kullanmak, maliyet sorunlarını minimize ve matematiksel olarak durumu ifade edebilmek üzere sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Sayısal çalışmalar algoritma kurulumu, geliştirilmesi ve analiz edilebilmesi sonucu bilgi aktarımı sağlamaktadır. Bu metotla malzeme modelleri geliştirilerek analizler gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışmalar ile kıyaslanarak doğrulamalar sağlanmıştır. Günümüzde çarpma mekaniği problemleri genellikle, sonlu elemanlar yöntemi kullanan ve hidrokod yazılımlarıyla çözüm üreten Ls-Dyna, Autodyn, Abaqus vb. ticari yazılımlar kullanılarak çözümlenmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi yapı statikliği, gerilme analizi, dinamik analizler, ısı aktarımı, akışkanlar mekaniği, çarpma mekaniği, kütle aktarımı ve elektrik potansiyeli gibi tüm mühendislik ve bilim problemlerinin çözümünde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca iki veya üç boyutlu kısmi diferansiyel denklemleri ve sınır değer problemlerinin çözümünde uygulanmaktadır [77]. Yöntem ilk kez 1940'lı yıllarda öne sürülmüş ve 1950'li yıllarda uçak tasarımlarında kullanılmaya başlanmıştır [78]. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık problemleri 1D, 2D ve 3D ölçeğe basite indirgeyerek çözümleme sağlamayı hedeflemektedir. Nesne öncelikle elemanlara bölünür ve geometrik oluşumdan kaynaklı olarak elemanlar üzerindeki düğüm noktaları işaretlenir. Tip eleman geometrileri Şekil 6.1'de yer almaktadır.



Şekil 6.1. Bazı Eleman geometrileri [79].

Matematiksel optimizasyon çözümleri için genellikle Lagrange ve Euler çözümleri kullanılmaktadır. Sayısal çalışmalarda, katılar için malzemenin malzemeye akış oluşmaması nedeniyle Lagrange çözümleri, sıvılar için malzemenin malzemeye akış oluşması nedeniyle Euler çözümleri tercih edilmektedir.

Çarpma testlerinde hedef ve çarpma etkileşimi sonucunda kütle kaybı ve fiziksel olaylar (kırık, çatlak ve parça kopması vb.) meydana gelmektedir. Nümerik çalışmalarda bu durum malzemenin erozyona uğratılması ile ifade edilmektedir. Lagrange çözümünde yüksek deformasyonlar sebebiyle erozyon gerçeklikle uygun nitelikte ifade edilememektedir [80]. Bu nedenle yüksek deformasyonlarda gerçeklikle daha iyi bir ilişki kurulabilmesi için Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) ağsız yöntem kullanılmaktadır. Lagrange çözümlerine uygun geliştirilen SPH, ilk kez 1977 yılında astrofizik alanında kullanılmıştır [81,82]. Yıllar içindeki gelişimle birlikte çarpma mekaniği problemlerinin çözümünde kullanımı yaygınlaşmıştır. Lagrange ve SPH yöntemiyle oluşturulan modellere ilişkin görsel Şekil 6.2’de yer almaktadır.



Şekil 6.2. (a) Örnek Lagrange-Lagrange model, (b) Örnek SPH modelleme[83].

SPH çözümlemesinde gözlemlenen noktalar, Lagrange-Lagrange olarak bölünmüş elemanların düzleminin yok edilmesi sonucu kalan düğüm noktalarıdır. Noktalar bir etkileşim çapının içinde yer almakta ve birbirleriyle iletişim halinde bulunmaktadır. Özellikle gevrek yapıdaki betonların çarpma yüklemesi altında davranışının belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen balistik testlerde hedefte oluşan parçacıklanma, SPH yöntemi kullanılarak simule edilebilmektedir.

Birçok araştırmacı betonun ve çarpan parçanın yüksek hızlı çarpma etkisi altında davranışını deneysel verilerle doğrulama sağlayarak simule etmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalarda, Chahmi Oucif vd. [84], literatürde yer alan 25,30 mm çap ve 152 mm boyunda sivri uçlu hafif parçanın, 540-745 m/s hız aralığında 675x675x200 mm ebatlarında inşaat çeliği ile güçlendirilmiş hedefe çarptırılmasıyla gerçekleştirilen balistik testi sayısal olarak modellemiştir. Model olarak Johnson-Holmquist (JH-2) hasar modelini 8 noktalı heksahedron elemanlar kullanarak, çarpma bölgesinde 5x5x5 mm ve geri kalan kısmında 20x20x20 mm boyutlarında elemanlara bölerek gerçekleştirmişlerdir. Beton hedefin çarpma sonucu zamana bağlı olarak hasar, basınç konturları ile kinetik ve iç enerji değişimine yönelik değerlendirmelerde bulunmuşlar ve JH-2 modelinin çarpma koşullarında deneysel çalışma ile birebir örtüşen sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Fenglei Huang vd. [85], 25,4 mm çap ve 143,70 mm boyda çelik parçanın, 743 m/s hızda 510x610x178 mm ölçüsünde inşaat çeliği ile güçlendirilmiş hedef yapısına çarptırılmasıyla gerçekleştirilen

balistik test çalışmasını sayısal olarak modellemişlerdir. Taylor Chen Kuzmaul sürekli hasar modelini revizyona uğratarak 8 noktalı heksahedron elemanlar kullanarak gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada, penetrasyon sonrası parçanın hızını deneysel çalışma ile yakın değerinde 580 m/s olarak ve ön-arka yüzeyde oluşan hasarları benzer görüntülerle elde etmiştir. Chahmi Oucif vd. [86], 150 mm çap ve 152 mm boyda çelik parçanın, 1500x1500x150 ve 675x675x200 mm iki farklı inşaat çeliği ile güçlendirilmiş hedef betona 540-745 m/s hızda çarptırıldığı balistik testi nümerik olarak modellemişlerdir. Sayısal çalışmada, düşük hızlar için Concrete Damage Plasticity Model (CDP) ve yüksek hızlar için JH-2 malzeme modelini 8 noktalı heksahedron elemanlara bölerek modellemişlerdir. Zamana bağlı olarak hasar konturları ve yoğunluk değişimlerini inceledikleri çalışmanın sonucunda iki modelin çarpma koşullarını iyi bir biçimde simule ettiğini ve deneysel çalışma ile birebir örtüşen sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Gordon Johnson vd. [87], 144 mm uzunluk 25,4 mm çap çelik parçanın 300-1058 m/s başlangıç hızında 178 mm kalınlıkta beton hedefe çarptırıldığı balistik testi nümerik olarak modellemişlerdir. Çalışmada HJC malzeme modelini gerinim hızı hassasiyetine yönelik olarak iyileştirmeyi başararak, test sonuçlarıyla örtüşen davranış ve penetrasyon sonrası parçanın hızını ölçmüşlerdir. Jun Feng vd. [88], çalışmada çok yüksek dayanımlı beton üreterek balistik test gerçekleştirmiş ve sayısal modellemeyle deneysel çalışmayı simule etmiştir. Deneysel çalışmada sivri uçlu 8 mm çap ve 34 mm boy, konik uçlu 10 mm çap ve 91 mm boyda zırh delici parçayı 820 m/s, 104 mm çapında ve 50 mm, 100 mm farklı boylarda silindirik iki farklı hedefe çarptırmışlardır. Sayısal çalışmada Lattice Discrete Particle Model (LDPM) malzeme modelini kullanarak yüksek hızlarda deneysel çalışmayı doğrulayan perforasyon ölçümleri elde etmişlerdir. L.M. Bresciani vd. [89], çalışmalarında küt formlu tungsten alaşımli parçanın seramik hedefe balistik atışını Lagrange ve SPH yöntemi ile modelleyerek elde ettikleri sonuçları literatürde yer alan verilerle karşılaştırmaya tabii tutmuşlardır. Çalışmanın sonucunda Lagrange çözücüsü kullanılarak elde edilen erozyon modeline oranla geliştirilen parçacıklaşma modelinin penetrasyon sonrası parçanın hızını, hedefin hasar morfolojisi ve parçanın kütle kaybının tahmininde daha etkin olduğunu ifade etmişlerdir. M. Mabssout vd. [90], çalışmalarında Taylor-SPH çözümlene yöntemlerine yönelik çözümlene aracı geliştirerek geleneksel sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenmeye kıyaslama sağlamıştır. Geliştirilen çözümlene aracının, sayısal kararsızlıklardan kaçınma, çarpma durumunda oluşan şok dalgasının düzgün ilerlemesi sonucu sayısal dağılım, saçılmanın minimize edilmesi ve viskoplastik malzemelerde göçme öncesi kesme kırılmaları gibi olguların daha önceden tespit edilmesine olanak sağladığı ve gerçek durum için güçlü tahmin ortaya

koyabildiğini ifade etmişlerdir. H. Idder vd. [91], çalışmalarında Taylor-SPH yöntemiyle, 4. seviyeden Runge Kutta ile kombine edilmiş SPH yöntemini nümerik uygulamalar gerçekleştirerek kıyaslamışlardır. Taylor-SPH yönteminin kombine SPH yöntemine oranla daha kararlı, üstün ve efektif çözümlerler ortaya koyduğunu ve önceki çalışmalarda belirtilen avantajları sağladığını ifade etmişlerdir. Dong Luo [92], çalışmasında HJC modelinin fiber katkılı yüksek dayanımlı betonlarda çatlak ilerlemesi ve süneklik olgularının ifadesinin eksik olduğunu belirtmiş ve fiber katkılı betonu modellemiştir. SHBÇ sisteminin sayısal modellenmesi ile gerçekleştirilen çalışma sonucunda, orta bölüm deplasman (sehim) değerlerinde deneysel çalışmayla örtüşen sonuçlar elde etmiştir. Barış İrhan [93] tez çalışmasında, betonun çarpma davranışının izlenmesine olanak sağlayacak sonlu elemanlar mantığı ile çalışan yeni bir kod geliştirmiştir. Geliştirdiği kodla betonunun yüksek gerinim hızında çarpma davranışını analiz etmiş ve literatürde bulunan deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, deneysel çalışmalarda, betonun yüksek gerinim hızındaki davranışının daha mukavim olduğunu ve sadece 10^{-1} s gerinim hızına kadar bu bilginin geçerli olduğunu, ilgili gerinim hızının ötesinde davranışın farklılık göstermediğini ifade etmiştir. Yapısal iç kuvvetlerin sadece malzemenin dayanımı üzerinde etkili olmadığını, yüksek yükleme hızında kırılma modu değişimi ve kırık dağılımına etki ettiğini bildirmiştir. Parça çarpma testiyle ilgili yaptığı çalışmada ise 10^4 s⁻¹ gerinim hızında betonun katıdan çok sıvı veya gaz şeklinde davranış gösterdiğini ve kodda revizyon yapılması gerekliliğini aktarmıştır. Ayrıca 1000 m/s çarpma hızı civarında doğru davranışın modellenebileceğini ifade etmiştir. Guillermo A. Mata [94] tez çalışmasında, HJC ve JH-2 malzeme modellerini kullanarak güçlendirilmiş beton hedefi 8 noktalı heksahedron elemanlarla modelleyerek mühimmat çarpmasını simule etmiştir. Literatürden aldığı test sonuçları ve modeli arasındaki kıyaslama sonucunda, sayısal çalışmada iki modelinde eğilme davranışını üst düzeyde, hasarı ise belirli ölçüde yansıttığını ifade etmiştir. Azize Ceren Satoğlu [95] tez çalışmasında, çelik tel donatılı betonunun ve şerbet kıvamlı lifli betonun çarpma yüklemesi altındaki davranışını gözlemlemek için sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Simülasyonlar ve deney verilerini krater çapı, krater derinliği, krater hacmi ve çarpma sonrası mermi hızı parametreleri bakımından karşılaştırmıştır. Betonun basınç ve çekme dayanımlarının çarpma yüklemesi sonucunda oluşan krater hacmi açısından oldukça önemli olduğunu, merminin ve hedefin modellenmesinde kullanılan erozyon değerlerinin ise merminin çarpma sonrası hızını büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir. Deney ve analizlerin birbirine daha yakın sonuçlar verebilmesi için simülasyonlarda kullanılacak malzeme parametre değerlerinin elde edilmesinin önemli olduğunu ifade etmiştir.

Literatür verileri değerlendirildiğinde, birçok araştırmacı betonun yüksek hızlı çarpma koşulları altında modellenmesine yönelik çalışmalarda, HJC malzeme modeli ve versiyonlarını, çelik ve tungsten alaşımı parçaların beton hedeflere çarptırılmasına yönelik olarak, Ls-Dyna vb. hidrokod çözümlenmesi yöntemiyle çalışan programlar ve çeşitli programlama tabanlı ara yüzler kullanarak doğrulamayı başarmışlardır.

6.3. Sayısal Analizler

Sayısal analiz çalışmalarında balistik testlerde yer alan koşulların modellenmesi ve balistik test sonuçlarına uygun verilerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Analizler Ls-Dyna yazılımı ve ANSYS program çözücülerinin kullanımı ile gerçekleştirilmiştir.

Sayısal analiz çalışmalarında, balistik testlerde kullanılan tungsten ağır alaşımı delici parça 20 mm boy ve 14 mm çapta silindir geometrili, 2 mm aralıklarla heksahedron bölümlenerek modellenmiştir. Heksahedron bölümlenmenin düşük enerjili durumlarda bile yüksek deformasyonu benzetilmeye olanak sağladığı ve doğru sonuçlar verdiği bilinmektedir [96]. Tungsten ağır alaşımı delici parça, *Math_Johnson_Cook (015) malzeme modeli ve Lagrange-Lagrange çözücüsü kullanılarak analiz edilecektir. Tungsten ağır alaşımı delici parça için kullanılan malzeme modeli parametre değerleri Tablo 6.1’de yer almaktadır.

Tablo 6.1. Tungsten ağır alaşımı parça Johnson Cook (JC) malzeme modeli parametre tablosu.

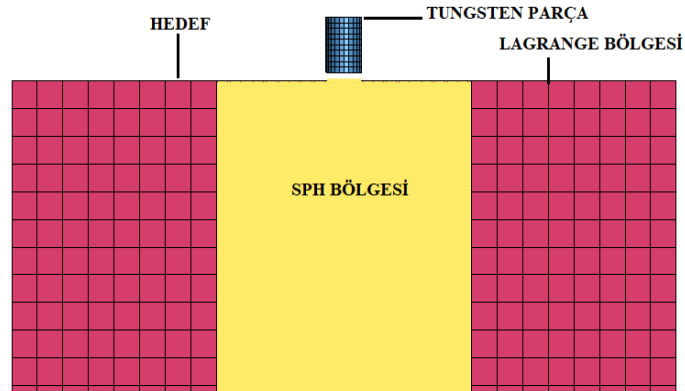
MID	RO	G	A	B	N	C	M
9	1,70E+04	1,60E+11	1,506E+09	1,77E+08	1,20E-01	1,60E-02	1,00E+00
TM	TR	EPSO	CP	SPALL	D2	D3	D4
1,72E+03	3,00E+02	1,00E+00	1,34E+02	2,00E+00	3,30E-01	-3,00E+00	4,20E-03
EFMIN							
1,00E-06							

Ls-Dyna model tablosunda 0 değerine sahip parametrelerin isimleri girdi olarak Tablo 6.1’de yer almamıştır. Beton içersinde yapısal boşluklar bulunmaktadır. Çarpma anında, hedefte oluşan basıncın ve boşlukların tamamen doldurulduğu kompakt halin oluşumunun modellenmesi için durum denklemi kullanılmıştır. Analizde, HJC malzeme modeli ile uyumlu çalıştığı bilinen *EOS_GRUNEISEN durum denklemi tercih edilmiştir. Durum denkleminin ait parametre değerleri Tablo 6.2’de yer almaktadır.

Tablo 6.2. Durum denklemi parametre tablosu EOS GRUNIESEN.

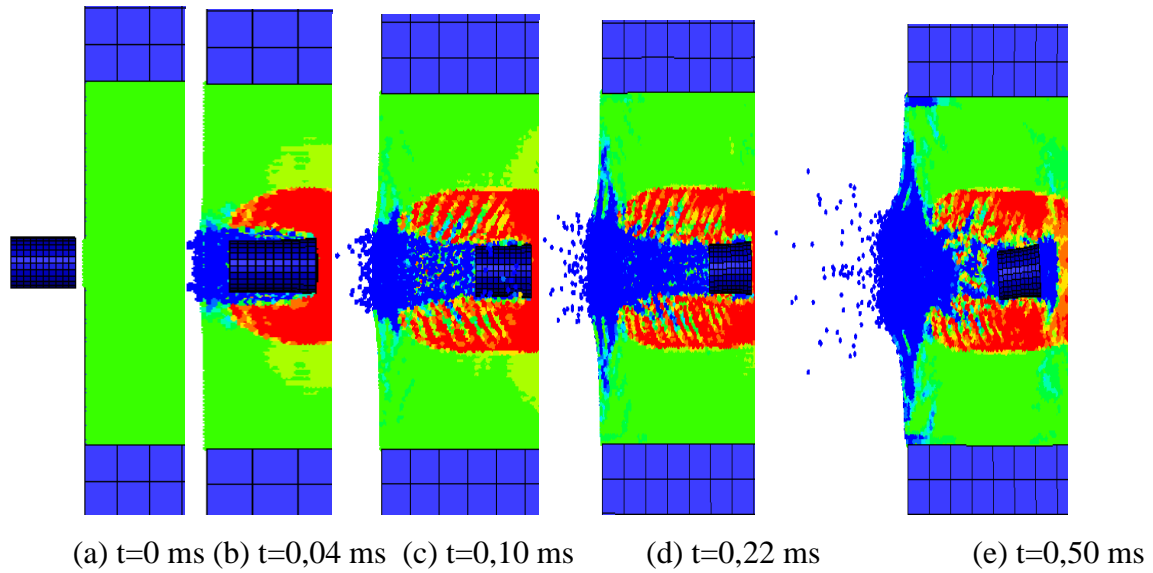
EOSID	C	S1	2	3	GAMAO	A	E0
9	1,70E+04	1,60E+11	1,506E+09	1,77E+08	1,20E-01	1,60E-02	1,00E+00
VO							
0.0							

Balistik testlerle aynı koşulların sağlanması açısından hedef yapısı 500x500x500 mm ebatlarında modellenmiştir. Delici parçanın boyu ve çapının ölçüleri uyarınca, çarpışma bölgesinin ölçülerine yönelik ön tahminler gerçekleştirilmiştir. Ön tahminler analiz süresinin kısaltılması ve etkinin doğru modellenmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, hedef yapısında modelleme iki bölge halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci bölgede, tungsten ağır alaşımı delici parçanın en yıkıcı etkiyi gösterdiği 100x100 mm'lik yüzey alanı ve 250 mm derinlikte SPH ağırsız yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, öncelikle 0,1x0,1x0,1 mm ebatlarında küp elemanlar oluşturulmuş, küpün her bir köşesini işaretleyen noktalar atılmış, SPH dönüşümü ile elemanlar yok edilmiş ve belirli bir yarı çapta birbirleriyle etkileşim halinde noktalar oluşturulmuştur. Hedef betonunda SPH bölgesi dışında kalan ve delici parçanın etkisini daha az göstereceği öngörülen alan ikinci bölge olarak tasarlanmıştır. Bu bölge 10x10x10 mm'lik küp elemanlara bölünerek Lagrange-Lagrange çözüm yöntemine uygun modellenmiştir. Modellemede, son olarak SPH ve Langrange kontakları gerçekleştirilerek sayısal analiz hazırlıkları tamamlanmıştır. Parça ve hedefin model görseli Şekil 6.3'de yer almaktadır.



Şekil 6.3. Modelin Görünüşü.

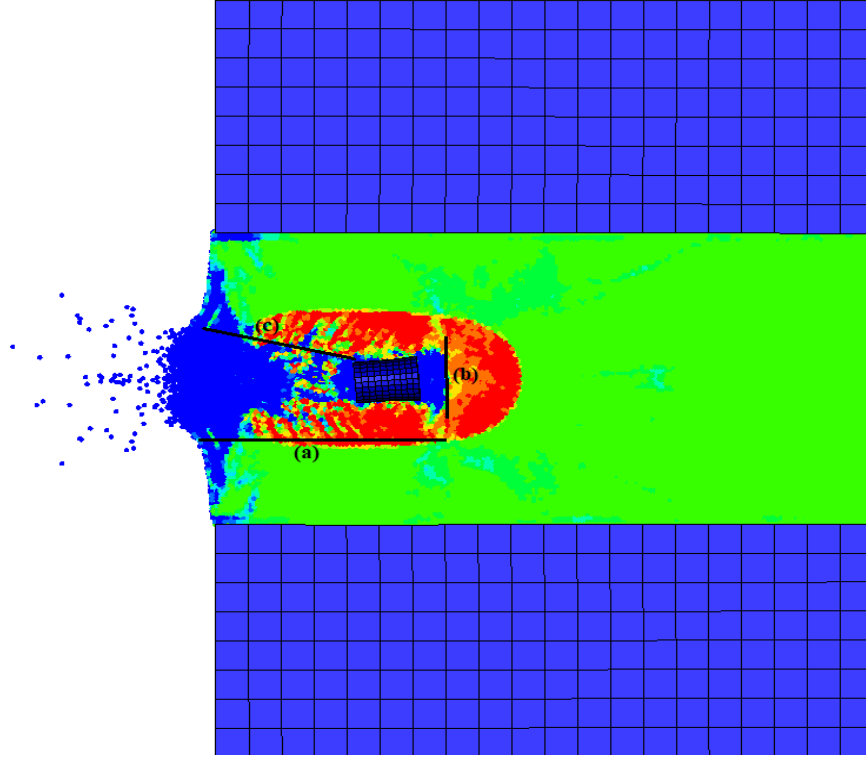
Hedef modelinde, SPH çözüm yöntemiyle tasarlanan birinci bölgede 2.560.451 eleman ve Lagrange-Lagrange çözüm yöntemiyle tasarlanan ikinci bölümde 123.000 eleman kullanılmıştır. Modelde hedef x, y yönlerinde rijit ve sabit olarak tasarlanmıştır. Delici parçanın hedefe çarpacağı yön z yönü olarak belirlenmiştir. Çalışmada modele entegre edilen parametrelerinin doğru davranışı benzetimlemesine öncelik verilmiştir. Bu nedenle balistik testlerde erişilen en düşük hız 790 m/s sabit hızda, çarpan parçanın malzeme modeli, çözücü, hedef ve parçada eleman bölüm sıklıklarının değişimlerini kapsayan 13 adet farklı deneme analizi koşturulmuştur. Deneme analizlerinin sonucu, 13. analizde balistik test sonuçlarına yakınsama sağlanmıştır. Bu analizin zamana bağlı olarak görünüm aşamaları Şekil 6.4'te yer almaktadır.



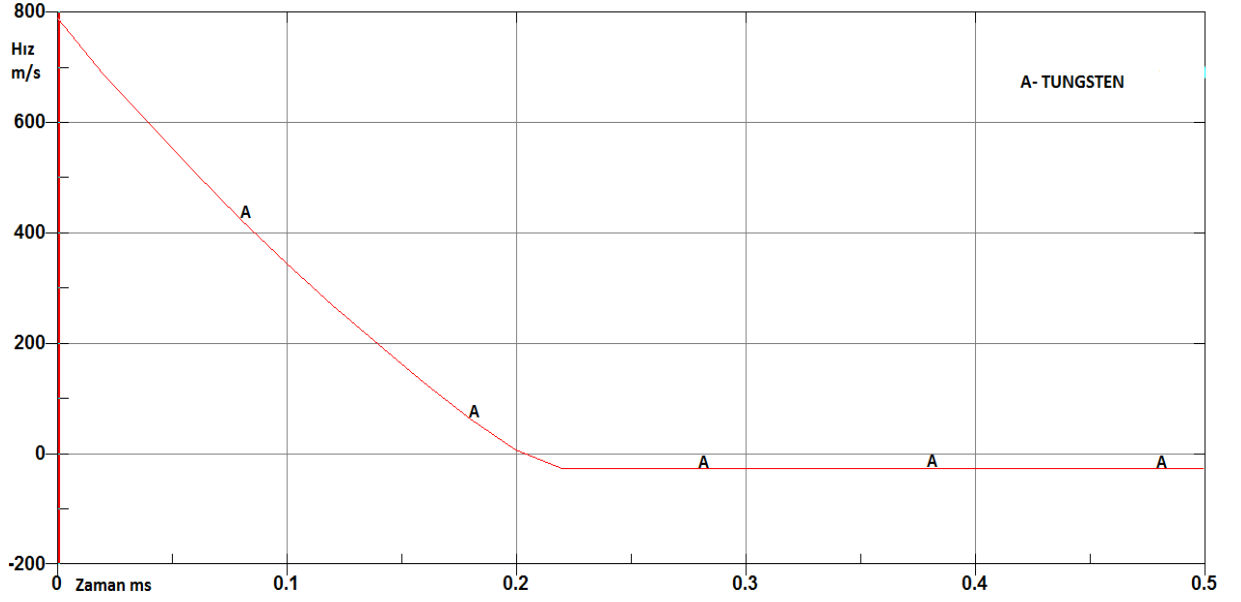
Şekil 6.4. 790 m/s hızda ve zamana bağlı tungsten parçanın hedefe çarpma prosesinin nümerik görseli.

Sayısal analiz, t=0 ms ile t=0,50 ms zaman aralığında koşturulmuştur. 0-0,04 ms aralığında penetrasyon başlamış ve parçada herhangi bir deformasyon oluşumu gözlenmemiştir. 0,04-0,10 ms zaman aralığında penetrasyon derinliği, yoğunluk değişiminde artış ve hedeften parça kopması gerçekleşmiştir. Aynı zaman aralığında, delici parçanın ön bölümünde mantarlaşıma oluşumunun başladığından söz edilebilir. 0,10-0,22 ms aralığında hedeften kopan parçalar ve kırılmalar hedef yüzeyinde genişlemiştir. 0,22. ms'de penetrasyon maksimum seviyeye erişmiştir. Hedef yüzeyindeki çatlaklar ve kırıklar çarpışma bölgesinin tümüne yayılım göstermiş haldedir. Sayısal analizin sonlandığı 0,50 ms'de delici parçanın düşük seviyelerde hedefle açığı yaptığı, bir miktar geri tepmeye uğradığı ve şekil

değiştirmesinin tamamlandığı gör÷lmektedir. Bu anda, delici parça tarafından aktarılan kinetik enerjinin, hedef tarafından tamamen sönümlendiği ve analiz sonlandığı ifade edilebilir. Bu analiz, penetrasyon ve krater derinliği, delik çapının ölçüm bölgesi ve sonuçlarına ilişkin görsel Şekil 6.5'te ve tungsten ağır alaşımı parçanın hız-zaman ilişkisi Şekil 6.6'da yer almaktadır.



Şekil 6.5. 790 m/s'de koşturulan analiz (a) Penetrasyon derinliği 68,10 mm,(b) Delik apı 27,20 mm,(c) Krater derinliği 73 mm görseli.

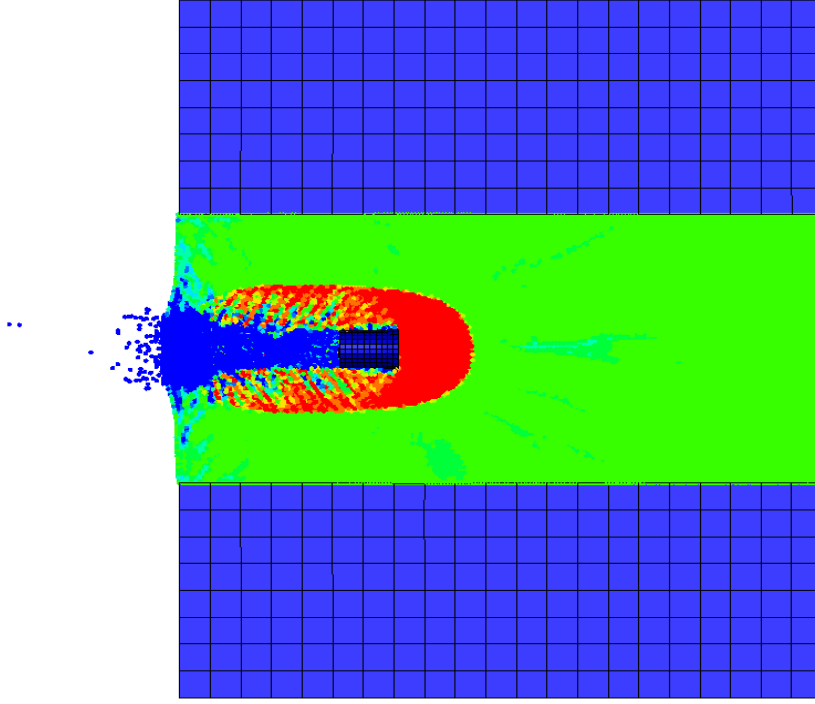


Şekil 6.6. Tungsten hız-zaman ilişkisi

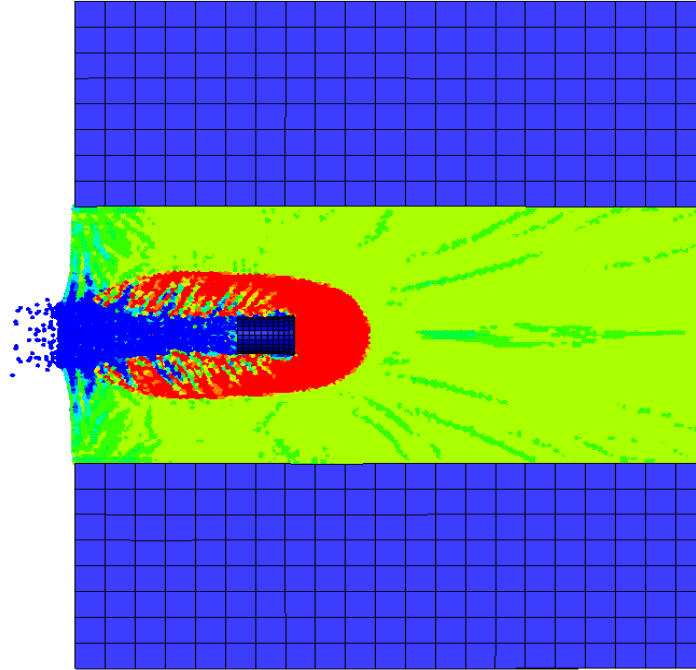
Balistik test çalışmasında farklı hızlara erişim sağlandığı bilinmektedir. Modele entegre edilen parametre değerlerinin test sonuçlarına yakınsaması sonucu, farklı hızlardaki davranışın ve sonuç aralığının denetlenmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Modelleme sabit, başlangıç koşulu hız verisinin 820 m/s olarak değiştirilmesiyle analiz 14, hız verisinin 850 m/s olarak değiştirilmesiyle analiz 15 ve son olarak balistik testlerde erişilen en yüksek hız olan 930 m/s hız ile analiz 16 koşturulmuştur. Analizlerin sonuç görselleri Şekil 6.7-9'de yer almaktadır. Hızların kademeli olarak artırılmasıyla koşturulan analizlerde, hedef ve delici parçanın davranışında yüksek dereceli değişim görülmemiştir. Genellikle hızın artırılmasıyla penetrasyon ve krater derinliğinin lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Hızın artırılmasının delik çapı ölçümlerinde belirgin değişime yol açmadığı ifade edilebilir. Sayısal analizlere ait penetrasyon derinliği, delik çapı ve krater derinliği ölçüm sonuçları Tablo 6.3'te yer almaktadır.

Tablo 6.3. Analiz sonuç tablosu

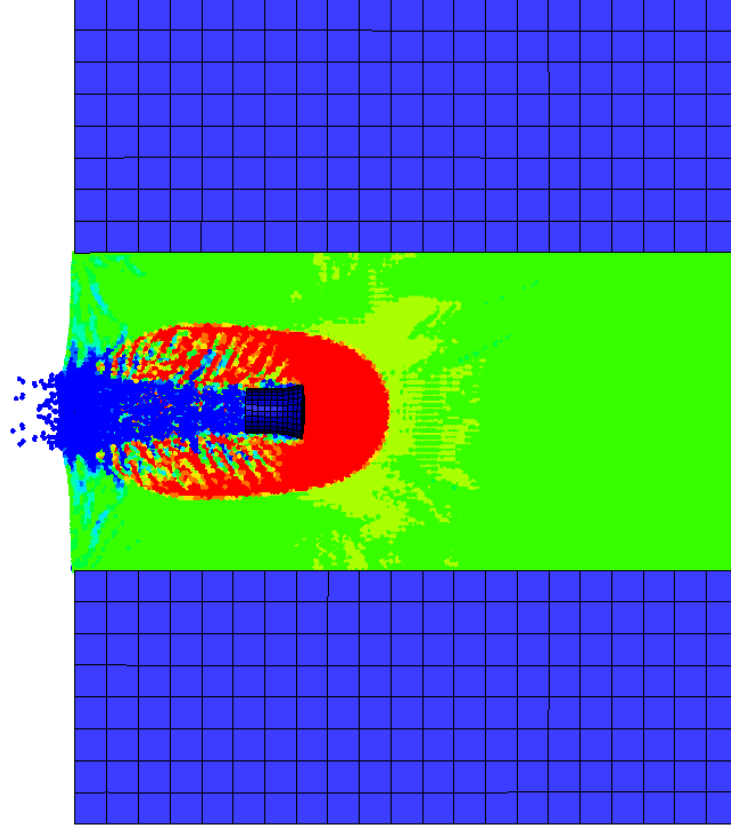
Analiz no	Hız(m/s)	Penetrasyon(mm)	Delik Çapı(mm)	Krater (mm) derinliği
13	790	68,10	23,01	73,00
14	820	71,65	24,50	75,51
15	850	72,50	25,08	75,58
16	930	72,80	26,80	75,70



Şekil 6.7. $t=0,22$ ms'de 820 m/s hızda koşturulan analiz sonuç görseli.



Şekil 6.8. 850 m/s hızda koşturulan analiz sonuç görseli.



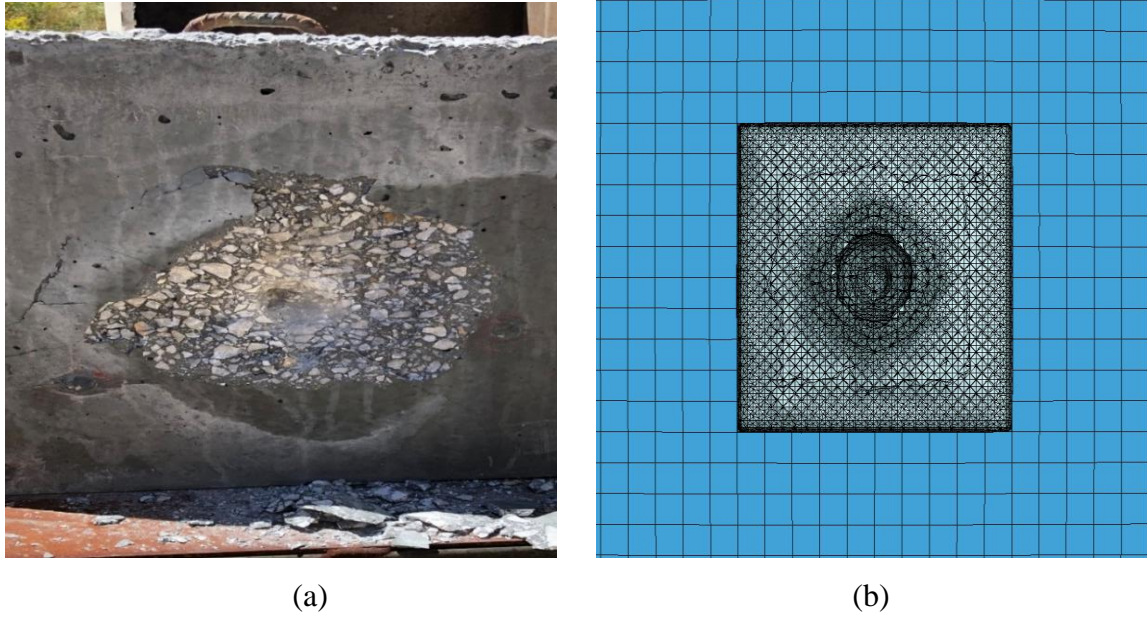
Şekil 6.9. 930 m/s hızda koşturulan analiz sonuç görseli.

6.4. Sayısal Analiz ve Balistik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Balistik testlerde, 795-934 m/s hız aralığında delici parçanın hedefe çarptırılması sonucunda, penetrasyon derinliği yaklaşık 56-73 mm, krater derinliği 57-70 mm ve yaklaşık delik çapı 20-28 mm aralığında ölçümlenmiştir. Sayısal çalışmada, 790-930 m/s hız aralığında delici parçanın hedefe çarptırılması için oluşturulan modellemeyle koşturulan analizler sonucunda, penetrasyon derinliği 68-73 mm, krater derinliği 73-75 mm ve delik çapı 24-27 mm aralığında ölçümlenmiştir.

Balistik test ve sayısal çalışmada, genellikle çarpan parçanın hızının artmasının penetrasyon ve krater derinliğini artırdığından söz edilebilir. Özellikle sayısal çalışmalarda bu durum daha belirgindir. Zira sayısal çalışmada tüm koşullar aynıdır ve sadece hız verilerinde değişim sağlanmıştır. Balistik çalışmalarda ise hedefin üretim kaynaklı yoğunluk değişimleri, delici parçanın çarpma açısı değişimleri ve düşük düzeyde de olsa delici parçaların ağırlık ve sertlik değerlerinin farklı olması, sonuçların benzer aralıkta fakat farklı sonuçlanmasına etki göstermiştir. Ayrıca balistik çalışmada çarpan delici parça hedeften sekerek ayrılmış ve delici parçada oluşan kinetik enerjinin tamamı hedefe aktarılmamış ve

parça üzerinde kalarak delicinin deforme olması için harcanmıştır. Sayısal çalışmada ise delici parça bütünüyle hedef içinde kalmış ve tüm kinetik enerjisini hedefe aktarmıştır. Hedef davranışının test ve sayısal görüntüleri birlikte Şekil 6.10.'da yer almaktadır.

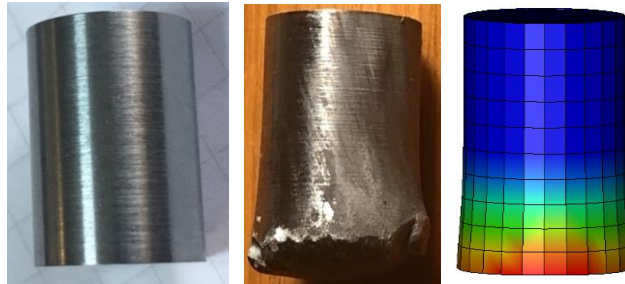


Şekil 6.10. (a) 4 nolu balistik test hasar görüntüsü, (b) 13 nolu sayısal analiz hasar görüntüsü.

Şekil 6.10.'daki balistik test görselinde, hedef yapısından çimentoların koparak oluşturduğu hasar yüzeyi, delik oluşumu ve krater yapısının olduğu görülmektedir. Sayısal çalışmada ise, SPH ile modellenen bölümlerde parça kopması, delik profili ve krater yapısı benzetimlenmesi sağlanmıştır. Lagrange-Lagrange çözücüsü ile bölümlenen bölgede, bölümlene aralığının geniş olması ve çarpma etkinlik alanının dışında kalması nedeniyle, balistik test görüntülerinde gözlemlenen yüzeysel çatlaklar benzetimlenememiştir. Lagrange-Lagrange çözücüsünde yüksek deformasyonlarda elemanın silinerek kaybolması ve ancak malzemenin hacminin sabit kalması zorunluluğu sebebiyle hasar bölgesi dışında kalan alanlarda oluşan yüzeysel çatlaklar ve kesme kırılmaları görselleştirilememiştir. Kırılmaların simüle edilebilmesi için eleman bölme sıklılığının artırılması gerekmektedir. Ancak elemanların sık bölünmesiyle oluşturulan deneme analizleri sonucu penetrasyon, krater derinliği ve delik çapı ölçüleriyle benzetim koşullarından uzaklaşmış ve probleme yakınsama sağlanamamıştır. İlâveten bu durum analizin süresi ve çözülebilirliği açısından da problem oluşturmuştur. Balistik test görüntülerinde genelde çimento yüzeyden sıyrılmış ve agregalarda kütleli kayıplar meydana gelmiştir. Üretimde kullanılan kaba agregalar, beton dayanımını artırarak penetrasyon derinliği ve hasar yüzey alanını azaltılması yönünde

önemli katkılar sunmaktadır. Sayısal analizlerde, agrega ebatlarına (ince, kaba vb.) yönelik gerçek durumu yansıtacak ölçüde agrega dağılımı modellenmesi sağlanamamaktadır. Bu nedenle, malzeme modeli denkleminde çarpma ile oluşan basınç EOS (durum denklemi) ile betonun kompakt yapıya ulaştığı değerlendirilerek çözümlene sağlanmıştır. Balistik test çalışmasında, birçok parçanın hedefle açı yapmayacak biçimde çarptığı test görüntüleri izlenerek doğrulanmıştır. Ancak delici parça çarpma sonrası hedef içinde ilerlerken açı etkisi altında kalmış ve geri tepme sonucu sekerek alanda farklı noktalara dağılım göstermiştir. Sayısal çalışmada, delici parça çarpma düzlemine açı yapmayarak hedefe penetre olmuş, bir miktar geri tepme yaparak hedef içinde kalmış ve tüm kinetik enerjisini betona aktarmıştır. Bu durum, balistik testlerde oluşan parça deformasyonu ve hedef hasarında farklı benzetimlemeye sebep olmuştur.

Balistik testlerde bir adet delici parça test sonrası atış alanda bulunabilmiştir. Delici parçanın ön yüzeyinde mantarlaşıma ile genişleme olduğu ve bir miktar kırılmaya maruz kalarak kesit kaybına uğradığı görülmektedir. Sayısal analizde ise, delici parçanın ön yüzeyinde mantarlaşıma ile genişleme oluşumu benzetimi sağlanmıştır. Ancak delici parçanın modellenmesinde, Lagrange-Lagrange çözümü ve eleman boyutlarının büyük olması nedeniyle kırıklar görselleştirilmemiştir. Parçanın hasar görüntüsü Şekil 6.11’de yer almaktadır.



Şekil 6.11.(a) Orijinal delici , (b) Delici hasar görüntüsü,(c) Sayısal analiz hasar görüntüsü.

ÇYDB için gerçekleştirilen yarı-statik, SHBÇ dinamik testlerinin sonuçlarıyla elde edilen parametre değerleri kullanılarak oluşturulan ÇYDB HJC modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen sayısal analizlerde penetrasyon derinliği 68-73 mm, krater derinliği 73-75 mm, delik çapı 23-26 mm aralığında ölçümlenmişken, balistik testlerde penetrasyon derinliği 56-73 mm, krater derinliği 57-70 mm ve delik çapı 20-28 mm olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak sayısal analizler, balistik test çalışmaları sonuçlarına hedef, çarpan parça hasar

görüntüsü, penetrasyon, krater derinliği ve delik çapı ölçüm değerleri kapsamında benzer aralıkta ve yakınsayan sonuçlar vermiştir.

7. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMA ÖNERİLERİ

7.1. Sonuç Değerlendirmeleri

7.1.1. Çok Yüksek Dayanımlı Beton Gelişimi

Tez çalışması kapsamında 135 MPa dayanıma sahip çok yüksek dayanımlı beton tasarlanarak üretilmiştir. Günümüzde bu tip dayanımlara erişebilmek için özel malzeme ve sistemler kullanılmasına rağmen, ÇYDB günümüz koşullarında yerel malzeme tedariki ve çok özel laboratuvar ortam koşullarına ihtiyaç duymaksızın üretilebilmiştir.

ÇYDB'nin tasarım ve üretim aşamalarına ilişkin genel değerlendirmeler aşağıdaki gibidir;

- Betonda yüksek dayanımlara erişebilmek için dayanımı yüksek bazalt agregaların kullanımının önemli katkılar sağlayacağı bilinmektedir [16]. Dayanım kapasitesi bazalt agregaya oranla daha düşük olan kireç taşı agregaya kullanılarak ÇYDB üretilebilmiştir.
- İlk deneme üretimlerinde karışım hesabında değerlendirmeye alınmayan, kaba agregaların (19-25 mm) karışım hesaplarına ilave edilmesi sonucu dayanım artışı sağladığı ve nihai hedeflenen dayanıma ulaşmaya katkı sağladığı gözlemlenmiştir.
- ÇYDB üretiminde su/çimento oranının 0,20 ve daha düşük değerlere sahip olması gerekliliği değerlendirilmektedir [14]. Üretimde su/çimento oranı 0,13 seviyesinde tutularak literatür kaynaklarıyla örtüşen sonuçlar ile üretim sağlanmıştır.
- ÇYDB'de üretim sonrası gerçekleşen reaksiyonlarla cüruf, zamanla yapıdaki boşlukları doldurmuş ve boşlukları minimize etmiştir. Cüruf kullanımının 1.günden itibaren 56. güne kadar dayanımın artmasına olanak sağladığı değerlendirilmektedir.
- Üretimde fazla miktarda kullanılan su dayanımın azalmasına sebep olmaktadır. Su ihtiyacını minimize eden süperakışkanlaştırıcının kullanımı, ÇYDB'nin işlenebilmesine ve nihai hedeflenen dayanıma ulaşmaya katkı sağlamıştır.
- ÇYDB'nin üretim safhasında işlenebilirliğinin düşük ve hızlı sertleşme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple, üretimde titreşim tezgahı kullanımı ve tokmaktama işlemlerinin sağlanmasının segregasyon oluşumunun önlenmesi ve dayanımın olumsuz yönde etkilenmesinin önüne geçtiği değerlendirilmektedir.

7.1.2. Çok Yüksek Dayanımlı Betonun Yüksek Gerinim Hızındaki Davranışı

Bu çalışmada, geliştirilen çok yüksek dayanımlı betondan 21 adet dinamik test numunesi SHBÇ test düzeneği altında dinamik basınç testine tabi tutulmuştur. SHBÇ sonuçlarına ilişkin genel değerlendirmeler aşağıdaki gibidir;

- ÇYDB dinamik test numuneleri yarı-statik testler için kullanılan silindirik numuneden su jeti yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Kesim bölgesindeki çimento ve agrega yoğunluğu numunelerin dayanım sonuçları üzerinde etkili olmuştur. Bu sebeple dinamik bası dayanım sonuçları benzer aralıkta ancak farklı 143-253 MPa arasında değerler almıştır.
- ÇYDB yarı-statik testlerde $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızına erişmiş ve gerilme değeri 135 MPa ölçümlenmişken, SHBÇ test sonuçlarına göre ÇYDB'nin dinamik dayanım değerleri, yarı-statik dayanım değerlerine göre 1,06-1,87 kat daha fazla ve gerinim hızı aralığı $353-1288 \text{ s}^{-1}$ olarak ölçümlenmiştir.
- Literatürde numune boyunu kısaltarak, numuneleri 15-20 mm aralığında üreten ve dinamik davranış belirleme çalışmaları yürüten araştırmacılar, betondaki gerinim hızlarını $250-1700 \text{ s}^{-1}$ aralığında ölçümlemişlerdir [26,30]. Çalışmada, numune boyu benzer olarak, ÇYDB'nin gerinim hızı değerleri $353-1288 \text{ s}^{-1}$ olarak ölçümlenmiştir. Numune boyunun kısaltılmasının gerinim hızının artırılması yönünde olumlu katkılar sağladığı tespit edilmiştir.
- Genel olarak gerinim hızının maksimum seviye eriştiği aşamadan sonra gerilme değerinin düşüş eğilimine girdiği görülmektedir.

7.1.3. Balistik Testler

Balistik testler, tungsten ağır alaşımı delici parçanın ÇYDB'den büyük ölçekte üretilen hedef betonuna barut silahı kullanılarak yüksek hızlarda balistik atışlar sonucu gerçekleştirilmiştir. Balistik test sonuçlarına ilişkin genel değerlendirmeler aşağıdaki gibidir;

- Barut silahı kullanılarak, tungsten ağır alaşımı delici parça 795-934 m/s hız aralığında 135 MPa basınç dayanımına sahip ÇYDB hedef yapısına çaptırılmıştır.
- Testlerin sonucunda penetrasyon derinliği 56-73, krater derinliği 57-70 ve delik çapı 20-28 mm aralığında ölçümlenmiştir. Hasar yüzeyinin ise 170x250 mm aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonuçlarda çarpan parçanın hızı ve mekanik özellikleri ile hedef yapısının dayanım kapasitesi etkili olmuştur.

- Literatürde, çelik veya alaşımı genellikle silindir formda küt veya sivri uçlu parçalar 510-1500 m/s hızlarda 25-235 MPa aralığında basınç dayanımına sahip beton hedeflere çarptırılmış, penetrasyon ve krater derinlikleri ölçümlenmiştir [50-64]. Bu tez çalışmasında, balistik testlerde çelik veya alaşımı parçalara göre akma dayanımı, kopma uzama oranı ve çekme dayanımı kapasitesi daha yüksek olan, tungsten ağır alaşımı delici parça kullanılmış, 790-934 m/s hız aralığına erişilmiş ve ÇYDB'nin penetrasyon ve krater derinliği diğer betonlara oranla daha düşük seviyelerde ölçümlenmiştir.
- Testlerde barut miktarının artırılmasının, düşük kütleli parçanın hızlandırılmasına olumlu katkılar sunduğu ve hızın artmasıyla birlikte hedefte ölçülen penetrasyon ve krater derinliğinin artmasına olanak sağladığı değerlendirilmektedir.
- Tungsten ağır alaşımı delici parçanın küt burunlu formda ve boy ile çapının yakın değerlere sahip olması nedeniyle penetrasyon ve krater derinliğinin benzer aralıkta ölçüldüğü değerlendirilmektedir.
- Hedef yapısında çekme kuvvetini alabilecek düzeyde ÇYDB'yi güçlendirecek donatı veya fiber katkıların kullanılmaması sebebiyle penetrasyon ve krater ölçüm sonuçlarına oranla hasar yüzeyi tahribatı literatür verilerine oranla yüksek ölçümlenmiştir.

7.1.4. Malzeme Modeli ve Analizler

Yarı-statik ve SHBÇ test verilerinin değerlendirmeye alınması sonucunda malzeme modelinin parametrelerinin tespiti ile balistik testlerin sayısal modellemesi ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarına ilişkin genel değerlendirmeler aşağıdaki gibidir;

- Yarı-statik testler sonucunda betonun fiziksel parametreleri ve SHBÇ test verilerinin çoklu değişkenli regresyon analizi için Matlab'da geliştirilen kod ile çözümü sonucu HJC malzeme modeline ait parametreler elde edilmiştir.
- HJC ve diğer malzeme modellerinin parametre tespiti için yapılan literatür çalışmalarında [72-76] elde edilen parametre değerleriyle bu çalışmada elde edilen değerler benzer aralıkta fakat farklı sonuçlanmıştır.
- Sayısal modellemede beton gibi gevrek malzemelerin testle birebir davranışını sağlamak ve parçacıklanma etkisinin görselleştirilebilmesi için çarpma bölgesinde

SPH ağısız yöntem ve geri kalan kısımda ise Lagrange-Lagrange çözüm yöntemi kullanılmıştır.

- Sayısal analizin koşturulması sonucu penetrasyon, krater derinliği ve delik çapı değerleri açısından balistik testlerle benzer sonuçlara erişilerek doğrulama sağlanmıştır.

7.2. Gelecek Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, çok yüksek dayanımlı beton içeriğinde fiber katkıları kullanılmamıştır. ÇYDB üretiminde kontrollü şekilde fiber katkıları ilave edilebilir. Betonun yalın hali ve fiberlerin yarı-statik testlerinin çeşitliliği artırılarak (basma, çekme ve eğilme vb.) mekanik özellikleri belirlenebilir. Dinamik özelliklerin belirlenmesi için ÇYDB yalın ve kompozit halde SHBÇ sisteminde test edilerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilir. Bu çalışmaya benzer şekilde parametrelerin tespiti sağlanarak, SHBÇ sistemi nümerik olarak modellenilebilir ve fiber katkının betonun davranışına olan etkisi incelenebilir. Gelecek için önerilen çalışmaların literatür kaynaklarına olumlu veriler sağlayabileceği ve ÇYDB'nin geliştirilmesine katkıları sunacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Lavan, O. , De Stefano, M. , “Seismic behaviour and design of irregular and complex civil structures” Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Springer, 2013, [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9789400753761>
- [2] Mario Lucio Puppia, Linda Giresinia, Fabio Doveria and Mauro Sassub, “ Structural irregularity: The analysis of two reinforced concrete (r.c.) buildings”, Engineering Solid Mechanics, vol.7, no.1, pp. 1-23, 2019.
- [3] Yapı Sanatları, “Beton nedir”, http://www.yapisanatlari.com/betonnedir_2_10.htm. (Erişilebilirlik:1.Ağustos.2020)
- [4] Lafargebeton,“Betontanımı”,<http://www.lafarge-beton.com.tr>, (Erişilebilirlik:1.Ağustos. 2020)
- [5] Özalp, F. , “Çok yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2006.
- [6] Aitcin, P.C. , “Cement of Yesterday And Today Concrete of Tomorrow”, Cement and Concrete Research, Vol.30, 1349-1359, 2000.
- [7] Ergin ARIOĞLU, Gözde KURT, “Yapı Merkezinde Çok Yüksek Dayanımlı Betonun Gelişimi 1989-2007”, Yapı Merkezi, Çamlıca, İstanbul, 2007.
- [8] C. Wu, J. Li and Y. Su, “ Development Of High Performance Concrete Against Blast From Material to Structures”, Woodhead Publishing, 2018.
- [9] GÜNAY, AR., “Farklı beton onarım malzemelerinin uygulanması üzerine karşılaştırmalı bir inceleme”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2011.

- [10] Voo Y.L. ,Poon, W.K. ve Foster, S.J. ,“Shear strength of steel fiber reinforced highperformance concrete beams without stirrups”, Journal of Structural Engineering, vol 136, pp 1393-1400, 2010.
- [11] Özyurt, N. , “Çok yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2000.
- [12] Taşdemir, M. A. , Bayramov, F. , “Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı”,İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi, Cilt.1, Sayı.2, pp.125-144, 2002.
- [13] Ferruh KOCATAŞKIN, “Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi”, Raportör Görüş Özeti Konu-III, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1989.
- [14] Mansur SÜMER, Barış SÖYLER, “Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Çimento ve Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği”, SAU Fen Bilimleri Enstitü Dergisi 6.Cilt, 3.Sayı, pp. 15-20, 2002.
- [15] Ergin ARIOĞLU, Orhan MANZAK, Adnan DONDURMACI, Özgür SÜMER, “Yapı Merkezinde Çok Yüksek Dayanımlı Betonların (B170) Mühendislik Büyüklüklerinin Değerlendirilmesi”, Yapı Merkezi, Çamlıca, İstanbul, 1994.
- [16] Hakan Nuri ATAHAN, “Yüksek Dayanımlı ve Yüksek Performanslı Betonlar”, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2010.
- [17] Sinan T. , Erdoğan, Turhan Y. Erdoğan, “Puzolanik Mineral Katkılar Ve Tarihi Geçmişleri”, 2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, pp 264-274, 2013.
- [18] Arda Çetin,“Şekil Değişimi Hızının Akma Üzerindeki Etkisi”, <https://muhendishane.org/kutuphane/sekil-degisimi-hizinin-akma-uzerindeki-etkisi>, (Erişilebilirlik:1.Ağustos. 2020).

- [19] P. H. Bischoff, S. H. Perry, “Compressive behaviour of concrete at high strain rates”, *Materials and Structures*, vol 24, no.1, pp. 425-450, 1991.
- [20] B. Bresler, V.V. Bertero ,“ Influence of high strain rate and cyclic loading of unconfined and confined concrete in compression ” *Proceedings of Second Canadian Conference on Earthquake Engineering*, vol.1,no.1, pp. 1–13, 1975.
- [21] J. Takeda, H. Tachikawa, “ The mechanical properties of several kinds of concrete at compressive, tensile, and flexural tests in high rates of loading”, *Trans Architect Inst Jpn* vol 77, no.1, pp. 1–6, 1962.
- [22] B.P. Hughes, H. Gregory,“Concrete subjected to high rates of loading in compression.” *Mag Concrete Res.* vol 24 , no.78, pp. 25–36, 1972.
- [23] D. Watstein, “Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete”, *ACI J.* , vol. 49, no:8, pp. 44-72,1953.
- [24] B. P. Hughes, A.J. Watson, “Compressive strength and ultimate strain of concrete under impact loading”, *Mag Concrete Res.* vol 30, no.105, pp. 89-99,1978.
- [25] T. Ngo, P. Mendis, A.Whittaker, “A rate dependent stress-strain relationship model for Normal, High and Ultra High Strength Concrete”, *International Journal of Protective Structures*, volume 4, no.3, pp 451-466, 2013.
- [26] D.L. Grote, S.W. Park, M. Zhou ,” Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I.experimental characterization”, *International Journal of Impact Engineering* vol 25, no.1, pp 869–886,2001.
- [27] M. Yousuf, B.UY, R.Liew, Z. Tao and W.Shasha, “Dynamic Properties of Concrete Strength Using Split Hopkinson’s Pressure Bar Test”, *School of Engineering, University of Western Sydney (UWS), NSW, Australia*, 2015.

- [28] Y.B. Guo, G.F. Gaoa, L. Jingb, V.P.W. Shim, “Response of high strength concrete to dynamic compressive loading”, National University of Singapore Engineering vol.9, no. 1, pp. 570-575, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.015>.
- [29] Zhang, M., Wu, H. J. , Li, Q. M., Huang, F. L. “Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on Split Hopkinson Basınç Çubuğu tests. Part I: Experiments”, International journal of impact engineering, vol. 36, no.12, pp. 1327-1334, 2009.
- [30] Riisgaard, B. , Ngo, T. , Mendis, P. , Georgakis, C. T. , Stang, H. , “ Dynamic increase factors for high performance concrete in compression using Split Hopkinson Basınç Çubuğu ” In 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2007.
- [31] Lu, Y., Chen, X., Teng, X., Zhang, S., “ Dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete based on Split Hopkinson Basınç Çubuğu tests”, Latin American Journal of Solids and Structures, vol. 11, no.1, pp. 131-141, 2014.
- [32] Y. Hao, H. Hao, “ Mechanical properties and behaviour of concrete reinforced with spiral shaped steel fibres under dynamic splitting tension”, MC Research, vol.68, no.21, pp. 110-1121, 2016, <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.15.00372>.
- [33] Y. Hao, H. Hao, “ Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in Split Hopkinson Pressure Bar Tests”, Construction and Building Materials, vol.48,no.1,pp. 521-532, 2013.
- [34] A. Saadun, A.A. Mutalib, R. Hamid, and M. H. Mussa, “Behaviour of polypropylene fiber reinforced concrete under dynamic impact load”, Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 11, No. 5, pp. 684 – 693,2016.
- [35] Lai, J. and Sun, W., “Dynamic damage and stress-strain relations of ultra-high performance cementitious composites subjected to repeated impact.” SCT Sciences, vol. 53, no. 6, pp.1520-1525, 2010, <http://doi.org/10.1007/s11431-010-3133-2>.

- [36] Lai, J. , Sun, W. , Xu, S. , Yang, C. , “ Dynamic properties of reactive powder concrete subjected to repeated impacts.” *ACI Materials Journal*, vol.110, no.1, pp 463-472, 2013.
- [37] Y. Petrov, N. Selyutina, “Scale and size effects in dynamic fracture of concretes and rocks”, *EPJ Web of Conferences*, vol.94, no.04, pp. 1-5, 2015, <http://doi.org/10.1051/epjconf/20159404005>
- [38] Q.M. Li., H.Meng, “About the dynamic strength enhancement of concrete like materials in a Split Hopkinson Basınç Çubuğu test”, *International Journal of Solids and Structures* vol. 40, no.1, pp.343–360, 2003.
- [39] Y. F. Hao, X. H. Zhang, H. Hao, “Numerical analysis of concrete material properties at high strain rate under direct tension”, *Procedia Engineering*, vol. 14, no.1, pp. 336–343, 2011.
- [40] P. Forquin, “Brittle materials at high-loading rates an open area of research”, *Phil. TR. Soc. Vol.375,no.1*, pp.1-12, 2016, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0436>.
- [41] Shaojun Cao, Xiaomeng Hou, Qin Rong, “ Dynamic compressive properties of reactive powder concrete at high temperature: A review”, *Cement and Concrete Composites*, vol.110, no.1, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103568>.
- [42] B. Hopkinson,“A method of measuring the pressure in the deformation of high explosives or by the impact of bullets”, *Phil. TR. Soc. A-213*, 43752, 1914.
- [43] H. Kolsky, “An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of strain”, *Proc. Roy. Phys. Soc.*, vol.62, no.1, pp. 676–700, 1949.
- [44] Ross, C. A., Tedesco, J. W, “Split-Hopkinson pressure bar tests on concrete and mortar in tension and compression”, *Materials Journal*, vol.86, no.5, pp. 475-481, 1989.

- [45] Nihal Yumak, Yeliz Pekbey, Kubilay Aslantaş, "Zırh tasarımında kullanılan kompozit malzemelerin deformasyon karakteristiğinin araştırılması" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, cilt:10, no:4, sayfa. 1-21, 2013.
- [46] Petr Máca, Radoslav Sovják, Petr Konvalinka, "Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact", International Journal of Impact Engineering vol. 63, no.1, 158-163, 2014.
- [47] Hammond, R. , "Shock and ballistic properties of bainitic steels and tungsten alloys", Ph.D.dissertation, Cambridge, 2004, [Online].Available:<https://www.chu.cam.ac.uk/>.
- [48] G.G. Corbett, S.R. Reid, W. Johnson, " Impact loading of plates and shells by freeflying projectiles: A review", International Journal of Impact Engineering, vol. 18, no. 2, pp. 141-230, 1996.
- [49] Hakan HAFIZOĞLU, "Tungsten ağır alaşımlarının yüksek gerinme hızlarında deformasyonunun deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılması", doktora tezi, TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, 2019.
- [50] M.H. Zhang, V.P.W. Shimb, G. Lua, C.W. Chewa, "Resistance of high strength concrete to projectile impact", International Journal of Impact Engineering, vol.31, no.1, pp 825–841, 2005.
- [51] Fan Wan, Zhigang Jiang, Qinghua Tan, Yangyueye Cao, " Response of steel tubeconfined concrete targets to projectile impact", International Journal of Impact Engineering, vol. 94, no.1, pp 50-59, 2016.
- [52] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, " Energy absorption capacity of a sustainable ultra high performance fibre reinforced concrete in quasi-static mode and under high velocity projectile impact", Cement and Concrete Composites, vol.68, no.1, pp.109-122, 2016.

- [53] A.Dawson, S. Bless, S. Levinson, B. Pedersen, S. Satapathy, “Hypervelocity penetration of concrete” *International Journal of Impact Engineering*, vol.35, no.1, pp. 1484–1489, 2008.
- [54] M. Beppu K. Miwa, M. Itohb, M. Katayama, T. Ohno, “ Damage evaluation of concrete plates by high velocity impact”, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, no.1, 1419–1426, 2008.
- [55] H. Wu, Q. Fang, X.W. Chen, Z.M. Gong, J.Z. Liu, “ Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510–1320 m/s”, *Construction and Building Materials*, vol.74, no.1, 188–200, 2015.
- [56] Jason T. Gomez, Arun Shukla, “Multiple impact penetration of semi-infinite concrete”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.25, no.1, pp 965–979, 2001.
- [57] Joosef Leppanen,” *Concrete Structures Subjected to Fragment Impacts*”, doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2004.
- [58] ZhongCheng Mu, Wei Zhang, “An investigation on mass loss of ogival projectiles penetrating concrete targets”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.38, no.1, pp. 770-778, 2011.
- [59] Petr Máca, Radoslav Sovják, Petr Konvalinka,” *Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact*”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.63,no.1, pp. 158-163, 2014.
- [60] L. Guo a, Y. Hea, X.F. Zhang, C.X. Pang, L. Qiao, Z.W. Guan, “Study mass loss at microscopic scale for a projectile penetration into concrete”,*International Journal of Impact Engineering*, vol.72,no.1, 17-25, 2014.
- [61] H. Wu, Q. Fang, Y. Peng, Z.M. Gong, X.Z. Kong, “Hard projectile perforation on the monolithic and segmented RC panels with a rear steel liner”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.76, no.1, pp.232-250, 2015.

- [62] H. Wu, Q. Fang, J. Gong, J.Z. Liu, J.H. Zhang , Z.M. Gong, “ Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC”,*International Journal of Impact Engineering*, vol.84, no.1, pp. 38-53, 2015.
- [63] Chuang Liu, Xianfeng Zhang , Haihua Chen, Jipeng Wang, Haiyang Wei, Wei Xiong, “Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.138, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103482>.
- [64] Jian Liua, Chengqing Wua, Yu Sua, Jun Lia, Ruizhe Shaob, Gang Chenc, Zhongxian Liub,“Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts” *Engineering Structures*, vol.173, no.1, pp. 166–179, 2018.
- [65] “Tungsten heavy alloys”, Kennametal Densalloy, Engineering Guide, 2014.
- [66] Lin Huang “In Situ oxide dispersion strengthened tungsten alloys with high compressive strength high strain to failure” *Acta Materialia*, vol.122, no.1, pp.19, 2017.
- [67] Holmquist TJ, Johnson GR, Cook WH, “A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures”, 14 th international symposium on ballistic, vol.1, no.1, pp. 591–600, 1993.
- [68] Malvar LJ, Crawford JE, Wesevich JW, “A plasticity concrete material model for DYNA3D”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.19, no.1, pp. 847–873, 1997.
- [69] *Building Code Requirements of Structural Concrete, ACI 318-95, ACI Manual of Concrete Practice Part 3*, Detroit, Michigan, 1996.

- [70] Hüseyin Yiğiter, “Betonda Şekil Değişimleri”, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2020, <https://docplayer.biz.tr/115261261-Ins2024-yapi-malzemesi-ii-beton-basinc-dayanimi.html>.
- [71] Halit Yazıcı, “ Sertleşmiş Betonun Diğer Özellikleri”, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2020, <https://docplayer.biz.tr/39344207-Ozel-betonlar-doc-dr-halit-yazici-ins2024-yapi-malzemesi-ii.html>.
- [72] M. Alper Çankaya, “ Modeling Of Concrete Under High Strain Rate Conditions Using Nonlinear Finite Element Method”, Ph.D dissertation, The Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, 2017.
- [73] Çetin Erkam Uysal, “The Effect Of Strain Rate On The Dynamic Mechanical Behaviour Of Concrete”, M.S. thesis, The Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, 2018.
- [74] Y.S. Tai, “Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 51,no.1, pp. 117–128, 2009.
- [75] Gen-Mao Ren, Hao Wu, Qin Fang and Xiang-Zhen Kong, “Parameters of Holmquist–Johnson–Cook model for highstrength concrete like materials under projectile impact”, International Journal of Protective Structures, vol.1, no.1, pp. 1-16, 2017.
- [76] Christopher S. Meyer, “Development of Geomaterial Parameters for Numerical Simulations Using the Holmquist Johnson Cook Constitutive Model for Concrete”, Army Research Laboratory, ARL-TR-5556, 2011.
- [77] Zienkiewicz, Olek C., Taylor, Robert L.Zhu, J. Z., “The finite element method: Its basis and Fundamentals”, Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0-08-095135-5., 2013.
- [78] Jin, Jian Ming, “The Finite element method in electromagnetics”, Wiley-IEEE Press. ISBN 978-1-118-57136-1., 2014.

- [79] <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>, (Erişilebilirlik:1.Ağustos.2020)
- [80] Jiri Kala, Martin Husek, “Useful material models of concrete when high speed penetrating fragments are involved”, *Mechanics, Energy, Environment*, vol.1,no.1, pp.191-193, 2013.
- [81] R.A. Gingold, J.J. Monaghan, “ Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol.181, no.33, pp. 75–89. , 1977, <https://doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>.
- [82] L.B. Lucy, “A numerical approach to the testing of the fission hypothesis”, *Astron. J.* vol. 82, no.10, pp. 13-24, 1977, <https://doi.org/10.1086/112164>.
- [83] <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-sphanalysis.htm>, (Online: 1.August 2020).
- [84] Chahmi Oucif, Luthfi Muhammad Mauludin, “Numerical modeling of high velocity impact applied to reinforced concrete panel”, *Elsevier Underground Space* vol. 4, no.1, pp. 1–9, 2019.
- [85] Fenglei Huang, Haijun Wu, Qiankun Jin, Qingming Zhang, “A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets” *International Journal of Impact Engineering*, vol.32, no.1, pp. 173–187, 2005.
- [86] Chahmi Oucif, J.S. Kalyana Rama, K. Shankar Ram, Farid Abed, “Damage modeling of ballistic penetration and impact behavior of concrete panel under low and high velocities”, *Defence Technology*, March, 2020 [Online] Available:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.03.013>
- [87] Gordon Johnson, Timothy Holmquist, Charles Gerlach, “Strain-rate effects associated with the HJC concrete model”, *EPJ Web of Conferences*, Vol. 183, no.01008, pp.1-6 , 2018.

- [88] Jun Feng, Weiwei Sun, Zhilin Liua, Chong Cui, Xiaoming Wang, “An armour-piercing projectile penetration in a double-layered target of ultra-high-performance fiber reinforced concrete and armour steel: Experimental and numerical analyses”, *Materials and Design*, vol.102, no.1, pp. 131–141, 2016.
- [89] L.M. Bresciani, A. Manes, T.A. Romano, P. Iavarone, M. Giglio, “Numerical modelling to reproduce fragmentation of a tungsten heavy alloy projectile impacting a ceramic tile: Adaptive solid mesh to the SPH technique and the cohesive law”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.87, no.1, pp. 3-13, 2016.
- [90] M. Mabssout, M.I. Herreros, H. Idder, “Predicting dynamic fracture in viscoplastic materials using Taylor-SPH”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.87, no.1, pp. 95-107, 2016.
- [91] H. Idder, M. Mabssout, M. I. Herreros, “The Taylor-SPH Meshfree Method: Basis and Validation”, *Applied and Computational Mathematics*, vol.4, no.4, pp. 286-295, 2015.
- [92] Dong Luo, “Dynamic Constitutive Model Analysis of High Parameter Steel Fiber Reinforced Concrete”, vol.11,no.3,pp. 377-351, 2019.
- [93] Barış İrhan, “High velocity impact and fragmentation of concrete: Numerical simulation”, Doctor of Philosophy, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2014.
- [94] Guillermo A. Mata, “Evaluation of Concrete Constitutive Models for Impact Simulations”, M.S. thesis, Mechanical Engineering, University of New Mexico, 2015.
- [95] Azize Ceren Satoğlu, “Analysis Of Mechanical Behavior Of High Performance Cement Based Composite Slabs Under Impact Loading”, M.S. thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Middle East Technical University, 2009.
- [96] Sjaardama, G. ,Benzley, S. , Perry, E. , Merkley, K. , Clark, B. , “A Comparison of

All Hexagonal and All Tetrahedral Finite Element Meshes for Elastic and Elastoplastic Analysis.” 4th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, vol.1, no.1, pp. 179-191, 1995.