

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇARPMA ETKİSİNDEKİ ULTRA YÜKSEK  
PERFORMANSLI LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN  
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gamze DEMİRTAŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : YAPI**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR**

**Haziran 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇARPMA ETKİSİNDEKİ ULTRA YÜKSEK  
PERFORMANSLI LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN  
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

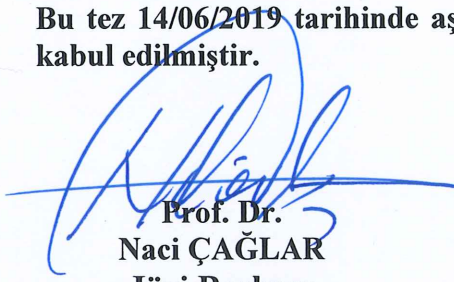
YÜKSEK LİSANS TEZİ

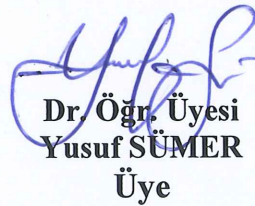
Gamze DEMİRTAŞ

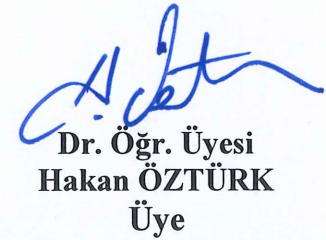
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 14/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr.  
Naci ÇAĞLAR  
Jüri Başkanı

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Yusuf SÜMER  
Üye

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Hakan ÖZTÜRK  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Gamze DEMİRTAŞ

14/06/2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde zamanını hiç esirgmeden bilgi ve tecrübelerini paylaşan, her konuda yardımlarıyla destek olan, yol gösteren çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Yusuf SÜMER'e sonsuz teşekkür ederim.

Nümerik çalışma sürecinde desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Aydın Demir'e, tez çalışma sürecinde sürekli olarak fikir alışverişinde bulunduğum Arş. Gör. Gökhan Dok'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca arkamda olduklarını hissettiren ve bana her konuda yol gösteren, varlıklarından daima güç bulduğum, fedakarlıklarını esirgmeden bugüne gelmemi sağlayan, haklarını hiçbir şekilde ödeyemeyeceğim çok değerli anneme, babama ve hayattaki en büyük desteğim, kardeşim Fatmanur DEMİRTAŞ'a sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY .....	xi

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar .....	3
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	5
1.3. Tezin Organizasyonu.....	6

## BÖLÜM 2.

### ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİF KATKILI BETONARME

ELEMANLAR ve ÇARPMA YÜKÜ .....	7
2.1. Ultra Yüksek Performanslı Lif Katkılı Beton .....	7
2.1.1. UYPLB'nin yapısal uygulamaları.....	9
2.1.2. UYPLB'nin çekme davranışı .....	11
2.2. Yükleme Hızı .....	12
2.3. Çarpma Yüğü .....	14

## BÖLÜM 3.

SONLU ELEMAN PROGRAMI.....	19
3.1. Beton Malzeme Modeli .....	20

3.1.1. Çekme rijitliği .....	23
3.1.2. Akma fonksiyonu (Yield function) .....	24
3.1.3. Viskoplastik düzenleme .....	25
3.1.4. Plastik akma .....	25
3.2. Donatı Malzeme Modeli.....	26
3.3. Donatı Beton Etkileşimi .....	27
3.4. Eleman Türleri.....	28
BÖLÜM 4.	
SONLU ELEMAN MODELİNİN DOĞRULANMASI.....	30
4.1. Geometrik Modelleme ve Sınır Şartları .....	30
4.2. Malzeme Modelleri .....	32
4.2.1. Beton basınç modeli.....	32
4.2.2. Beton çekme modeli.....	33
4.3. Deneylelerin Doğrulanması ve Sonuçlar .....	34
4.3.1. Çarpma etkisi altındaki UYPL betonarme kirişler .....	34
4.3.2. Çarpma etkisine maruz kalmış UYPL betonarme kirişlerin artık yük taşıma kapasitesi .....	43
4.3.3. Çarpma etkisine maruz kalmamış UYPL betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi .....	45
BÖLÜM 5.	
PARAMETRİK ÇALIŞMA.....	52
BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	60
KAYNAKÇA .....	62
ÖZGEÇMİŞ .....	66

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BHP	: Beton Hasar Plastisite
$d_c$	: Basınç hasar parametresi
$d_t$	: Çekme hasar parametresi
$E_0$	: Başlangıç elastisite modülü
$E_s$	: Donatı elastisite modülü
$E_{sc}$	: $f'_c$ değerine karşılık gelen sekant modülü
$f'_c$	: Beton tek eksenli basınç dayanımı
$f_{c,d}$	: Dinamik basınç dayanımı
$f_{c,s}$	: Statik basınç dayanımı
$f_s$	: Donatı çeliğinde oluşan gerilme
$f_{su}$	: Donatı kopma dayanımı
$f_{tf,d}$	: Dinamik çekme dayanımı
$f_{tf,s}$	: Statik çekme dayanımı
$f_y$	: Donatı akma dayanımı
$f_{y,d}$	: Dinamik akma dayanımı
$f_{y,s}$	: Statik akma dayanımı
G	Akma potansiyeli
$G_f$	: Kırılma enerjisi
$K_c$	: Çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranı
RPB	: Reaktif pudra betonu
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
UYPL	: Ultra Yüksek Performanslı Lifli
UYPLB	: Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton
$\sigma_c$	: Beton basınç gerilmesi
$\sigma_{cc}$	: UYPLB çatlama dayanımı

$\sigma_t$	: Beton çekme gerilmesi
$\sigma_{pc}$	: UYPLB çekme dayanımı
$\sigma_{t0}$	: Beton maksimum çekme gerilmesi
$\sigma_{bo}/\sigma_{co}$	: İki eksenli başlangıç basınç akma gerilmesinin tek eksenli başlangıç basınç gerilmesine oranı
$\dot{\epsilon}$	: Şekil değiştirme hızı
$\dot{\epsilon}_{sc}$	: Statik yükleme altındaki şekil değiştirme hızı
$\epsilon_0$	: $f'_c$ değerine karşılık gelen birim şekil değiştirme
$\epsilon_c$	: Beton basınç birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_c^{in}$	: Basınç inelastik şekil değiştirmesi
$\tilde{\epsilon}_c^{pl}$	: Basınç plastik şekil değiştirmesi
$\epsilon_L$	: Limit birim şekil değiştirme
$\epsilon_s$	: Donatı birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_t$	: Beton çekme birim şekil değiştirmesi
$\tilde{\epsilon}_t^{pl}$	: Çekme plastik şekil değiştirmesi
$\epsilon_t^{ck}$	: Çatlama birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_{sh}$	: Dayanım pekleşmesi başlangıcındaki donatı birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_{su}$	: Donatı kopma birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_y$	: Donatı çeliği akma birim şekil değiştirmesi
$\epsilon$	: Akma yüzeyi eksantrisitesi
$\psi$	: p-q düzleminde ölçülen dilasyon açısı
$\bar{q}$	: Eşdeğer mises etkili gerilmesi
$\sigma_{to}$	: Eksenel çekme gerilmesi
$\bar{p}$	: Hidrostatik basınç gerilmesini
$p$	: Dayanım pekleşme gücü
$\mu$	: Viskozite parametresi



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Çelik lif şekilleri (TS 10513,1992). .....	8
Şekil 2.2. Farklı çelik lif çeşitleri a)düz b)kancalı c)bükümlü (Wille ve ark., 2011).....	8
Şekil 2.3. UYPLB'nin yapısal uygulamalarda kullanım örnekleri (AFGC, 2013)	11
Şekil 2.4. UYPLB için idealleştirilmiş çekme davranışı (Wille ve ark., 2011).....	12
Şekil 2.5. Farklı yükleme türlerinde şekil değiştirme hızları (Hentz ve ark., 2004)	13
Şekil 2.6. Dinamik serbest cisim diyagramı (Saatci Vecchio, 2009).....	15
Şekil 2.7. Çarpma sonucu oluşan hasar türleri (Sangi, 2011) .....	16
Şekil 2.8. Çarpma yüklemesi için oluşturulan analitik model (Fujikake ve ark., 2006a) .....	18
Şekil 3.1. Eksenel çekme (a) ve basınç (b) altında betonun davranışı (Hibbitt ve ark., 2013).....	21
Şekil 3.2. Lineer (a), bilineer (b), üstel (c) çekme rijitliği modelleri (Earij ve ark., 2017).....	24
Şekil 3.3. Betonun iki eksenli gerilme-güç tükenme zarfı (Sümer, 2010). .....	24
Şekil 3.4. Drucker-Prager hiperbolik fonksiyonu (Sümer, 2010; Hibbitt ve ark., 2013).....	26
Şekil 3.5. Donatı gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Mander ve ark., 1984) .....	27
Şekil 3.6. Eleman türleri.....	28
Şekil 3.7. Tam ve azaltılmış integrasyonlu elemanlar .....	29
Şekil 4.1. a) C3D8R b) T3D2.....	31
Şekil 4.2. UH-S13 kirişi enkesit ve donatı detayı ( Yoo ve ark., 2017b).....	35
Şekil 4.3. Beton basınç (a) ve çekme (b) davranışı.....	36
Şekil 4.4. Boyuna donatı gerilme- şekil değiştirme diyagramı (D16) .....	36
Şekil 4.5. UH-S13 numunesi sonlu eleman modeli .....	376
Şekil 4.6. UH-S13 kirişi çarpma yükü-Zaman grafiği (V=4.75 m/s) .....	37

Şekil 4.7. UH-S13 kirişi Deplasman-Zaman grafiği (V=4.75 m/s) .....	38
Şekil 4.8. UH-S13 kirişi Çarpma yükü-Zaman grafiği (V=4.20 m/s).....	38
Şekil 4.9. UH-S13 kirişi Deplasman-Zaman grafiği (V=4.20 m/s) .....	39
Şekil 4.10. Kesit detayı a) UH-N b) UH-0.53% c) UH-1.06% d) UH-1.71% (Yoo ve ark., 2015a).....	39
Şekil 4.11. Çarpma deney düzeneği (Yoo ve ark., 2015a).....	40
Şekil 4.12. Beton basınç (a) ve çekme (b) davranışı (UH-1.06%).....	41
Şekil 4.13. Donatı mekanik davranışı (UH-1.06%) .....	42
Şekil 4.14. Sonlu eleman modeli (UH-1.06%) .....	41
Şekil 4.15. UH-N numunesi Deplasman-Zaman grafiği .....	42
Şekil 4.16. UH-0.53% numunesi Deplasman-Zaman grafiği .....	42
Şekil 4.17. UH-1.06% numunesi Deplasman-Zaman grafiği .....	42
Şekil 4.18. UH-1.71% numunesi Deplasman-Zaman grafiği .....	43
Şekil 4.19. UH-S-13 kirişi artık yük taşıma kapasitesi (V:4.75 m/s).....	45
Şekil 4.20. UH-S-13 kirişi artık yük taşıma kapasitesi (V:4.20 m/s).....	46
Şekil 4.21. UH-S13 kirişi enkesit ve donatı detayı .....	465
Şekil 4.22. UH-S13 numunesi sonlu eleman modeli .....	47
Şekil 4.23. UH-S13 kirişi Yük-Deplasman grafiği .....	48
Şekil 4.24. Enkesit ve donatı detayı (Yoo ve ark., 2016).....	49
Şekil 4.25. Beton basınç (a) ve çekme (b) davranışı.....	49
Şekil 4.26. Donatı mekanik davranışı .....	49
Şekil 4.27. UH-0.53% numunesi sonlu eleman modeli .....	49
Şekil 4.28. UH-N numunesi Yük-Deplasman grafiği .....	49
Şekil 4.29. UH-0.53% numunesi Yük-Deplasman grafiği.....	49
Şekil 4.30. UH-1.06% numunesi Yük-Deplasman grafiği.....	50
Şekil 4.31. UH-1.71% numunesi Yük-Deplasman grafiği.....	50
Şekil 4.32. Statik ve artık kapasite sonuçlarının karşılaştırması.....	51
Şekil 5.1. UYPLB ile üretilen betonarme kirişin davranışına etriye adım mesafesinin etkisi .....	53
Şekil 5.2. UYPLB ile üretilen betonarme kirişin davranışına malzeme dayanımının etkisi .....	55
Şekil 5.3. UYPLB ile üretilen betonarme kirişin davranışına çarpma hızının etkisi	57

Şekil 5.4.  $f_{yk} = 510MPa$  değeri için çarpma kuvvetinin hız ile değişimi..... 58

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Beton basınç deneyi sonuçları ( Yoo ve ark., 2017b).....	35
Tablo 4.2. Donatı mekanik özellikleri ( Yoo ve ark., 2017b) .....	35
Tablo 4.3. BHP modeli temel parametreleri .....	37
Tablo 4.4. Deney sonuçları ile sonlu eleman modeli sonuçlarının karşılaştırılması..	38
Tablo 4.5. Yükleme hızı dikkate alınarak elde edilen malzeme dayanımları (Yoo ve ark., 2015a).....	39
Tablo 4.6. BHP modeli temel parametreleri .....	41
Tablo 4.7. Deney sonuçları ile sonlu eleman modeli sonuçlarının karşılaştırılması..	47
Tablo 4.8. BHP modeli temel parametreleri .....	48
Tablo 4.9. Donatı mekanik özellikleri (Yoo ve ark., 2016).....	48
Tablo 4.10. BHP modeli temel parametreleri .....	48
Tablo 5.1. Parametrik çalışma için belirlenen değerler.....	54
Tablo 5.2. Analizi yapılan parametre değerleri.....	54
Tablo 5.3. Parametrik çalışma sonuçları .....	58

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Ultra yüksek performanslı lifli beton, betonarme kiriş, çarpma yükü, sonlu elemanlar yöntemi

Ultra yüksek performanslı lifli (UYPL) betonarme elemanların davranışı geleneksel betona göre oldukça farklıdır. Fakat bu beton ile ilgili ülkemizde ve birçok ülkede tasarım yönetmeliğinin bulunmaması ve yüksek maliyetli olması nedeniyle literatürde ultra yüksek performanslı lif katkılı betonarme elemanların dinamik davranışının incelenmesi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Büyük ölçekli yapısal elemanların tasarım prosedürlerinin geliştirilmesi için yapılan deneysel çalışmalarda numune sayısı, sonlu eleman programları ile azaltılabilir. Doğrulanmış sayısal modeller; geometri, yükleme koşulları ve donatı oranındaki değişimin yapısal davranış üzerindeki etkisini incelemek için kullanılabilir.

Bu çalışmada; literatürden seçilen, dinamik ve statik yüklemeye maruz kalan UYPL betonarme kirişler sonlu eleman programı ile modellenmiş ve nümerik modelin davranışı temsil etme kabiliyeti incelenmiştir. Analizler ABAQUS sonlu eleman programı ile beton için Beton Hasar Plastisite (BHP) modeli ve donatı için klasik metal plastisite modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Malzeme modelini oluşturmak için gerekli parametreler basınç ve çekme deneylerinden elde edilmiştir. Nümerik modellerden elde edilen sonuçlar, Beton Hasar Plastisite modelinin ultra yüksek performanslı lifli betonarme kirişlerin dinamik ve statik yükleme altındaki davranışlarını doğru bir şekilde temsil edebildiğini göstermektedir.

Doğrulanmış nümerik modellerden biri seçilerek parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma ile geometri, malzeme özellikleri ve boyut sabit tutularak ultra yüksek performanslı lifli beton (UYPLB) ile üretilen betonarme kirişlerin dinamik davranışına etriye aralığının, boyuna donatı dayanımının ve çarpma hızının etkisi incelenerek elde edilen deplasman-zaman değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Tek seferlik çarpma yüklemesine maruz kalan kirişlerin davranışı üzerinde etriye aralığı değişiminin belirgin bir etkisi olmadığı, boyuna donatı dayanımının düşmesi ile hem maksimum hem de kalıcı yerdeğiştirmelerde belirgin artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Elemanın deforme olmasında en etkili parametrenin çarpma hızının değişimi olduğu belirlenmiştir. Hız artması ile kiriş ortasındaki maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmelerde belirgin artışlar oluşmaktadır.

# **FINITE ELEMENT ANALYSIS OF ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECTED TO IMPACT LOAD**

## **SUMMARY**

Keywords: Ultra high performance fiber reinforced concrete, reinforced concrete beam, impact load, finite element method

The behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete members is quite different from traditional concrete. However, due to the fact that there is no design code in our country and in many countries related to this concrete and its high cost, there are limited studies about the dynamic behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete elements in the literature. The number of specimens in experimental studies to develop design procedures for large-scale structural members can be reduced by finite element programs. Verified numerical models can be used to study the effect of change geometry, the rate of reinforcement and loading conditions on structural behavior.

In this study; ultra high performance fiber reinforced beams, which were subjected to dynamic and static loadings from the literature, were modeled by a finite element program and the simulation ability of the numerical models was examined. The analyzes were carried out using the concrete damage plasticity model for concrete and the classical metal plasticity model for reinforcement in ABAQUS finite element program. The parameters required to constitute the material model were obtained from the pressure and tensile tests. The results obtained from the numerical models show that the Concrete Damage Plasticity model can accurately represent the behavior of the ultra-high performance reinforced concrete beams under dynamic and static loadings.

Additionally; a parametric study was performed by selecting one of the validated numerical models. In the parametric study; geometry, material properties and size were kept constant and displacement-time values were compared by examining the effect of the stirrup spacing, strength of longitudinal reinforcement and impact velocity on the dynamic behavior of the reinforced concrete beams made up of ultra high performance fiber reinforced concrete. It was observed that there was no significant effect of the change in the stirrup spacing on the behavior of the beams exposed to a one-time impact loading and there was a significant increase in both maximum and permanent displacements with the decrease in strength of longitudinal reinforcement. It has been determined that the most effective parameter for deformation of the member is the change of impact velocity. An apparent increases in the maximum and permanent displacements in the middle of the beam is observed along with increase in the speed.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünya çapında artan terör eylemlerinden kaynaklanan patlama yükleri, kaza sonucu oluşan gaz patlamaları, yol ve kıyı yapılarında meydana gelen araç çarpmaları, köprü yapılarına gemi çarpması, deprem sırasında bitişik yapılar arasındaki çarpma etkileri vb. olaylar betonarme yapılarda ani yükleme durumları oluşturmakta ve ağır yapısal hasarlara ya da göçmelere neden olmaktadır. Çarpma ve patlama gibi aşırı yükleme koşullarına maruz kalan betonarme yapıların dizaynı ve analizi önemli çalışma konularından biridir. Darbeye dayanıklı yapı dizaynı kıyı yapıları, askeri tesisler, güç santralleri gibi birçok yapı için önem taşımaktadır. Bu nedenle, literatürde betonarme elemanların darbe ve patlama yükleri etkisi altındaki davranışının incelenmesi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır (Hughes ve Speirs, 1982; Kishi ve ark., 2002; Cotsovos ve ark., 2008; Chen ve May, 2009).

Betondan beklenen en önemli özelliklerden birisi göçmeden önce büyük şekil değiştirmeler yaparak açığa çıkan enerjiyi sönmülemesi, başka bir deyişle sünek bir davranış gösterebilmesidir. Fakat geleneksel betonun enerji yutma kapasitesi, sergilediği gevrek davranış nedeniyle düşük düzeyde kalmaktadır. Sönümlenen enerji miktarının düşük düzeylerde olması göçme sürecini hızlandırmakta, betonda ani kırılmalar meydana getirmektedir (Baradan ve ark., 2012).

Geleneksel betonun gevrek yapısı nedeniyle, darbe ve patlama yükleri altındaki enerji yutma kapasitesi doğal olarak oldukça zayıftır. Beton malzemesinin gevrek davranışının iyileştirilerek sünek bir malzeme haline getirebilmek için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Beton matrisinde süreksiz olarak dağılan liflerin kullanımı; enerji yutma kapasitesini, çekme dayanımını, çatlak gelişim karakteristiklerini ve kırılma tokluğunu iyileştirmek için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Bu özellikleri ile sünek bir davranış sergileyen lifli betonlar ani

yüklemelere karşı yeterli dayanıma sahip olmaktadır (Banthia ve Nandakumar, 2003; Baradan ve ark., 2012).

Yeni bir kompozit yapı malzemesi olarak ortaya çıkan Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB); çelik, sentetik, vb. lifler ile güçlendirilmiş, yüksek süneklik, yorulma direnci ve kırılma tokluğuna sahip, karakteristik basınç dayanımı 150-250 MPa ve çekme dayanımı 10-15 MPa civarlarında olan kompozit bir yapı malzemesidir (AFGC, 2013). Bu üstün özellikler, düşük su/çimento oranı (yaklaşık 0,2), tane yoğunluğunu maksimize eden ve homojenlik sağlayan çok ince katkı malzemeleri, buhar kürü ve mikro çelik liflerin katkısı ile sağlanmaktadır (Yoo, 2017a). UYPLB'un bu özellikleri sayesinde ani veya tekrarlı yüklemelere karşı oldukça yüksek dayanıma sahip olması dolayısıyla, nükleer enerji santralleri, askeri yapılar, ulaşım altyapısı, kıyı yapıları gibi dinamik yüklemelere maruz kalabilecek betonarme yapılar için geliştirilmiş uygun bir malzeme olarak görülmektedir (Fujikake, 2006a).

Literatürde, geleneksel beton ile üretilen betonarme yapı elemanlarının çarpma yüklemesi altındaki davranışının incelenmesi üzerine birçok çalışma bulunmakla birlikte UYPLB ile üretilen yapı elemanlarının çarpma yükleri altındaki davranışlarının incelendiği bilimsel çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu tür yapı elemanlarının tasarım prosedürü ile ilgili ülkemizde mevcut bir yönetmelik olmaması ve deneysel çalışma için kullanılacak test ekipmanı ve malzemenin yüksek maliyetinden dolayı sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir.

Çeşitli yükler etkisi altında, yapı elemanları ve yapıların davranışının anlaşılabilmesinin en iyi yollarından biri deneysel çalışmalardır. Laboratuvar ortamında parametrik çalışma yapılabilmesi için çok fazla sayıda deney numunesinin üretilmesi ve deneylerinin tamamlanması gerekmektedir. Bununla birlikte hızla gelişen bilgisayar teknolojileri, bu deneysel çalışmaların bilgisayar ortamında simüle edilebilmesine, deney numunelerinin 2 veya 3 boyutlu sayısal modellerle hızlı bir şekilde analiz edilmesi ve değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Ancak oluşturulan sayısal modellerin yapı davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebildiğinin kanıtlanması gerekmektedir. Belirli sayıda deneysel çalışma kullanılarak



oluşturulan ve gerçek yapı davranışını simüle edebilen sayısal modeller yardımıyla parametrik çalışmalar gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayısal modeller, deneysel olarak incelenmesi güç olan bu tip yapı elemanlarının yapısal performansı hakkında deney yapılmaksızın fikir sahibi olunabilmesine olanak sağlamaktadır.

### **1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar**

Bu bölümde, çarpma davranışının incelendiği çalışmalar ile UYPL betonarme elemanların davranışlarının incelendiği çalışmalara yer verilmiştir.

Fujikake ve arkadaşları (2006a), reaktif pudra betonu (RPB) ile üretilen kirişin dinamik yükleme altındaki davranışını deneysel çalışmalar ile incelemiş ve analitik bir model geliştirmiştir. Serbest düşmeli bir test düzeneğiyle, düşme yüksekliğinin kirişin dinamik tepkisi üzerine etkisini incelemiş ve ardından kirişlere statik eğilme deneyi yaparak artık yük taşıma kapasitesini belirlemiştir. Analitik model oluşturulurken 2 serbestlik dereceli kütle-yay-sönüm sistemi modeli kullanılmıştır. Deneysel ve analitik sonuçların tutarlı olduğunu belirtmiş, kesme donatısı olmayan çarpma yüklemesine maruz kalan kirişte sayısız kılcal çatlak oluşarak eğilme kırılması gerçekleştiğini tespit etmiştir. Ayrıca çarpma analizi sonuçlarında, RPB ile üretilen kirişin uygulanan enerjinin % 82-86'sını absorbe ettiği ifade edilmiştir.

Saatci ve Vecchico (2009) yaptıkları çalışmada çarpma etkisi altındaki betonarme kirişlerin kesme davranışını incelemişlerdir. 250x410x4880 mm boyutlarında 8 adet kiriş numunesi üretilerek 4 farklı gruba ayrılmıştır. Her bir grup farklı kesme donatısı oranına sahip olup, 210 ve 600 kg'lık kütlelerin numunelerin orta noktalarına serbest düşürülmesi ile çarpma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda tüm numunelerde kesme kapasitesine bakılmaksızın kesme konisi şeklinde hasar olduğu gözlemlenmiştir. Çarpma yükü mesnetlere iletilmeden önce ilk olarak elemanın ataleti tarafından karşılandığı için numune kütlesi ve açıklık gibi özelliklerin çarpma kapasitesi için önemli parametreler olduğu ifade edilmiştir.

Chen ve May (2009), kiriş ve döşeme elemanlarında yüksek kütle ile düşük hızlı çarpma sonucu oluşan davranışı incelemişlerdir. Bu amaçla 14 adet 2.7 m açıklıklı ve 4 adet 1.5 m açıklıklı kiriş numunesi, 4 adet 76 mm kalınlığında  $0.8 \text{ m}^2$  ve 2 adet 150 mm kalınlığında  $2.3 \text{ m}^2$  döşeme numunesini çarpma deneyine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda çarpma yükü, ivme ve donatı birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Kiriş ve döşeme numunelerinde dağılma ve dökülme şeklinde lokal hasarlar olduğu belirtilmiştir. Ampirik formüller ile hesaplanan, döşeme yüzeyinde dağılmaya sebep olan minimum enerji ile uygulanan enerji karşılaştırılmıştır.

Yoo ve arkadaşları (2015a), dinamik yükleme altındaki UYPLB kirişlerin eğilme davranışında donatı oranının etkisini incelemiştir. Bu amaçla 4 adet 200x270mm kesitinde 2900 mm uzunluğunda kiriş numune üreterek 270 kg'lık kütleyle 1600 mm yükseklikten serbest düşürme ile çarpma testleri gerçekleştirmişlerdir. Donatı oranı arttıkça daha az kalıcı deplasman oluştuğunu ve maksimum çatlak genişliğinin azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca UYPL betonarme kirişin çarpma davranışını modellemek için tek serbestlik dereceli sistem ve çok tabakalı kesit analizi ile analitik bir model geliştirilmiştir.

Othman ve Marzouk (2016), beton tipi, lif içeriği ve donatı oranının UYPLB döşemelerin dinamik davranışına etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, 6 adet aynı boyuttaki döşemeye 4.15 m yükseklikten çelik ağırlık düşürerek çarpma testi gerçekleştirmişlerdir. Lif içeriğinin artması ile birlikte aynı dinamik yük altında kirişlerin yaptığı maksimum deplasman ve kalıcı deplasman değerlerinin azaldığı, bununla birlikte enerji yutma kapasitelerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Donatıların, numunelerin tüm davranışında önemli bir rolü olduğu ve çarpma kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir.

Singh ve arkadaşları (2017), farklı açıklık ve enkesite sahip 4 adet UYPLB ile üretilen kirişin eğilme davranışını incelemişler ve kirişlerin davranışını temsil edebilen nümerik bir model oluşturmuşlardır. UYPLB malzemenin davranışını karakterize etmek için Beton Hasar Plastisite (BHP) modeli kullanılmıştır. Nümerik olarak elde edilen yük-deplasman eğrilerinin tüm kirişlerde deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu,

deneysel verilerden elde edilen malzeme özellikleri ile kalibre edilerek kullanılan BHP modelinin davranışı simüle etmekte başarılı olduğu bildirilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarında, tamamen aynı özelliklere sahip iki kiriş numunesinin yerdeğiştirme kapasitelerindeki ve çatlama düzeninin farklılık göstermesi, liflerin yönelim ve dağılımındaki farklılıktan kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir.

Yoo ve arkadaşları (2017b), potansiyel enerji, lif içeriği ve çelik lif tipinin dinamik davranışa etkisini incelemek için 10 adet UYPLB kiriş üreterek, deney elemanlarını çarpma deneyine tabi tutmuştur. Hacimce %2 oranında çelik lif kullanılması durumunda hasar seviyesinin azaldığı ve dolayısıyla kalıcı ve maksimum deplasman değerlerinde ciddi oranlarda düşmeler oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca lif kullanımının, çarpma hasarından sonra artık kapasitede artışa imkân verdiği ve lokal hasarı önlediği tespit edilmiştir. Lif içeriği ve tipinin dinamik ve statik yüklemeler altındaki moment taşıma kapasitelerinin birbirine oranlarına etkisi olmadığı, oranların birbirine benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasının amacı, UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin statik ve dinamik yük altındaki davranışlarını temsil edebilen sonlu eleman modeli sunmak ve çarpma yükü etkisi altındaki davranışlarını incelemektir. Bu amaçla doğrusal olmayan analizler yapabilen ABAQUS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, literatürden seçilen UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, nümerik modelin oluşturulması için gerekli modelleme parametreleri ayrıntılı olarak açıklanmış ve kirişlerin statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmış ve modelin, farklı yüklemeler altında UYPL betonarme kirişin davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebildiği gösterilmiştir. Doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma yükü etkisi altındaki davranışlarının detaylı bir şekilde incelenebilmesi için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar parametrelerin etkisini değerlendirebilmek için grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur.

### 1.3. Tezin Organizasyonu

Altı bölümden oluşan tezin her bir bölümünün içerikleri aşağıda açıklanmıştır.

Bölüm 1’de, tez kapsamında incelenen çalışma konusu tanımlanarak, tezin konusu, kapsamı ve amacı anlatılmıştır. Çarpma yüklemesi ve UYPLB ile üretilen elemanların yapısal davranışı ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Bununla beraber tezin organizasyonu hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 2’de, UYPLB malzeme hakkında genel bilgiler ve çarpma davranışı ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

Bölüm 3’de, modelleme için kullanılan sonlu eleman yöntemi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Kullanılan sonlu eleman programı ve özellikleri, modelleme tekniği, malzeme modelleri bu bölümde açıklanmıştır.

Bölüm 4’de, literatürde UYPL betonarme kirişlerle yapılmış farklı deneylerin sayısal analizleri yapılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modelleri ayrıntılı olarak açıklanmış, deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır.

Bölüm 5’te, doğrulanmış bir model kullanılarak kirişin dinamik davranışını incelemek için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 6’da, elde edilen sonuçlar özetlenerek, gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## **BÖLÜM 2. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİF KATKILI BETONARME ELEMANLAR ve ÇARPMA YÜKÜ**

### **2.1. Ultra Yüksek Performanslı Lif Katkılı Beton**

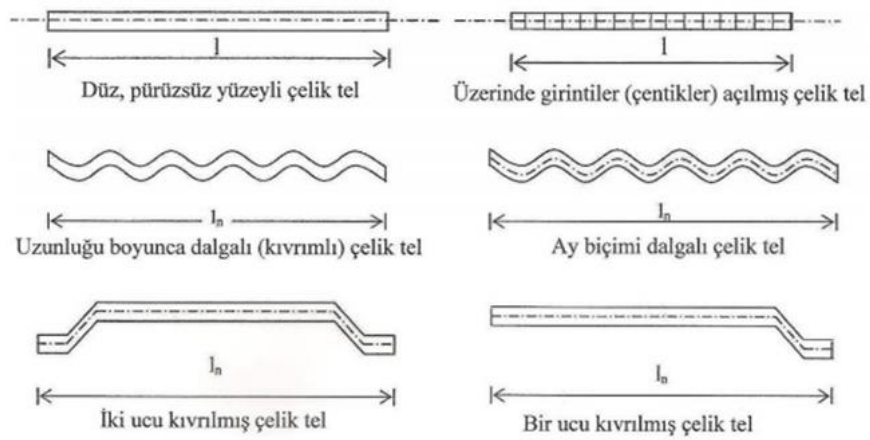
UYPLB'nin gelişiminin kökeni 1970'li yıllara dayanmaktadır. Yudenfreund ve arkadaşları (1972) düşük su/çimento (0.2-0.3) oranına sahip ultra yüksek dayanımlı çimento hamurunu geliştirmişlerdir. Çimento hamurunda poroziteyi azaltmak için vakumlu karıştırma işlemi ile 230 MPa dayanıma ulaşmışlardır. Yüksek sıcaklık ve basınç tekniği ilk olarak Roy ve arkadaşları (1972) tarafından uygulanmış ve porozitesi sıfıra yakın, basınç mukavemeti 680 MPa olan yüksek mukavemetli beton üretmişlerdir. Richard ve Cheyreyzy (1995) yaptıkları çalışmada reaktif pudra betonunu tanıtmış ve çelik lif ile 50 MPa basınç ve 400 °C sıcaklık uygulayarak basınç dayanımı 800 MPa değerine ulaşan yüksek mukavemetli betonların elde edilebileceğini göstermiştir.

Ultra Yüksek Performanslı Lif Katkılı Beton için American Concrete Institute (ACI) Committee 239'un önerdiği tanım; "Belirli dayanıklılık, çekme esnekliği ve tokluk gereksinimleri ile minimum 150 MPa değerinde basınç dayanımına sahip ve genellikle bu gereksinimleri karşılamak için lif içeren betonlardır." şeklindedir.

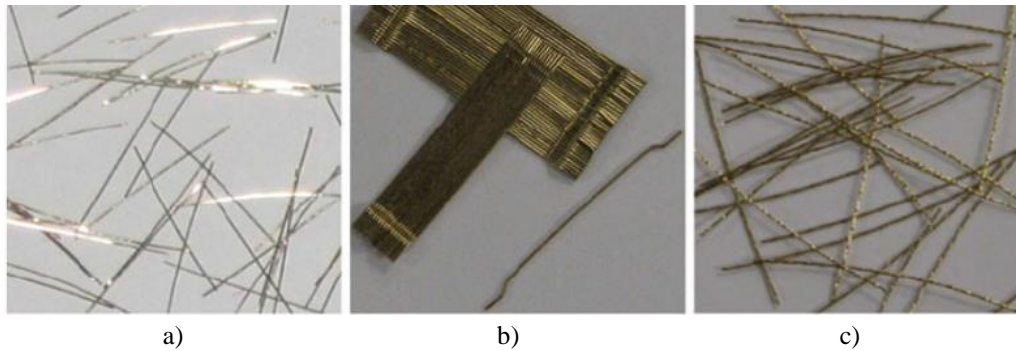
UYPLB'nin davranış farklılığı, beton matrisi içerisinde dağılan liflerin betonun çekme gerilmesi altındaki kırılma davranışını iyileştirmesi ile oluşmaktadır. Bu davranış liflerin, betonda ilk çatlak oluştuğundan sonra çatlak sonlarındaki gerilmeleri kendi üstlerine transfer etmesi ile sağlanmaktadır. Liflerin gerilmeleri taşımasıyla betonu göçmeye götürecek olan kılcal çatlakların büyümesi engellenir ve böylelikle kırılma daha büyük yük ve deformasyonlarda meydana gelir (Baradan ve ark., 2012). Bu

nedenle UYPLB'nin performansı büyük oranda lif ve beton arasındaki bağa, beton matrisinde liflerin dağılımına ve lif oranına bağlıdır.

Çelik lifler, yüksek mukavemetli düşük karbonlu çelik C1008'den imal edilir. Yüksek çekme gerilmesi ve düşük uzama özelliği gösterirler. Akma dayanımı ortalama 1100-1200 MPa aralığında olmaktadır. UYPLB üretimi için kullanılan çelik lifler genellikle daire veya dikdörtgen kesitli olarak farklı tiplerde üretilmektedir. Yaygın olarak kullanılan lif çeşitleri Şekil 2.1. ve 2.2.'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Çelik lif şekilleri (TS 10513,1992)



Şekil 2.2. Farklı çelik lif çeşitleri a) düz b) kancalı c) bükümlü (Wille ve ark., 2011)

Liflerin boyları 6-60 mm, çapları 0.15-1.0 mm arasında olmakta ve elemanların kalınlığına göre değişmektedir. ACI 544'e göre lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesi ile elde edilen "boy/çap" oranı "narınlık oranı (aspect ratio)" olarak tanımlanmaktadır. Narınlık oranları genellikle 30-150 arasındadır. Lifin performansının ne kadarının beton matrisinde kullanılabileceği lifin tipine ve aderansa

bağlı olmaktadır. Uçları kancalı lif tipleri daha iyi aderans sağlamakta ve sıyırılma dayanımı daha fazla olmaktadır. Çelik lifler TS 10513'te 3 farklı grupta toplanmıştır (Şekil 2.1.).

1. Düz pürüzsüz yüzeyli lifler
2. Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş lifler
  - a. Üzerinde çentik bulunan
  - b. Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı)
  - c. Ay biçimi dalgalı
3. Sonu kancalı lifler
  - a. İki ucu kıvrılmış
  - b. Bir ucu kıvrılmış

### **2.1.1. UYPLB'nin yapısal uygulamaları**

Yapısal uygulamalarda UYPLB, ani ya da tekrarlı yüklemelere karşı yeterli dayanıma sahip olması ve yutulabilen enerji miktarının fazla olması gibi avantajlarıyla; çatlamanın önlenmesi, darbe ya da dinamik yüklemelere karşı dayanımın artırılması ve malzemenin dağılmasına direnç göstermesi amacıyla kullanılır.

Lifli betonların en yaygın kullanım alanları şu yapılardır:

Endüstriyel yapılar (dinamik yüklere karşı koyabilmek için), karayolları ve havaalanı kaplama betonları (daha ince plak yapılması gereken durumlarda), püskürtme beton uygulamaları (hasır çelik kullanılmaması, zaman tasarrufu için), su yapıları (dinamik yüklere karşı koymak için), depreme dayanıklı yapılar (sünekliği arttırmak için), şev stabilitesi ve tünel kaplamaları, ince kabuk yapılar, ateşe dayanıklı beton yapılar, beton borular, liman kaplama betonları, ön yapımlı beton elemanlar, askeri güvenlik yapıları, patlamaya karşı dayanıklı olması gereken yapılar(güç santrallerinde, askeri tesislerde) (Baradan ve ark, 2012).

UYPLB ile yapılan ilk yapısal uygulama 1997 Kanada Sherbrooke'da inşaa edilen yaya köprüsüdür. 60 m açıklığında ve 3.3 m genişliğinde olan köprü prekast, ard

germeli uzay kafes sistemlerden oluşmaktadır (Şekil 2.3.a). 2002’de Kore’de yapılan Seon Yu yaya köprüsü 120 m uzunluğunda öngerme ve ardgerme uygulanan bir kemer köprüdür (Şekil 2.3.b). Başka bir örnek olan, 2007’de Fransa’da yapılan cephe kaplamasının kesiti 4cmx5cm’dir (Şekil 2.3.c). UYPLB kullanımı ile geçirimsiz, darbeye dayanıklı bir yapı üretmişlerdir. 2004’de Fransa’da ince kabuk bir yapı olarak üretilen çatı ise 98 m uzunluğunda ve 28 m genişliğindedir (Şekil 2.4.d).



a) Sherbrooke yaya köprüsü



b) Seon Yu yaya köprüsü



c) Cephe kaplaması

Şekil 2.3. UYPLB'nin yapısal uygulamalarda kullanım örnekleri (AFGC, 2013)





d) Çatı uygulaması

Şekil 2.4. (Devamı)

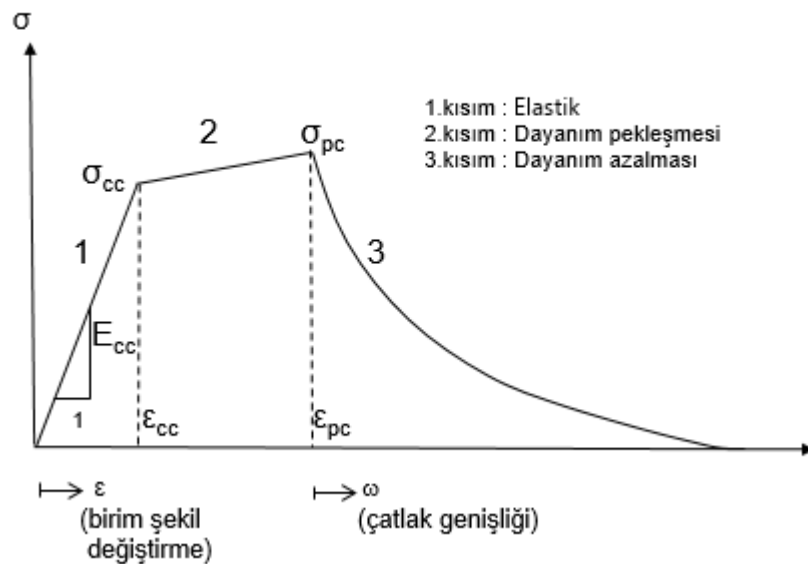
2016'da, NF P18-470 ve NF P18-710 olarak bilinen, UYPLB'nin tasarlanmasında kullanılan teknik kılavuzların ve profesyonel tavsiyelerin yerine kullanılmak üzere iki Fransız ulusal standardı yayınlanmıştır. Bu standartlar geliştirilmeden önce, UYPLB tasarımı ve üretimi için araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan çeşitli öneriler ve kılavuzlar bulunmaktadır. UYPLB'nin kullanımı ile ilgili ilk kılavuz Association Francaise du Genil Civil (AFGC) tarafından 2002'de Fransa'da yayınlanmıştır. Buna benzer bir tasarım tavsiyesi, Japan Society of Civil Engineers (JSCE) tarafından Japonya'da 2006 yılında yayınlanmıştır.

### 2.1.2. UYPLB'nin çekme davranışı

UYPLB'nin çekme altındaki davranışı geleneksel betonun davranışından oldukça farklıdır. Geleneksel betonda oluşan bir çatlakın yayılması için gerekli enerji düşük seviyededir. Geleneksel betonda kırılma sonrası yük hızla azalmakta ve deformasyon çok düşük seviyede olmasına karşın, lifli betonda çatlak oluşuktan sonra yükün daha da arttığı görülür. Beton nihai dayanımına ulaşmış olmasına rağmen matriste bulunan lifler kırılan beton parçalarını bir arada tutmaya devam etmektedir. Betonun içinde bulunan lifler köprü görevi görerek betonda oluşan mikro çatlakların büyümesini engelleyerek, beton matrisi üzerinden boşalan gerilmeyi karşılar ve lokal çatlak oluşana kadar bir miktar daha gerilme almasını sağlar. Gerilme transferi sebebiyle, çatlakın yayılması için gerekli olan enerji miktarı da geleneksel betona göre çok daha fazla olmaktadır (Baradan ve ark, 2012).

İdealleştirilmiş model yaklaşımı çekme davranışını elastik, dayanım pekleşmesi ve dayanım azalması olmak üzere 3 kısma ayırmaktadır (Şekil 2.4.) (Wille ve ark., 2011).

Elastik kısımda (1) çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme davranışı çatlama dayanımının ( $\sigma_{cc}$ ) %90-95'ine kadar lineer olarak ilerler. Dayanım pekleşmesi bölgesinde (2) çekme dayanımına ( $\sigma_{pc}$ ) ulaşana kadar inelastik şekil değişimleri ile beraber birçok mikro çatlak meydana gelir. Dayanım yumuşaması (3) kısmında ise dayanım azalmaya başlar ve deformasyon kapasitesine ulaşana kadar çatlakların büyümesiyle lokal çatlaklar oluşur.



Şekil 2.5. UYPLB için idealleştirilmiş çekme davranışı (Wille ve ark., 2011)

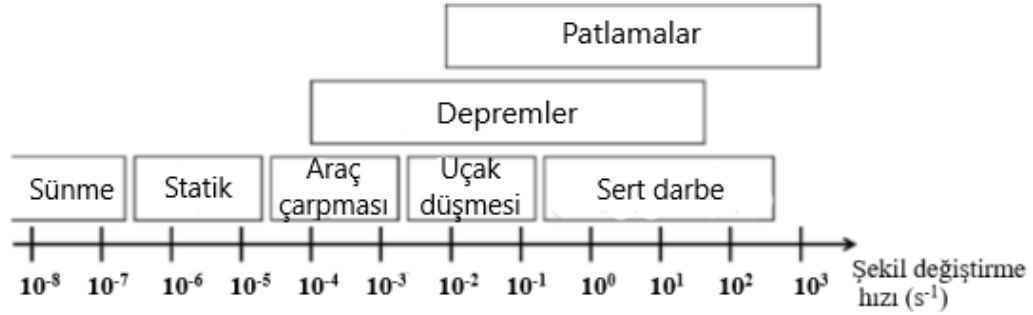
Kırılma enerjisi ( $G_f$ ) N/m veya  $J/m^2$  birimiyle ifade edilen, malzemenin göçme oluşuncaya kadar karşıladığı enerjiyi ifade eden terimdir. Bu enerji gerilme-şekil değiştirme eğrisin altında kalan alan ile hesaplanmaktadır.

## 2.2. Yükleme Hızı

Bir yapıyı tasarım ömrü boyunca karşılaşılabileceği her tür yükleme durumuna uygun şekilde tasarlamak için malzeme davranışının tam olarak bilinmesi gerekmektedir.

Yükleme hızı, inşaat mühendisliğinde kullanılan yapı malzemelerinin birçoğunun davranışını etkileyen önemli bir parametredir ve malzemenin mekanik özellikleri büyük oranda şekil değiştirme hızına (strain rate) bağlı olmaktadır. Farklı yükleme durumları için verilen şekil değiştirme hızı değerleri Şekil 2.5.'te verilmektedir.

Geleneksel betonda şekil değiştirme hızının artması beton basınç ve çekme dayanımını arttırmaktadır. UYPLB'nin geleneksel betona göre yüklemeye hızına daha duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Yüklemeye hızı arttıkça dayanım kazanımı UYPLB'de geleneksel betona göre daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni liflerin çatlak gelişimini azaltması ve porozite oranının düşük olmasıdır (Su ve ark., 2016).



Şekil 2.5. Farklı yüklemeye türlerinde şekil değiştirme hızları (Hentz ve ark., 2004)

Fujikake ve arkadaşları (2002), RPB kullanarak yaptıkları çalışmada dinamik basınç dayanımı ile yüklemeye hızı arasındaki ilişkiyi aşağıdaki formülasyon ile ifade etmiştir.

$$\frac{f_{c,d}}{f_{c,s}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}}\right)^{0.0055 \left[ \log\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}}\right) \right]^{0.951}} \quad \dot{\epsilon} \geq \dot{\epsilon}_{sc} \quad (2.1)$$

$$\frac{f_{c,d}}{f_{c,s}} = 1 \quad \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_{sc} \quad (2.2)$$

$f_{c,s}$  : Statik basınç dayanımı

$f_{c,d}$  : Dinamik basınç dayanımı

$\dot{\epsilon}_{sc}$  : Statik yüklemeye altındaki şekil değiştirme hızı (1.2x10<sup>-5</sup>/s)

$\dot{\epsilon}$  : Şekil değiştirme hızı

RPB'nin dinamik çekme dayanımı ile yükleme hızı arasındaki ilişki Fujikake ve arkadaşları (2006b) tarafından yapılan çalışmada aşağıdaki ilişki formüle edilmiştir.

$$\frac{f_{tf,d}}{f_{tf,s}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}}\right)^{0.0013 \left[ \log\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}}\right) \right]^{1.95}} \quad \dot{\epsilon} \geq \dot{\epsilon}_{st} \quad (2.3)$$

$$\frac{f_{tf,d}}{f_{tf,s}} = 1 \quad \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_{st} \quad (2.4)$$

$f_{tf,s}$  : Statik çekme dayanımı

$f_{tf,d}$  : Dinamik çekme dayanımı

$\dot{\epsilon}_{st}$  : Statik yükleme altındaki şekil değiştirme hızı ( $1 \times 10^{-6}/s$ )

JSCE (1993), donatı çeliğinin dinamik akma dayanımını Denklem 2.5 ile ifade etmektedir. (JSCE, 1993)

$$\frac{f_{y,d}}{f_{y,s}} = 1.202 + 0.040 \times \log_{10} \dot{\epsilon} \geq 1 \quad (2.5)$$

$f_{y,d}$  : Dinamik akma dayanımı

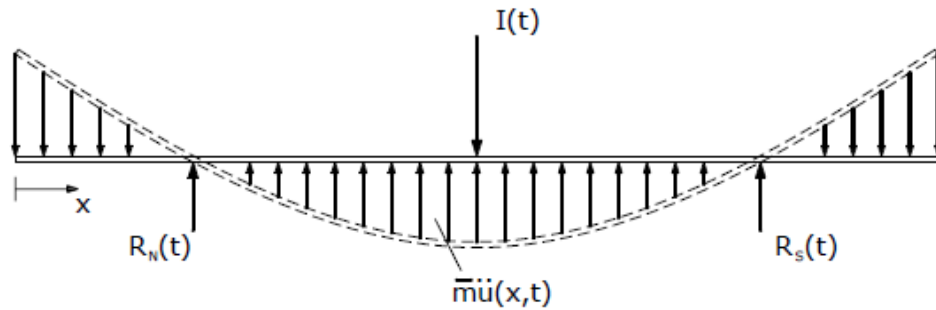
$f_{y,s}$  : Statik akma dayanımı

### 2.3. Çarpma Yüğü

Çarpma yüğü, büyük yoğunluk ve kısa süreli olarak karakterize edilen aşırı derecede ağır yükleme koşuludur. Çarpma yükünün yükleme hızı, statik yükleme ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olmaktadır. Yüksek yükleme hızı yapısal davranışı ve kırılma türünü değiştirebilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda statik yükleme durumunda eğilme kırılması gerçekleşen betonarme kirişlerde çarpma yükleme altında kesme hasarı olduğu gözlemlenmiştir (Saatci ve Vecchio, 2009; Kishi ve ark., 2002).

Çarpma yükü altındaki betonarme davranış negatif moment, negatif reaksiyon kuvvetleri ve lokal hasarlar nedeniyle statik yükleme altındaki betonarme davranıştan farklı olmaktadır. Bu farklılığın ana sebebi atalet kuvveti ve atalet kuvvetinin kiriş boyunca dağılımıdır.

Şekil 2.6.'da çarpma uygulanan bir kirişte herhangi bir zamanda oluşan kuvvetler görülmektedir. Hareket denklemini, çarpma kuvveti, reaksiyon kuvveti ve çarpma olayının herhangi bir anındaki atalet kuvvetlerinin katılımı ile oluşmaktadır.



Şekil 2.6. Dinamik serbest cisim diyagramı (Saatci ve Vecchio, 2009)

Şekil 2.6.'da  $I(t)$  çarpma kuvvetini,  $\bar{m}$  birim genişlikteki kütleyi,  $\ddot{u}(x, t)$  numunede oluşan ivmeyi,  $R_N(t)$  ve  $R_S(t)$  ise mesnet reaksiyon kuvvetlerini ifade etmektedir ve herhangi bir  $t$  zamanındaki düşey kuvvet eşitliği Denklem 2.6 ile ifade edilir. Burada  $L$  numunenin toplam boyunu ifade etmektedir (Saatci ve Vecchio, 2009)

$$\int_0^L \bar{m} \ddot{u}(x, t) dx + R_N(t) + R_S(t) - I(t) = 0 \quad (2.6)$$

Yapısal bir kiriş elemanın çarpma yükü altındaki davranışı, gerilme dağılımı ve atalet kuvvetlerine bağlı olarak lokal veya yapısal olmak üzere iki tür tepkiden oluşur. Çarpma enerjisinin çarpma bölgesinde yoğunlaşması ile çok kısa bir süre boyunca oluşan tepki lokal, çarpma sonrası uzun periyotta oluşan, yapı elemanın tümünde eğilme ve elastoplastik deformasyon oluşturan titreşim etkili tepki yapısal olarak adlandırılmaktadır. İkisinin beraber olduğu tepki durumu ise karma hasar olarak

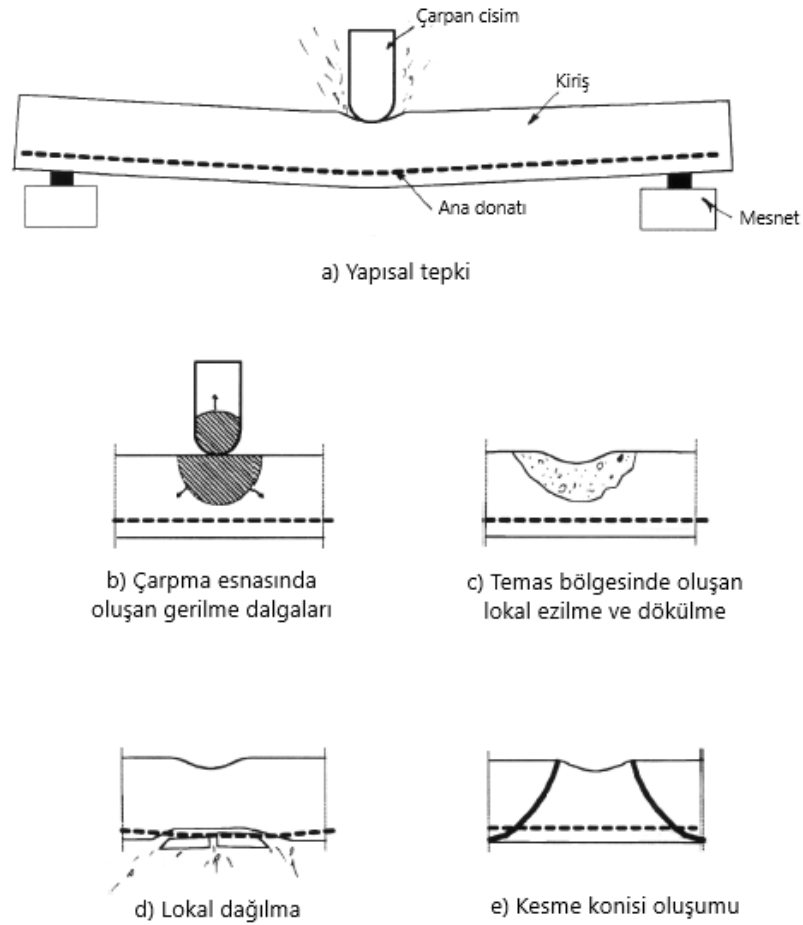
adlandırılmaktadır. Lokal tepki evresinde oluşan gerilme zamanla değişen bir açıklıkta ifade edilir. Genel tepki evresinde ise enine gerilmeler tüm kiriş açıklığı boyunca uniform bir gerilme durumuna ulaşmıştır ve kiriş bir bütün olarak deforme olmaktadır.

Bir çarpmadan dolayı yapıda oluşabilecek lokal hasar, ezilme (crushing), kesme konisi (shear plug) ve dağılma (scabbing) şeklinde olabilir. Yapısal hasar genellikle eğilme kırılması şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 2.7.a). Yapı elemanında oluşan lokal hasarın yapısal hasar üzerine önemli bir etkisi olabilmektedir. Çarpma noktasındaki lokal bir kesme kırılması elemanın bütünlüğünü kötü yönde etkilemektedir. Bir kiriş eleman çarpma yüküne maruz kaldığında oluşan mekanizmalar Şekil 2.7.'de verilmiştir. Şekil 2.7.b'de çarpma esnasında oluşan gerilme dalgaları gösterilmektedir.

Çarpma kütlesi kirişe vurduğunda ilk birkaç mikrosaniye boyunca gerilme kiriş yüzeyindeki temas alanına aktarılır. Bu bölgedeki beton ezilir ve o bölgede betonda çukurlaşma oluşur (Şekil 2.7.c). Bu durum yüzey ezilmesi (crushing) olarak adlandırılmaktadır.

Bir basınç gerilmesinin yansıması betonun serbest yüzeyinde ve yükleme ile dik açı yapacak şekilde oluşan çekme kırılması ile sonuçlanır. Eğilme donatısının bulunduğu bölgede, çarpma yükü ile dik açı yapacak şekilde ve çarpma alanının karşıt yüzünde lokal ayrılma oluşmaktadır (Şekil 2.8.d). Bu durum ise dağılma (scabbing) olarak ifade edilir.

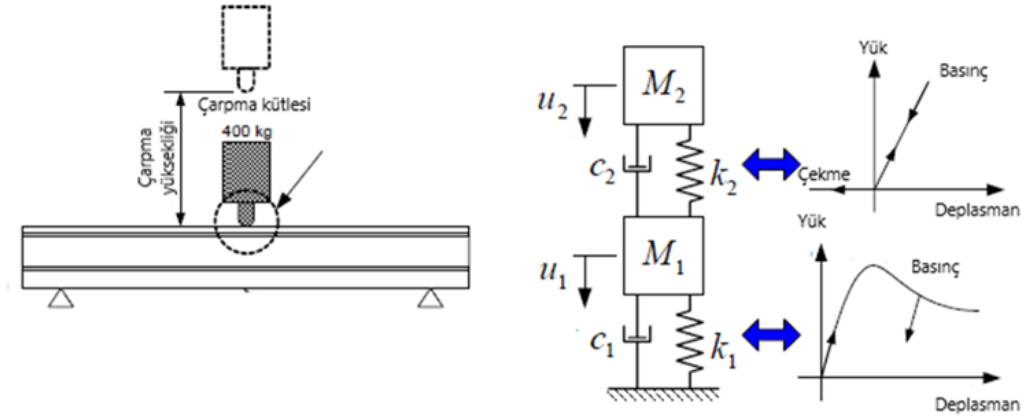
Elemana aktarılan gerilme birçok iç kuvvet ile karşılaşmaktadır. Gerilim dalgası yayıldıkça ivme aşamalı olarak beton içinde birikmektedir. Çarpma alanının altında biriken ivme fazla olduğunda, kirişin eğilme tepkisi vermesi için zaman geçmeden lokal bir kesme konisi (shear plug) meydana gelebilir (Şekil 2.7.e). Elemanda oluşan ivme çarpma alanından mesnetlere doğru aktarıldıkça kirişte yapısal eğilme tepkisi oluşmaktadır (Şekil 2.7.a). Bu davranış kesme konisi oluşumuna kıyasla daha uzun bir periyotta meydana gelmektedir (Sangi, 2011).



Şekil 2.7. Çarpma sonucu oluşan hasar türleri (Sangi, 2011)

Betonarme kirişlerin çarpma yüklemesi altındaki davranışının belirlenebilmesi için kütle yay sönüm sistemi ile oluşturulan analitik modeller geliştirilmiştir (CEB, 1998; Miyamoto ve ark, 1994.) Fujikake ve ark. (2006a) serbest düşüslü çarpmaya maruz kalan RPB ile üretilen kirişin tepkisini iki serbestlik dereceli kütle yay sönüm sistemi ile ifade etmişlerdir (Şekil 2.8.)

Şekil 2.8.'de verilen model yapısal tepkinin yanı sıra düşme kütlesi ile kiriş arasındaki temas noktasındaki lokal tepkiyi de temsil etmektedir. Lokal tepki  $c_2$  ve  $k_2$  terimleriyle tanımlanmaktadır.



Şekil 2.8. Çarpma yüklemesi için oluşturulan analitik model (Fujikake ve ark., 2006a)

Kiriş  $M_1$  kütlesi ile sönüm katsayısı  $c_1$ , yay sabiti  $k_1$  ile ifade edilir. Serbest düşme kütlesi  $M_2$  temas noktasındaki lokal tepki sönüm katsayısı  $c_2$  ve yay sabiti  $k_2$  ile ifade edilir. 2 serbestlik dereceli sistemin hareket denklemleri:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ M_2 g \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

$g$  : Yer çekimi ivmesi

$u_i, \dot{u}_i, \ddot{u}_i$ ;  $M_i$  kütlesine ait yerdeğiştirme, hız ve ivme değerleridir.

$(u_2 - u_1) \geq 0$  olduğu durum temas durumunu ifade etmektedir. Düşme kütlesi ve kiriş arasındaki iç kuvvetler ara yüzeydeki yay  $k_2$  ve sönümleyici  $c_2$  aracılığıyla aktarılır.  $(u_2 - u_1) \leq 0$  olduğu durum ayrılma durumunu temsil eder. Bu durumda  $k_2$  ve  $c_2$  değerleri 0 dır.



### **BÖLÜM 3. SONLU ELEMAN PROGRAMI**

UYPLB ile üretilen yapı elemanları için ülkemizde ve birçok ülkede tasarım yönetmeliği bulunmamaktadır. Aynı zamanda, malzeme maliyeti normal betona göre oldukça yüksektir. Beton dizaynı için malzeme ve yapı düzeyinde kapsamlı testler gereklidir. Bu dizayn; lif çeşidi ve hacminin değişkenliği sebebiyle ultra yüksek performanslı lif katkılı betonlar için geleneksel betona göre daha karmaşıktır. Büyük ölçekli yapısal elemanların tasarımını geliştirmek için yapılan deneysel çalışmalar, sonlu eleman paketlerinde mevcut olan beton malzeme modelinin, malzeme ve yapı elemanları üzerinde gerçekleştirilen sınırlı sayıda test ile doğrulandığı alternatif bir yol benimsenerek azaltılabilir. Doğrulanmış sayısal modeller, geometri, yükleme koşulları ve donatıdaki değişime bağlı olarak yapısal davranış üzerindeki etkiyi incelemek için kullanılabilir.

Sonlu elemanlar metodu (SEM), karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan sayısal bir problem çözme metodolojisidir. Bu yöntem sistematik olarak denklemler verir ve bilinmeyenlerin değerlerini tahmin etmeye çalışır. Karmaşık bir problemi, çözülmesi daha kolay olan daha basit alt problemlere indirgeyerek her birini kendi içerisinde çözümlenmektedir.

Bu çalışmada nümerik analizler, sonlu eleman programı ABAQUS (2018) kullanılarak yapılmıştır. Abaqus programında doğrusal olmayan denklemlerin çözümü için açık (explicit) veya kapalı (implicit) direk integrasyon sistemi kullanılabilir. Kapalı yöntem yerdeğiştirmenin zamana bağlı olmadığı, atalet ve sönümü dikkate almayan, her bir adım çözümü için bir iterasyon gerektiren ve büyük zaman adımları kullanılan bir yöntemdir. Açık yöntem zamana bağlı problemlerin çözümünde daha hızlı ve daha verimli sonuçlar veren, elemanın atalet ve sönüm etkisini dikkate alan bir yöntemdir. Zamana bağlı olmayan statik problemleri çözmek için kapalı (implicit) çözüm

yöntemi, çarpma gibi kısa zamanda yüksek deformasyon oluşturan zamana bağlı dinamik problemlerin çözümü için açık (explicit) çözüm yöntemi daha kullanışlı olmaktadır (Hibbit ve ark., 2013).

### 3.1. Beton Malzeme Modeli

Abaqus'te iki temel beton modeli bulunmaktadır; yayılı çatlak modeli ve beton hasar plastisite (BHP) modeli. Chen ve Graybeal (2012), UYPLB ile üretilen kırıqların mekanik davranışını simüle etmek için BHP modelinin daha uygun olduğunu ifade etmiştir. Bu nedenle bu çalışmada UYPL betonarme kırıqların davranışını simüle edebilmek için BHP modeli kullanılmıştır.

BHP modeli ilk olarak Lubliner ve arkadaşları (1989) tarafından monotonik yüklemeler için önerilmiştir. Lee ve Fenves (1998) modeli daha sonra dinamik ve çevrimsel yüklemeler için geliştirmişlerdir. Model plastisite tabanlı sürekli hasar modelidir (Lubliner ve ark., 1989). Beton malzemenin inelastik davranışını karakterize etmek için basınç ve çekme gerilmesi altındaki elastoplastik davranışı ile beraber bir iç değişken olarak hasar parametresini kullanır.

Beton malzeme modelini tanımlamak için basınç ezilmesi ve çekme çatlaması olmak üzere önemli iki temel yenilme mekanizması vardır (Şekil 3.1.).

Şekil 3.1.a'da görüldüğü gibi BHP modelinin tek eksenli çekme altındaki davranışı beton maksimum çekme gerilmesi ( $\sigma_{t0}$ ) değerine ulaşana kadar lineer elastik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile tanımlanır. Bu gerilme değerine ulaşan betonda çekme çatlakları oluşur. Çatlakların ilerlemesi ile dayanım azalmaya başladığı kısım çekme rijitliği olarak tanımlanır ve azalan bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile veya kırılma enerjisi ile ifade edilebilir (Earij ve ark., 2017).

Tek eksenli basınç yüklemesi altında, BHP modeli  $\sigma_{c0}$  değerine kadar lineer bir davranış sergilemektedir (Şekil 3.1.b). Bu dayanım aşıldıktan sonra betonda plastik şekil değiştirmeler başlamaktadır.  $\sigma_{c0}$  ile  $\sigma_{cu}$  arasındaki davranış dayanım pekleşmesi,



$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (3.2)$$

Kırılma yüzeyi, basınç ve çekme yüklemesi altındaki kırılma mekanizmasına bağlı olan iki değişken ( $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ - $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ ) ile kontrol edilir. Beton gerilme-şekil değiştirme davranışı deneysel çalışmalar ile veya literatürde verilen modeller ile elde edilebilir (Mander ve ark., 1988; AFGC, 2002; FIB MC2010, 2010). Elde edilen gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) değerleri programa gerilme-inelastik şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\varepsilon_c^{in}$ ) olarak tanıtılması gerekmektedir. Tanımlanan değerler program tarafından otomatik olarak gerilme-plastik şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ ) değerlerine dönüştürülür. Bu değerler arasındaki bağıntı Denklem 3.3-3.6 ile tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3.3)$$

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (3.5)$$

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \cdot \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (3.6)$$

$d_c$  ve  $d_t$  betonun basınç ve çekme gerilmeleri etkisi altındaki elastik rijitlikteki azalmayı ifade eden hasar parametreleri olup Denklem 3.7 ve 3.9 ile ifade edilmektedir (Birtel ve Mark, 2006). Hasar parametresi değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir ve 0 hasarın olmadığı durumu, 1 tam hasarlı durumu ifade etmektedir.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c/E_0}{\sigma_c/E_0 + \varepsilon_c^{in}(1-b_c)} \quad (3.7)$$

$$b_c = \varepsilon_c^{pl} / \varepsilon_c^{in} \quad (3.8)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_{t0}/E_0}{\sigma_{t0}/E_0 + \varepsilon_t^{ck}(1-b_t)} \quad (3.9)$$

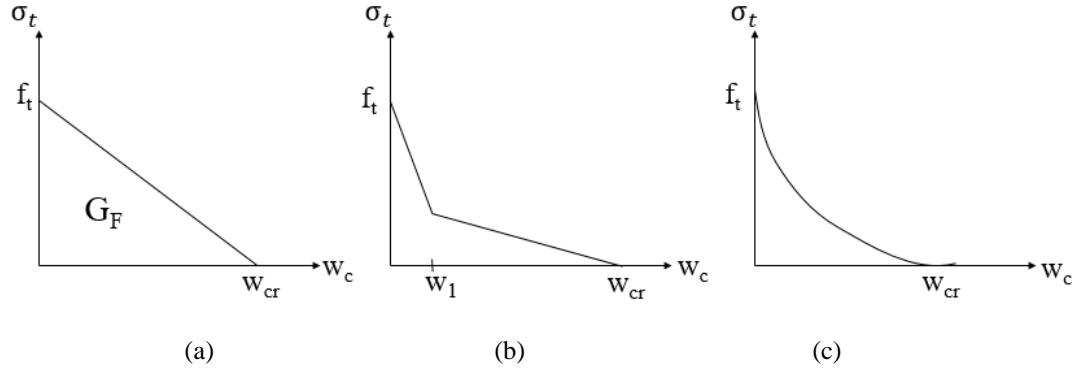
$$b_t = \varepsilon_t^{pl} / \varepsilon_t^{ck} \quad (3.10)$$

### 3.1.1. Çekme rijitliği

Tek eksenli çekme altında betonda çatlamanın oluşmasıyla elastik sınırın ötesine geçen davranış, beton ve donatı arasında gerilme transferini modelleyen ‘çekme rijitliği’ olarak da bilinen ‘çekme yumuşaması’ davranışı ile modellenmektedir. Betonun çekme gerilmesi altındaki davranışı, gerilme-çatlak genişliği ya da gerilme-birim şekil değiştirme olarak tanımlanabilmektedir.

Donatının olmaması veya az olması durumunda çekme rijitliğini gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi olarak tanımlamak modelde yakınsama problemi oluşturabilmektedir. Bu problem genelde çatlağın bir bölgede lokalize olması durumunda oluşur. Hillerborg ve arkadaşları (1976) tarafından önerilen çatlama enerjisi yaklaşımı bu problemin üstesinden gelmektedir. Bu yaklaşım ile betonun davranışı gerilme-şekil değiştirme yerine gerilme-çatlak genişliği davranışı ile karakterize edilmektedir. Gerilme-çatlak genişliği eğrisinin altında kalan alan kırılma enerjisini (fracture energy) ifade etmektedir. Literatürde çekme dayanımı-çatlak genişliği eğrisini tanımlamak için 3 farklı model önerilmiştir (Şekil 3.2.). Davranışı tanımlamak için en basit yaklaşım lineer çekme rijitliği modelidir. Bu model makul denebilecek doğrulukta sonuçlar vermektedir fakat betonun tepkisi oldukça rijit olma eğilimindedir. Bunun yerine, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmını

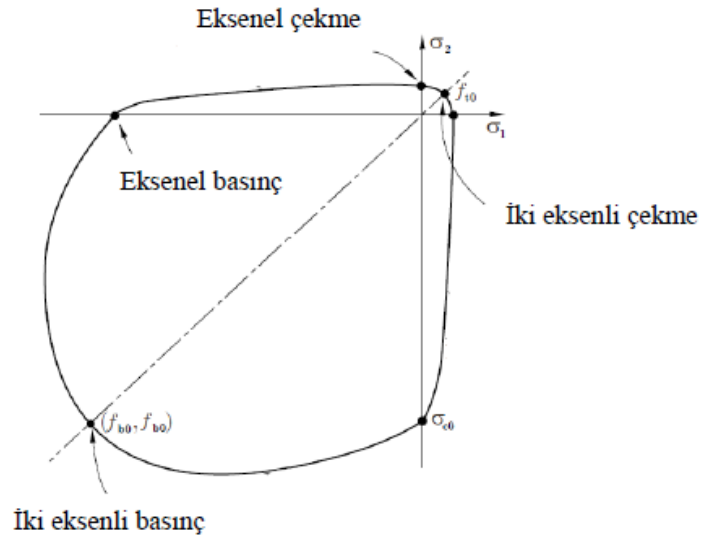
tanımlamak için iki-doğrusal veya üstel yaklaşım kullanılabilmektedir (Earij ve ark., 2017).



Şekil 3.2. Linear (a), bilinear (b), üstel (c) çekme rijitliği modelleri (Earij ve ark., 2017)

### 3.1.2. Akma fonksiyonu (Yield function)

Betonda oluşması muhtemel gerilme kombinasyonları altındaki elastik sınırlar bir akma yüzeyi ile belirlenir. BHP modelinde kullanılan düzlem gerilme altındaki akma yüzeyi zarfı Şekil 3.3.'te verilmektedir.



Şekil 3.3. Betonun iki eksenli gerilme-güç tükenme zarfı (Sümer, 2010).

Betonun akma yüzeyini oluşturabilmek için gerekli parametreler; İki eksenli başlangıç basınç akma gerilmesinin tek eksenli başlangıç basınç gerilmesine oranı ( $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ ),

eksantrisite parametresi ( $\epsilon$ ), dilasyon açısı ( $\psi$ ), çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranı ( $K_c$ )'dır. Programda eksantrisite parametresi ( $\epsilon$ ) için varsayılan (default) değeri 0.1 olarak verilmiştir.  $\sigma_{bo}/\sigma_{co}$  oranı 1.10 ile 1.16 arasında değişen değerler almaktadır (Lubliner ve ark., 1989). UYPLB için bu değer 1.05 olarak raporlanmıştır (Curbach ve Speck, 2008).  $K_c$  değeri için varsayılan değer 2/3 olarak verilmiştir. Dilasyon açısı ( $\psi$ ) plastik hacimsel değişimi ifade etmektedir. Dilasyon açısının gerçekçi olarak tespit edilebilmesi için parametrik çalışma yapılması gerekmektedir (Demir, 2018).

### 3.1.3. Viskoplastik düzenleme

Gerilme ve rijitlik azalması sergileyen malzeme modelleri analizlerde sıklıkla yakınsama problemleri oluşturabilmektedir. Bu yakınsama probleminin üstesinden gelmek için viskoplastik düzenleme yapılmaktadır. Viskoplastisite tanımlaması ile gerilmelerin akma yüzeyinin bir miktar dışına çıkması sağlanarak yakınsama sağlanmaktadır. Viskozite parametresinin varsayılan değeri ABAQUS programında 0 olarak verilmiştir. 0 değeri viskoplastik düzenleme yapılmadığı anlamına gelmektedir (Hibbitt ve ark., 2013).

### 3.1.4. Plastik akma

BHP modelinde plastik şekil değiştirme artımı ile gerilme artımı arasındaki ilişkiyi tanımlayan akma potansiyeli,  $G$ , Drucker-Prager hiperbolik fonksiyonu ile tanımlanmaktadır (Şekil 3.4.).

$$G = \sqrt{(\epsilon \cdot \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \psi \quad (3.11)$$

Burada,

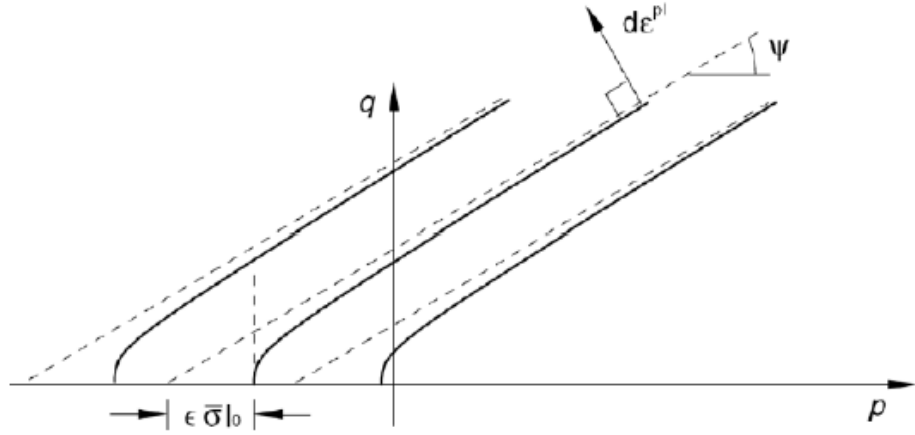
$\epsilon$ : Akma yüzeyi eksantrisitesi

$\psi$  : p-q düzleminde ölçülen dilasyon açısı

$\bar{q}$ : Eşdeğer mises etkili gerilmesi

$\sigma_{t0}$ : Maksimum çekme gerilmesi

$\bar{p}$ : Hidrostatik basınç gerilmesini ifade etmektedir (Sümer, 2010).



Şekil 3.4. Drucker-Prager hiperbolik fonksiyonu (Sümer, 2010; Hibbitt ve ark., 2013)

### 3.2. Donatı Malzeme Modeli

Çelik donatının mekanik davranışını tanımlamak programda yer alan malzeme modellerinden “klasik metal plastisite” modeli kullanılmıştır. Klasik metal plastisite modeli için davranış gerilme-plastik şekil değiştirme olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle toplam şekil değiştirme değerinden elastik birim şekil değiştirme çıkarılarak gerilme-plastik şekil değiştirme grafiği elde edilmesi gerekmektedir.

Donatının gerilme-şekil değiştirme eğrisini tanımlamak için literatürde Mander ve arkadaşları (1984) tarafından önerilen malzeme modeli kullanılmıştır (Şekil 3.5.). Davranışı tanımlayabilmek için gerekli eşitlikler aşağıda açıklanmıştır.

Elastik yükleme ( $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$ )

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad (3.12)$$

Akma bölgesi ( $\varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$ )



$$f_s = f_y \quad (3.13)$$

Dayanım pekleşmesi ( $\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s < \varepsilon_{su}$ )

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left| \frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right|^p \quad (3.14)$$

$f_s$  : Donatı çeliğinde oluşan gerilme

$\varepsilon_s$  : Donatı birim şekil değiştirmesi

$E_s$  : Donatı elastisite modülü

$\varepsilon_y$  : Donatı çeliği akma birim şekil değiştirmesi

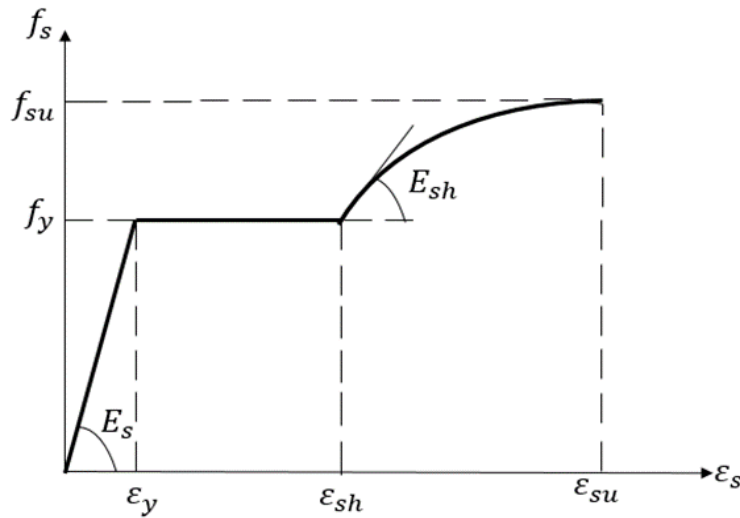
$f_y$  : Donatı akma dayanımı

$f_{su}$  : Donatı kopma dayanımı

$\varepsilon_{su}$  : Donatı kopma birim şekil değiştirmesi

$\varepsilon_{sh}$  : Dayanım pekleşmesi başlangıcındaki donatı birim şekil değiştirmesi

$p$  : Dayanım pekleşme gücü



Şekil 3.5. Donatı gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Mander ve ark., 1984).

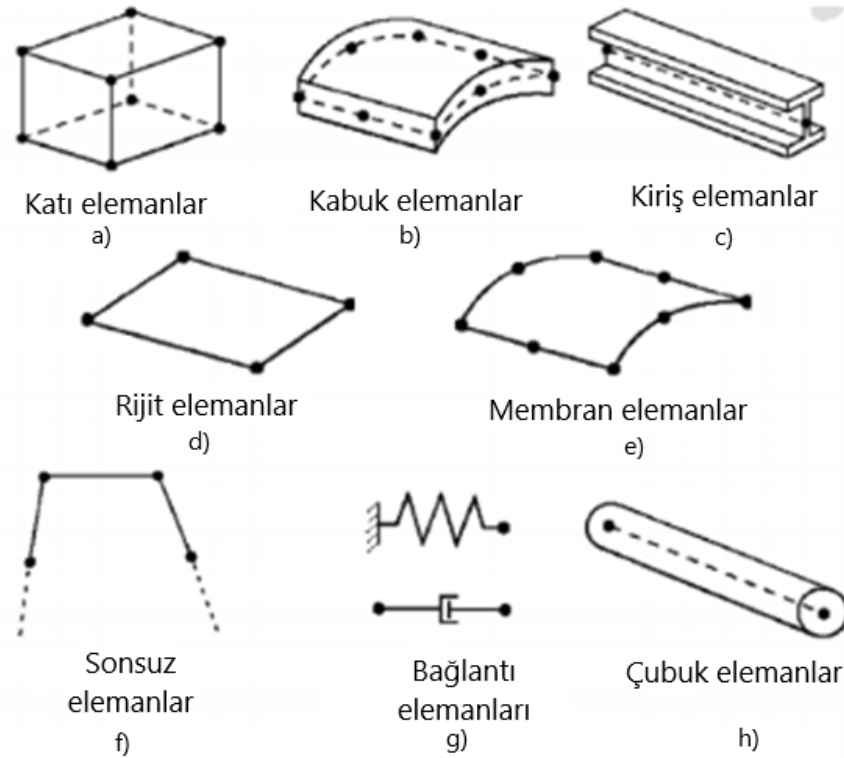
### 3.3. Donatı Beton Etkileşimi

Donatı ve beton arasındaki etkileşim gömülü eleman (embedded element) tekniği ile sağlanmaktadır. Bu tekniğe göre gömülü elemanın düğüm noktalarının dönme

serbestlik derecesi, gömüldüğü elemanın (host element) serbestlik derecesi ile sınırlandırılır (Hibbitt ve ark., 2013).

### 3.4. Eleman Türleri

ABAQUS programının eleman kütüphanesinde çok çeşitli eleman bulunması farklı geometri ve yapıların modellenmesinde esneklik sağlamaktadır. Elemanlar; tür, düğüm noktası sayısı (enterpolasyon), serbestlik derecesi, formülasyon ve integrasyona göre karakterize edilmektedir. Şekil 3.6.'da yaygın olarak kullanılan elemanların türleri yer almaktadır.



Şekil 3.6. Eleman türleri

Bu tez çalışmasında beton malzemenin modellenmesi için kullanılan katı (solid) elemanlar kütüphanesinde (Şekil 3.6.a), lineer analizler ve temas, plastisite, büyük deformasyonlar içeren nonlinear analizler için kullanılabilen, 1,2 ya da 3 boyutlu; lineer ve kuadratik enterpolasyon özelliğine sahip elemanlar bulunmaktadır. Donatı

malzemesini tanımlamak için kullanılan çubuk (truss) elemanlar (Şekil 3.6.h), sadece aksenal yükü karşılayan 2 veya 3 boyutlu olarak modellenebilen elemanlardır.

	Tam İntegrasyon	Azaltılmış İntegrasyon
Lineer		
Kuadratik		

Şekil 3.7. Tam ve azaltılmış integrasyonlu elemanlar

Katı bir eleman düğüm sayısına göre programda lineer veya kuadratik enterpolasyon özelliğine sahiptir. Elemanlar sadece köşe noktalarında düğüm noktalarına sahipse lineer, bu düğüm noktalarının ortalarında da düğüm noktasına sahipse kuadratik eleman olarak adlandırılmaktadır. Aynı zamanda programda tam ve azaltılmış integrasyonlu elemanlar bulunmaktadır (Şekil 3.7.). Elemanın kütle ve rijitliği nümerik olarak integrasyon noktalarında hesaplanmaktadır. Bu nümerik algoritma elemanın nasıl davranacağını belirler. Azaltılmış integrasyon elemanın rijitliğini oluşturmak için daha az sayıda integrasyon kullanmaktadır ve analiz süresini kısaltmaktadır (Hibbitt ve ark., 2013).

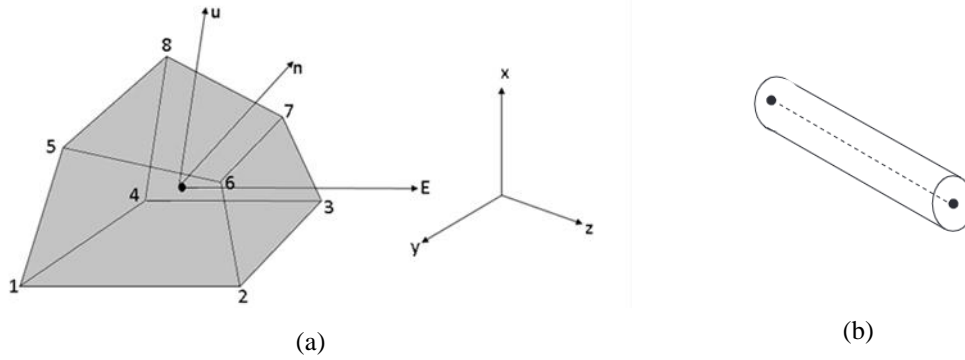
## **BÖLÜM 4. SONLU ELEMAN MODELİNİN DOĞRULANMASI**

Bu tez çalışmasının temel amacı, UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki dinamik davranışlarının incelenmesidir. UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebilmek için ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla sayısal modeller oluşturulmuş ve sayısal modellerin doğrulanması literatürdeki deneysel çalışmalar ile yapılmıştır. Doğrulanmış sayısal modeller yardımıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Bu bölümde literatürdeki, UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin statik yükleme ve çarpma yüklemesi etkisi altındaki davranışının incelendiği deneysel çalışmalar ile çarpma etkisi sonrası UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerdeki artık kapasitenin belirlendiği statik deney sonuçları kullanılarak, oluşturulan sayısal modellerin etkinliği incelenmiştir.

### **4.1. Geometrik Modelleme ve Sınır Şartları**

Sayısal modelleme için programın part modülünde beton ve çarpma kütlesi 3 boyutlu katı eleman (solid), donatı ise çubuk elemanlar (truss) olarak modellenmiştir. Oluşturulan parçalar assembly modülünde birleştirilmiştir. Çözüm ağında beton ve çarpma kütlesi; 8-düğüm noktalı ve azaltılmış integrasyonlu lineer (C3D8R) sonlu elemanlar olarak modellenmiştir. Donatı çubukları ise 2-düğüm noktalı, 3 boyutlu lineer doğrusal (T3D2) sonlu eleman parçaları olarak modellenmiştir (Şekil 4.1.). Donatı ve beton arasında etkileşim kesitler arasında ortak serbestlik derecesi ile hareketi sağlayan gömülü (embedded) özelliği ile tanımlanmıştır.



Şekil 4.1. a) C3D8R b) T3D2

Mesnetler deney koşullarını daha iyi yansıtabilmesi için deney düzeneğindeki konumları dikkate alınarak çizgisel olarak tanımlanmıştır.

ABAQUS programında serbest düşme ile çarpmayı farklı teknikler ile modelleme imkânı vardır. Deney sonuçlarından elde edilen çarpma yükünü zamana bağlı olarak programa tanıtmak bu yollardan biridir. Fakat çarpma yüküne bağlı olmadan tanımlamak da mümkündür. Düşürülen cisim başlangıç düşme yüksekliğinde modellenerek yerçekiminin etkisiyle serbest düşüşe bırakılabilir ya da cisim kiriş yüzeyine çok yakın bir şekilde konumlandırılarak o andaki hızı kütleyle tanımlanabilir.

Dinamik modellerde bulunan çelik çarpma ağırlığı rijit cisim (rigid body) olarak modellenmiş ve cismin orta noktasında belirlenen referans noktasına kütlesi tanımlanmıştır. Rijit cisim, elemanın hareketinin tek bir referans noktası tarafından yönetilmesini sağlamaktadır. Eleman deforme olmadan büyük harekete maruz kalabilir. Rijit cismin hareketi referans noktasına sınır şartı tanımlanarak sağlanmaktadır (ABAQUS). Çarpma kütesinin hareketi, sadece kirişin düzlemine dik doğrultuda hareket edebilecek şekilde sınırlandırılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen çarpma anındaki hız kütleyle tanımlanmış ve kütle analiz başlangıç aşamasında kiriş yüzeyine yakın bir şekilde konumlandırılmıştır. Çarpma ağırlığı ve kiriş arasındaki çarpma teması “general contact interaction” özelliği kullanılarak tanımlanmıştır. Kontak etkileşimi için “hard contact” özelliği ile yüzeylerin birbiri ile tam etkileşimi modellenmiştir.

Statik analizlerde yükleme deney koşullarına uygun şekilde kiriş üst yüzeyinden çizgisel, yerdeğiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır. Mesh yoğunluğunu belirlemek için parametrik çalışma yapılarak, her bir model için optimum mesh boyutları belirlenmiştir. Çözüm yöntemi olarak dinamik analizlerde “Explicit” analiz yöntemi, statik analizler için kapalı analiz yöntemlerinden biri olan “Static, General” çözüm yöntemi kullanılmıştır.

## 4.2. Malzeme Modelleri

Bölüm 3’te verilen ilkelere dayanarak, beton malzemenin mekanik davranışını tanımlamak için kullanılan malzeme modelleri aşağıda yer almaktadır.

### 4.2.1. Beton basınç modeli

Betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme davranışı normal ve yüksek dayanımlı betonlar için ampirik denklemlerle tanımlanmıştır (Lu ve Zhao, 2010). Singh ve arkadaşları (2017), önerilen ampirik denklemi geliştirerek UYPLB’nin tek eksenli basınç gerilme-şekil değiştirme davranışını tanımlamıştır. Singh ve arkadaşları tarafından önerilen formül (Denklem 4.1-4.6) tam ölçekli kirişin sonlu eleman analizi yönteminde basınç davranışını modellemek için kullanılmıştır.

$$\sigma_c = f'_c \left[ \frac{(E_0/E_{sc})(\varepsilon/\varepsilon_0) - (\varepsilon/\varepsilon_0)^2}{1 + (E_0/E_{sc} - 2)(\varepsilon/\varepsilon_0)} \right] \quad (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0) \quad (4.1)$$

$$\sigma_c = \frac{f'_c}{1 + 1/4 \left[ \frac{(\varepsilon/\varepsilon_0) - 1}{(\varepsilon_L/\varepsilon_0) - 1} \right]^{1.5}} \quad (\varepsilon_0 \leq \varepsilon) \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_0 \left[ \left( \frac{1.25 E_0}{10 E_{sc}} + \frac{4}{5} \right) + \sqrt{\left( \frac{1.25 E_0}{10 E_{sc}} + \frac{4}{5} \right)^2 - \frac{4}{5}} \right] \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_0 = 750 (f'_c)^{0.35} \times 10^{-6} \quad (4.4)$$

$$E_0 = 15050 (f'_c / 10)^{1/3} \quad (4.5)$$

$$E_{sc} = f'_c / \varepsilon_0 \quad (4.6)$$

Burada;  $f'_c$  betonun tek eksenli basınç dayanımını,  $\varepsilon_0$   $f'_c$  değerine karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi,  $E_0$  başlangıç elastik modülünü,  $E_{sc}$   $f'_c$  değerine karşılık gelen sekant modülünü,  $\varepsilon_L$  limit birim şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

#### 4.2.2. Beton çekme modeli

Betonun çekme gerilmesi altındaki davranışı, gerilme-birim şekil değiştirme ya da gerilme-çatlak genişliği olarak tanımlanabilmektedir.

Gerilme-birim şekil değiştirme davranışını tanımlamak için deneysel çalışma sonuçlarından elde edilen çekme deneyi sonuçları AFGC (2013) tarafından önerilen formüller (Denklem 4.7-4.9) ile dönüştürülerek çekme rijitliğini modellemek için kullanılmıştır.

$$f_{0.3} = \frac{f(w_{0.3})}{K\gamma_{bf}} \quad (4.7)$$

$$f_{1\%} = \frac{f(w_{1\%})}{K\gamma_{bf}} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{0.3} = \frac{w_{0.3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf}E_c} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf}E_c} \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c} \quad (4.11)$$

$\varepsilon_{0.3}$  çatlak genişliğinin 0.3 mm olduğu ( $w_{0.3}$ ) birim şekil değiştirme,  $\varepsilon_{1\%}$  kırıç yüksekliğinin %1'i kadar çatlak genişliği ( $w_{1\%}$ ) olduğu birim şekil değiştirme değerini,  $f_{0.3}$  ve  $f_{1\%}$  değerleri  $w_{0.3}$  ve  $w_{1\%}$  değerlerine karşılık gelen gerilmeleri ifade

etmektedir.  $l_c$  karakteristik uzunluktur ve kiriş yüksekliğinin 2/3'ü olarak ifade edilmektedir.  $l_f$  lif uzunluğu,  $K$  lif yönelim katsayısı,  $\gamma_{bf}$  kısmi güvenlik faktörü,  $E_c$  beton elastisite modülünü ifade etmektedir.

$K$ , betonun yerleşmesinden dolayı lif dağılımında oluşan bozulmayı dikkate almak için kullanılan bir katsayıdır ve uygunluk testleri ile belirlenmektedir. Bu katsayı genel olarak 1'den büyük değerler almaktadır. 1'den küçük olması belirtilen yönde lif yöneliminin pozitif etkisi olduğunu göstermektedir.  $K$  katsayısı için lokal etkiler dışındaki tüm yükleme durumları için AFGC (2013) tarafından 1.25 değeri önerilmektedir.

### **4.3. Deneylerin Doğrulanması ve Sonuçlar**

#### **4.3.1. Çarpma etkisi altındaki UYPL betonarme kirişler**

Bu tez çalışması kapsamında, çarpma etkisine maruz kalan kirişlerin sonlu eleman modelini oluşturmak için literatürden seçilen (Yoo ve ark. 2017b, Yoo ve ark. 2015a) deneysel çalışmalar dikkate alınmıştır.

Yoo ve arkadaşları (2017b) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada UYPLB ile üretilen farklı lif içeriklerine sahip kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Deney numunelerinin enkesit boyutları 150 x 220 mm ve uzunlukları 2500 mm dir (Şekil 4.2.). Çekme bölgesinde D16 (15.9mm) ve basınç bölgesinde D10 (9.53mm) çapında boyuna donatılar kullanılmıştır. Etriyeler D10 (9.53mm) çapında 80 mm aralıklar ile yerleştirilmiştir. Kirişin üretiminde kullanılan UYPLB için tek eksenli basınç deneyinden elde edilen değerler Tablo 4.1.'de verilmektedir. Donatı elemanlarının, deney sonuçlarından elde edilen mekanik özellikleri Tablo 4.2.'de verilmektedir.

Çarpma testleri, deney numunelerinin orta noktalarına 0.90 ve 1.15 m yükseklikten 510 kg'lık kütlelerin serbest düşürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme için



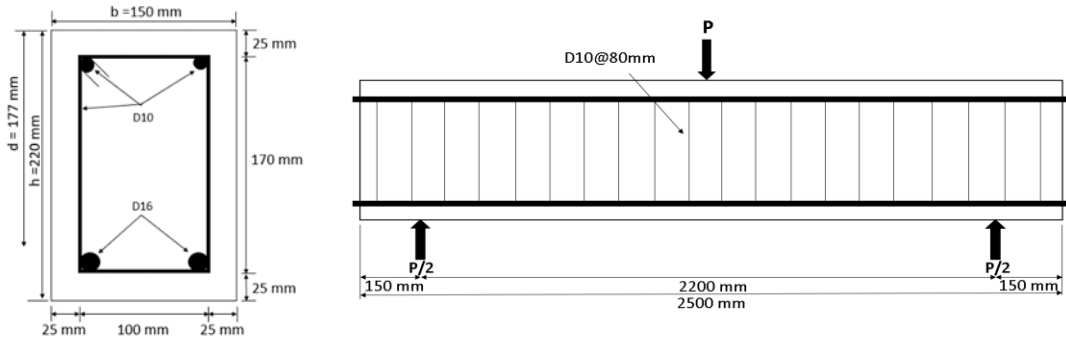
narınlik oranı (aspect ratio) 65 olan, 13 mm uzunluklu düz (smooth) çelik lif kullanılarak üretilen UH-S13 isimli deney numunesi seçilmiştir.

Tablo 4.1. Beton basınç deneyi sonuçları ( Yoo ve ark., 2017b)

İsim	Basınç Dayanımı (MPa)	$\epsilon_0$	$E_0$ (MPa)
UH-S13	211.8	0.00453	46732.5

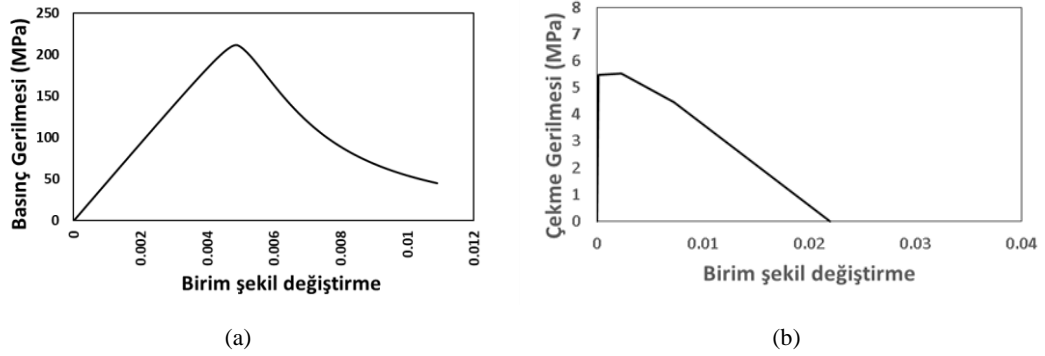
Tablo 4.2. Donatı mekanik özellikleri ( Yoo ve ark., 2017b)

İsim	Çap(mm)	Elastisite Modülü (GPa)	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$	$f_u$ (Mpa)	$\epsilon_u$
Boyuna donatı	D16	15.90	200	0.0026	626	0.19
Etriye	D10	9.53	200	0.0025	609	0.20

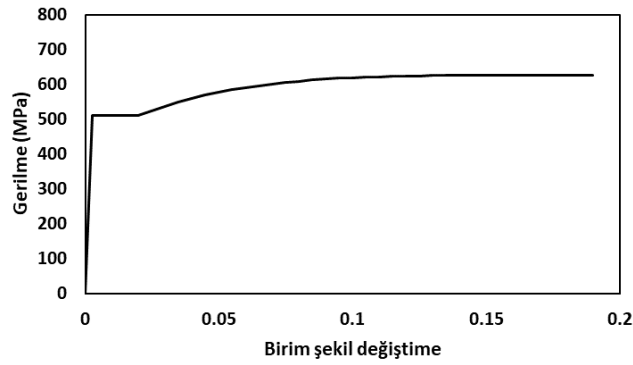


Şekil 4.2. UH-S13 kirişi enkesit ve donatı detayı ( Yoo ve ark., 2017b)

Tablo 4.1.'de verilen deneysel veriler kullanılarak oluşturulan beton basınç davranışı Şekil 4.3.a'da, deneysel çalışmada yer alan AFGC (2013) tarafından önerilen formüller ile oluşturulan beton gerilme-birim şekil değiştirme davranışı Şekil 4.3.b'de ve donatı davranışı Şekil 4.4.'te verilmektedir. Deneysel çalışmada, malzeme testlerinde yükleme hızı verileri bulunmadığı için modellemede yükleme hızının etkisi hesaba katılmadan oluşturulan malzeme modelleri kullanılmıştır. Beton Hasar Plastisite modelini oluşturmak için gerekli parametreler Tablo 4.3.'te verilmektedir.

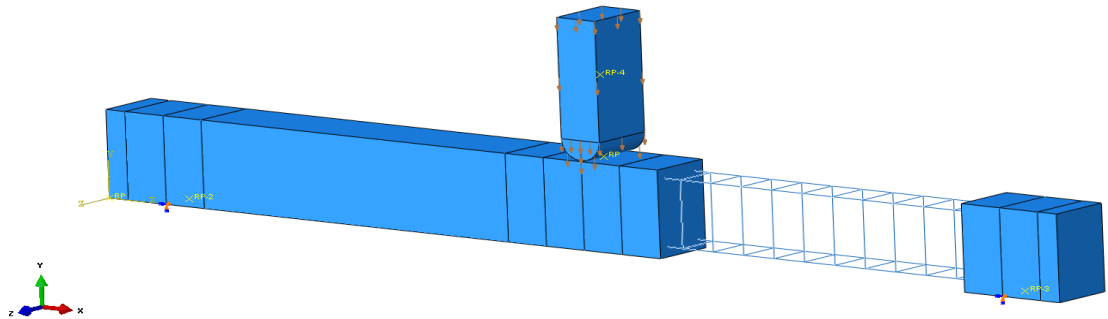


Şekil 4.3. Beton basınç (a) ve çekme (b) davranışı



Şekil 4.4. Boyuna donatı gerilme- şekil değiştirme diyagramı (D16)

Mesnetler deney verilerine göre X yönündeki hareketleri ve Z yönündeki dönmeleri serbest olacak şekilde çizgisel olarak modellenmiştir. Çarpma kütlesi kiriş yüzeyine çok yakın olacak şekilde konumlandırılmış ve ilk modelde 4.20 m/s ikinci modelde 4.75 m/s hız tanımlanmıştır (Şekil 4.5.). Sonlu eleman modelinde yapılan parametrik çalışma ile en-boy oranı 1 olacak şekilde optimum mesh boyutunun 25 mm olduğu görülmüştür.

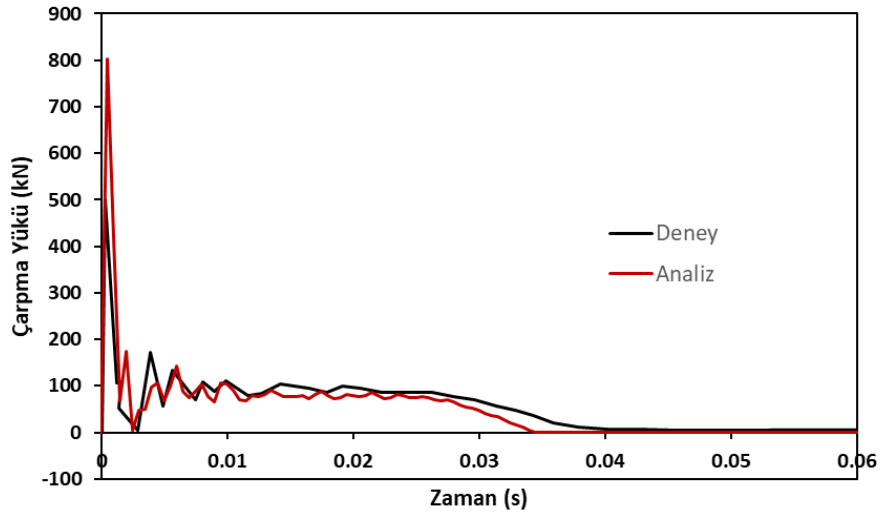


Şekil 4.5. UH-S13 numunesi sonlu eleman modeli

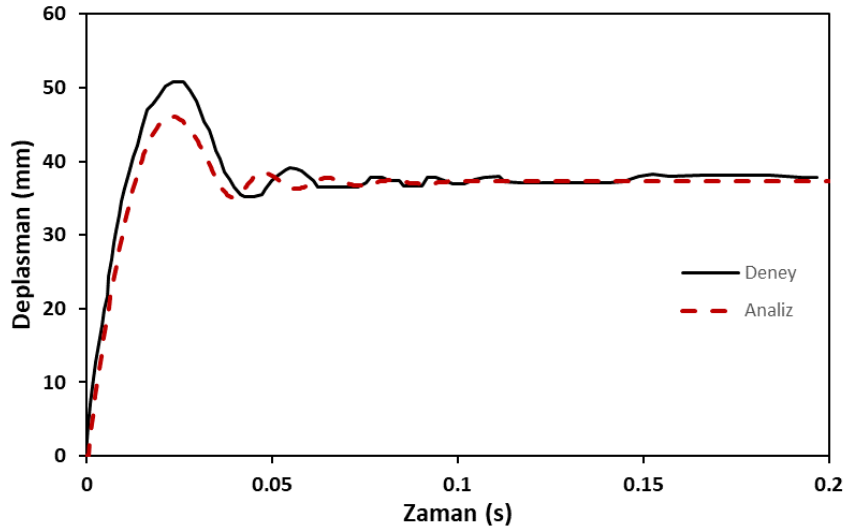
Tablo 4.3. BHP modeli temel parametreleri

Parametre	Değer
Dilasyon açısı ( $\psi$ )	10
$\sigma_{bo}/\sigma_{co}$	1.05
Eksantrisite parametresi ( $\epsilon$ )	0.1
$K_c$	2/3
Viskozite parametresi ( $\mu$ )	0.0001

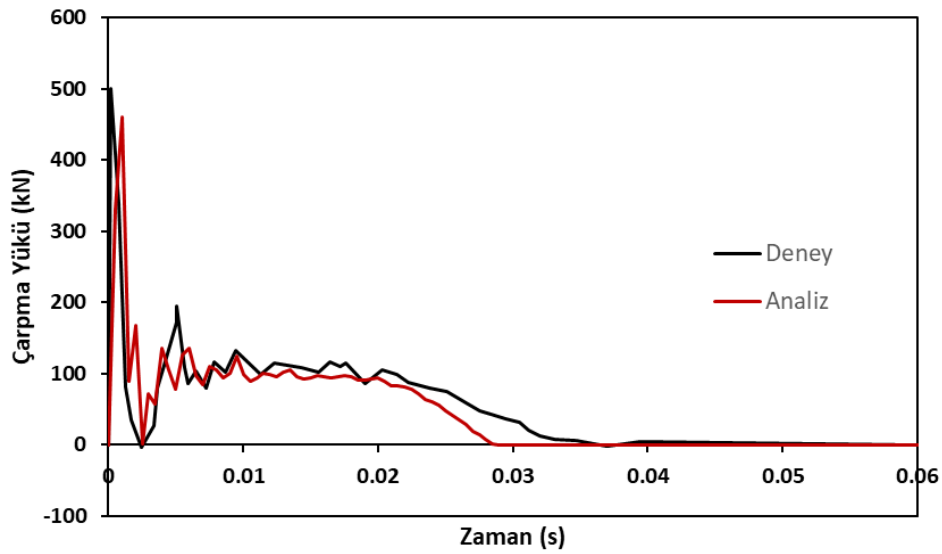
Deney ve analiz sonuçlarından elde edilen çarpma yükleri Şekil 4.6. ve 4.8.'de ve deplasman değerleri Şekil 4.7. ve 4.9.'da verilmiştir.



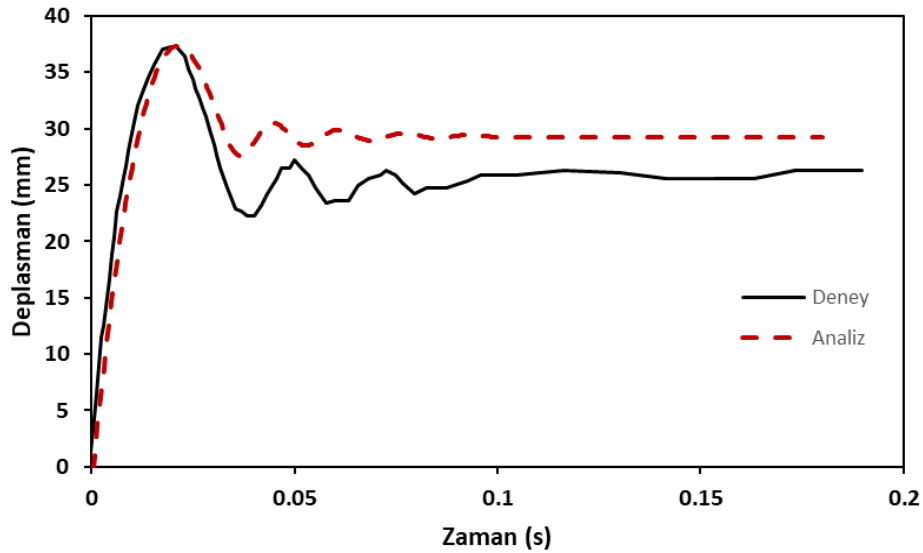
Şekil 4.6. UH-S13 kirişi Çarpma yükü-Zaman grafiği (V=4.75 m/s)



Şekil 4.7. UH-S13 kirişi Deplasman-Zaman grafiği (V=4.75 m/s)



Şekil 4.8. UH-S13 kirişi Çarpma yükü-Zaman grafiği (V=4.20 m/s)



Şekil 4.9. UH-S13 kirişi Deplasman-Zaman grafiği (V=4.20 m/s)

Tablo 4.4. Deney sonuçları ile sonlu eleman modeli sonuçlarının karşılaştırılması

Düşme yüksekliği (m)		Kinetik Enerji (kJ)		Hız (m/s)		Çarpma Kuvveti (kN)		Maksimum deformasyon (mm)		Kalıcı deformasyon (mm)	
Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz
0.90	-	4.50	4.50	4.20	4.20	498	459	37.3	37.3	25.6	29.3
1.15	-	5.75	5.75	4.75	4.75	496	801	51.0	46.1	37	37.1

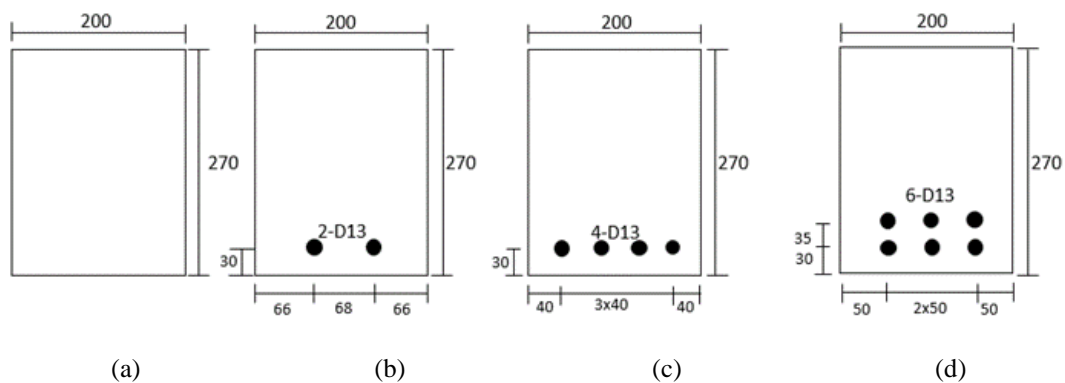
Analizlerden elde edilen çarpma yükü-zaman grafikleri incelendiğinde, hareketin sönümlenme davranışının deneyler ile oldukça benzer davranış sergilediği ve sönümlenme sürelerinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. 4.75 m/s hız değerinde, deneysel verilerde reaksiyon kuvvetleri 647 kN iken çarpma kuvveti değeri

496 kN olarak raporlanmıştır. Deney verilerinden elde edilen bu sonuç, daha önce yapılan çalışmalarda ifade edilen Denklem 2.6 eşitliğini sağlamamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarından elde edilen çarpma kuvveti değerinin daha gerçekçi sonuçlar verdiği düşünülmektedir.

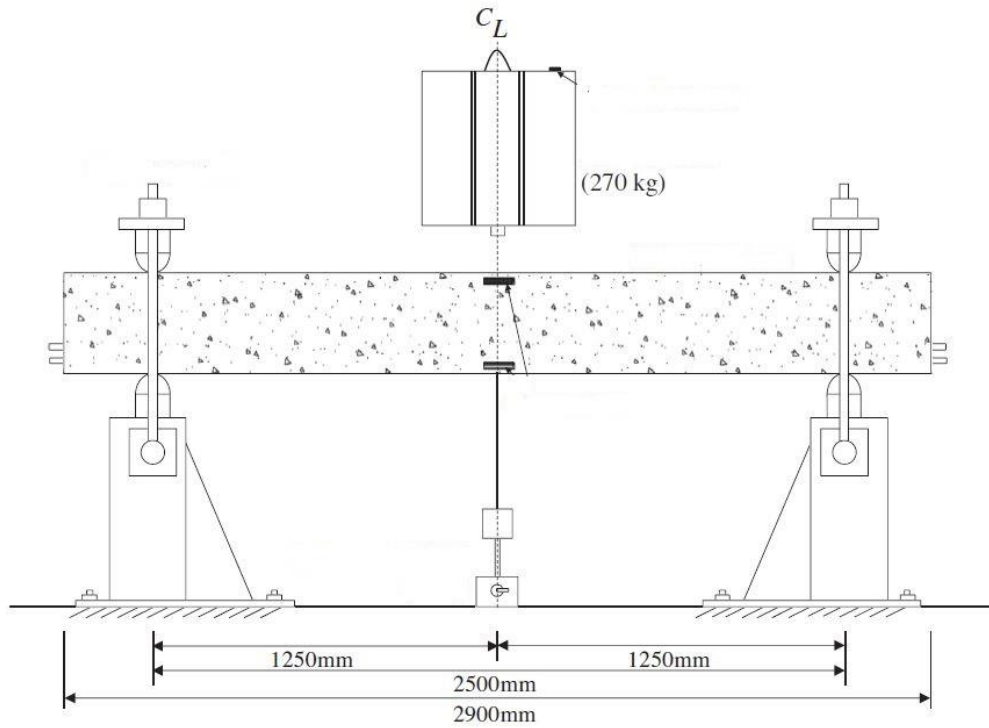
Literatürden seçilen ikinci deneysel çalışma yine Yoo ve arkadaşları (2015a) tarafından yapılmıştır. Çalışmada UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerde donatı oranının, eğilme davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 4 farklı donatı oranına sahip kiriş üzerinde çarpma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri 2900 mm uzunluğunda, 200x290 mm dikdörtgen enkesit boyutlarına sahiptir (Şekil 4.10.). Deneyler tüm numunelere 1.60 m yükseklikten 270 kg ağırlığında kütlelerin serbest düşürülmesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11.). Deney numunelerinde kullanılan beton malzemesinin basınç dayanımı ( $f_c$ ) 152.5 MPa, elastisite modülü (E) 44 GPa olarak verilmiştir. Dinamik yüklemelerde oluşan şekil değiştirme hızı (strain rate) etkisi hesaplanarak elde edilen beton ve donatı mekanik özellikleri Tablo 4.5.'te verilmiş ve modelleme için tablodaki değerler kullanılmıştır.

Tablo 4.5. Yükleme hızı dikkate alınarak elde edilen malzeme dayanımları (Yoo ve ark., 2015a)

İsim	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Donatı Akma Dayanımı (MPa)
UH-N	198.9	17.6	-
UH-0.53%	197.8	17.7	630.2
UH-1.06%	201.3	17.8	635.2
UH-1.71%	199.1	16.3	629.4

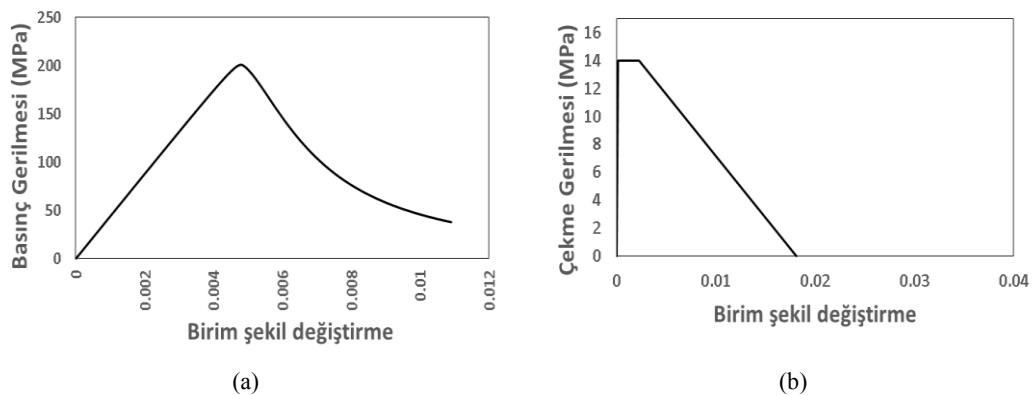


Şekil 4.10. Kesit detayı a) UH-N b) UH-0.53% c) UH-1.06% d) UH-1.71% (Yoo ve ark., 2015a)

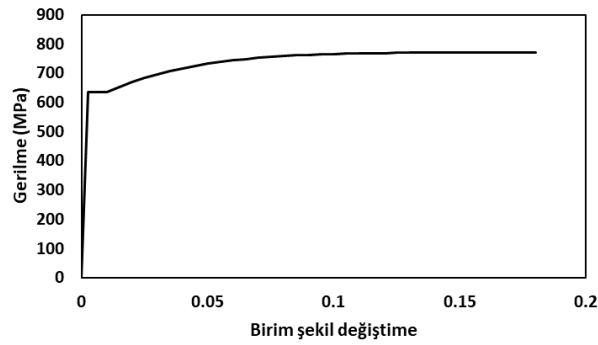


Şekil 4.11. Çarpma deney düzeneği (Yoo ve ark., 2015a)

Deneysel verilerden elde edilen parametreler kullanılarak elde edilen beton ve donatı mekanik davranışı, Şekil 4.12. ve 4.13.'te, Beton Hasar Plastisite modelini oluşturmak için gerekli parametreler Tablo 4.6.'da verilmektedir. Çekme davranışının modellenmesinde K katsayısı 1.25 olarak alınmıştır.



Şekil 4.12. Beton basınç (a) ve çekme (b) davranışı (UH-1.06%)

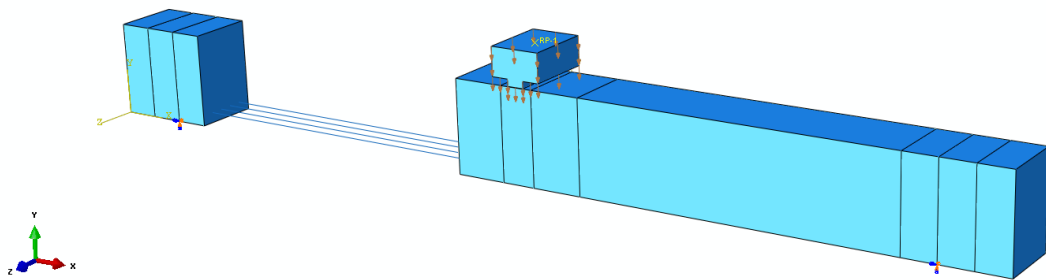


Şekil 4.13. Donatı mekanik davranışı (UH-1.06%)

Tablo 4.6. BHP modeli temel parametreleri

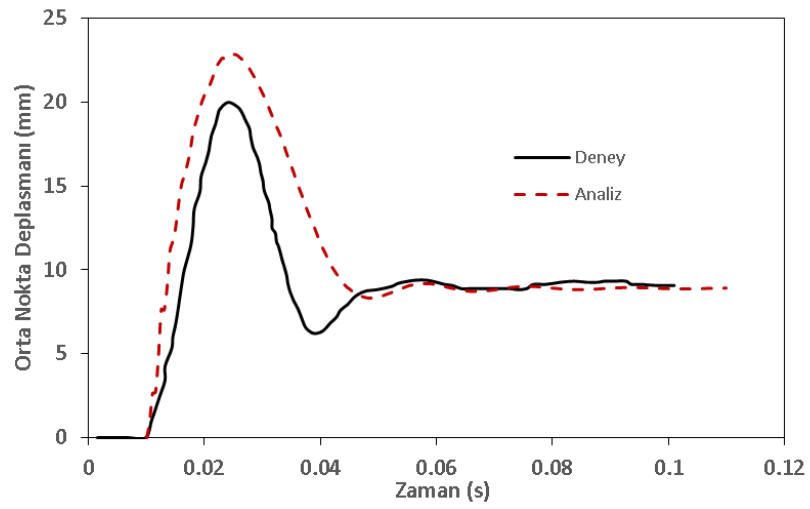
Parametre	Değer
Dilasyon açısı ( $\psi$ )	10
$\sigma_{bo}/\sigma_{co}$	1.05
Eksantrisite parametresi ( $\epsilon$ )	0.1
$K_c$	2/3
Viskozite parametresi ( $\mu$ )	0.0001

Mesnetler deney verilerine göre X yönündeki hareketleri ve Z yönündeki dönmeleri serbest olacak şekilde çizgisel olarak modellenmiştir. Çarpma kütlesi numune yüzeyine yakın bir şekilde konumlandırılarak 5.6 m/s hız tanımlanmıştır (Şekil 4.14.). Yapılan parametrik çalışma ile en-boy oranı 1 olacak şekilde optimum mesh boyutunun 50 mm olduğu görülmüştür.

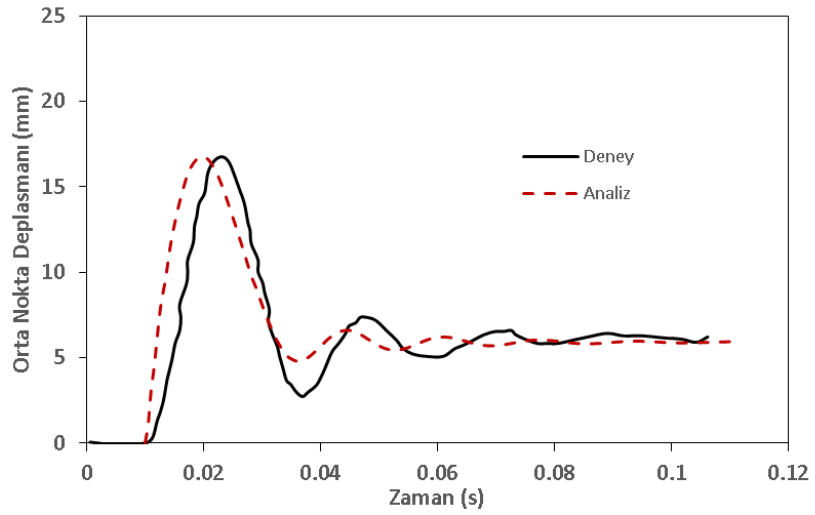


Şekil 4.14. Sonlu eleman modeli (UH-1.06%)

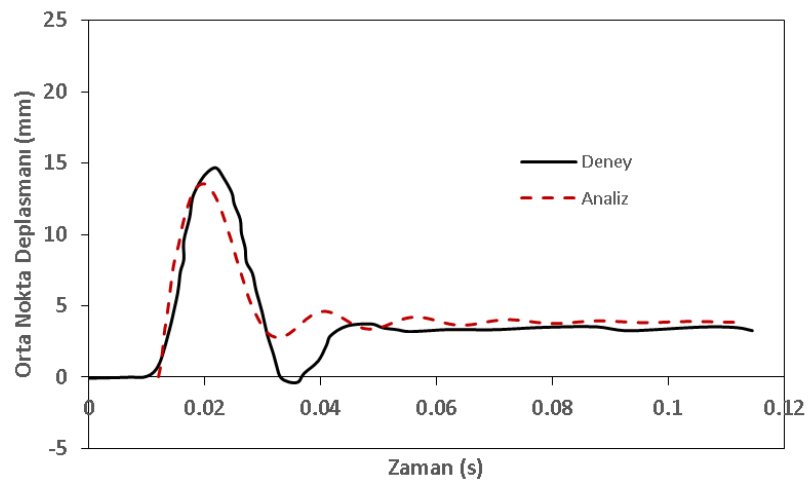
Deney ve sayısal analiz sonuçlarından elde edilen deplasman-zaman grafikleri Şekil 4.15.-4.18.'de ve Tablo 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.15. UH-N numunesi Deplasman-Zaman grafiği

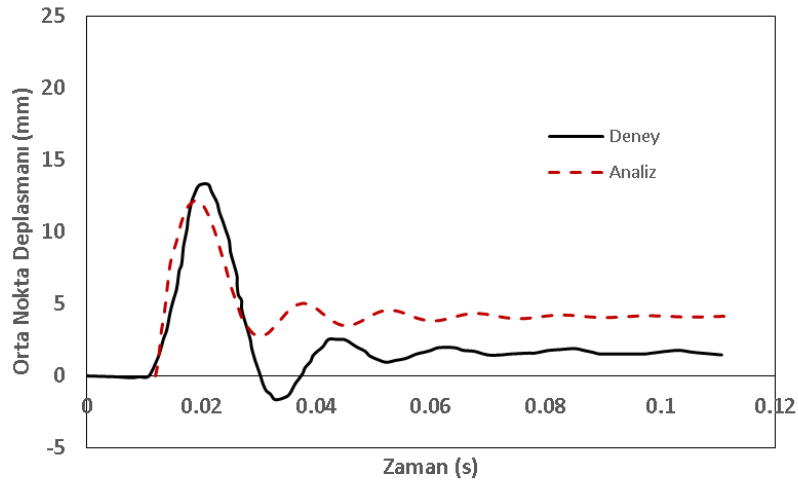


Şekil 4.16. UH-0.53% numunesi Deplasman-Zaman grafiği



Şekil 4.17. UH-1.06% numunesi Deplasman-Zaman grafiği





Şekil 4.18. UH-1.71% numunesi Deplasman-Zaman grafiği

Tablo 4.7. Deneysel sonuçları ile sonlu eleman modeli sonuçlarının karşılaştırılması

Numune	Düşme yüksekliği (m)		Kinetik Enerji (kJ)		Hız (m/s)		Maksimum deformasyon (mm)		Kalıcı deformasyon (mm)	
	Deneysel	Analiz	Deneysel	Analiz	Deneysel	Analiz	Deneysel	Analiz	Deneysel	Analiz
UH-N							19.98	22.82	9.07	8.90
UH-0.53%							16.75	16.75	6.21	5.91
UH-1.06%	1.60	-	4.20	4.20	5.60	5.60	14.67	13.55	3.27	3.83
UH-1.71%							13.32	12.22	1.45	4.15

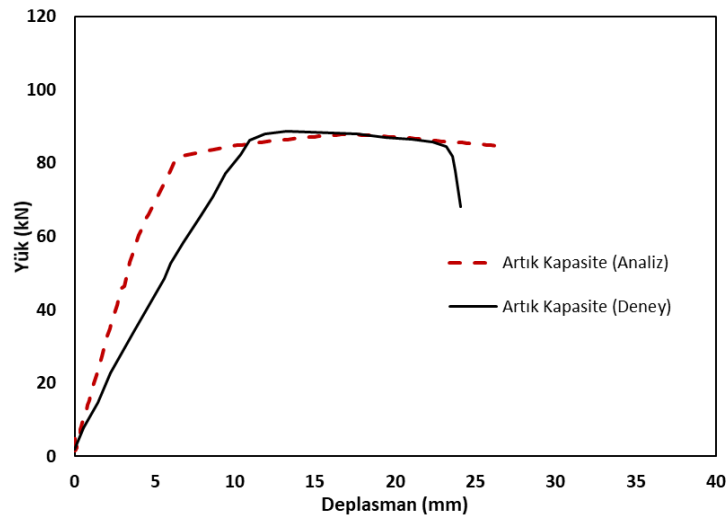
#### 4.3.2. Çarpma etkisine maruz kalmış UYPL betonarme kirişlerin artık yük taşıma kapasitesi

Yoo ve arkadaşları (2017b) önceki bölümde anlatılan dinamik yüklemeye maruz kalmış kirişlerin artık yük taşıma kapasitesini tespit etmiş ve çarpmaya maruz kalmayan kirişler ile çarpma uygulanmış kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve rijitliklerindeki değişimi karşılaştırmışlardır.

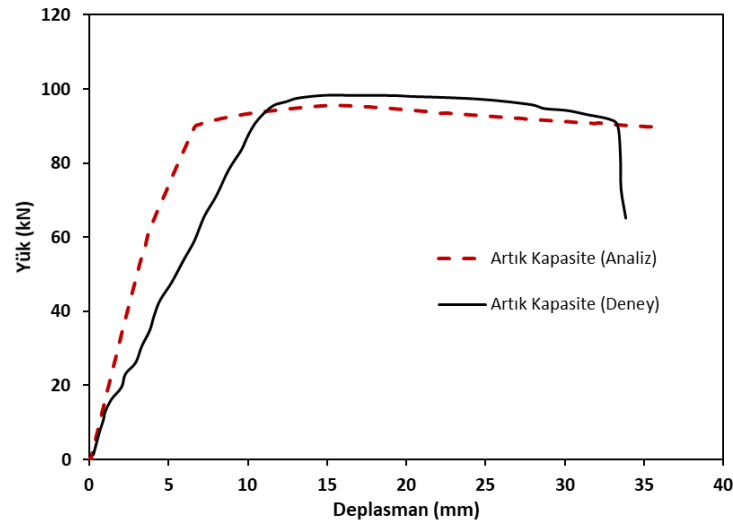
Bu bölümde daha önce dinamik analizi yapılmış olan UH-S13 numunesinin artık yük taşıma kapasitesi bulunarak deneysel sonuç ile karşılaştırması yapılmıştır. Analizde 4.20 m/s ve 4.75 m/s hızda çarpma yüküne maruz kalan kirişin hasar almış hali ABAQUS programının “Restart Analysis” özelliği ile statik yüklemeye tabi tutulmuştur. “Restart Analysis” daha önce analizi yapılmış bir modele yeni bir çözüm adımı (Step) eklenerek analizin hasar almış model üzerinden devam ettirilebilmesini

sağlamaktadır. Dinamik analizi yapılan modelde çözüm yöntemi olarak açık analiz yöntemi kullanıldığı için eklenen çözüm adımı da açık analiz yöntemiyle devam ettirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle eklenen adımda yükleme deneyde verilen konumlarda çizgisel olarak, zamana bağlı yerdeğiştirme kontrollü bir şekilde uygulanmıştır.

Deney ve analiz sonuçları karşılaştırması Şekil 4.19.- 4.20.'de verilmektedir.



Şekil 4.19. UH-S13 kirişi artık yük taşıma kapasitesi (V:4.75 m/s)



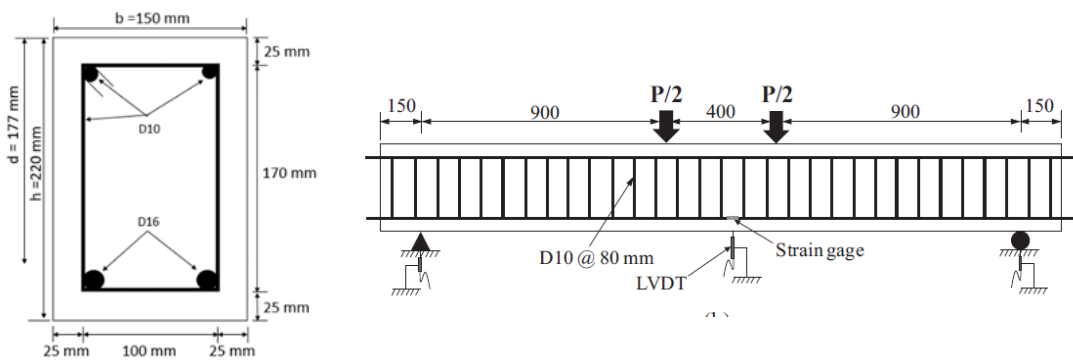
Şekil 4.20. UH-S13 kirişi artık yük taşıma kapasitesi (V:4.20 m/s)

### 4.3.3. Çarpma etkisine maruz kalmamış UYPL betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi

Çarpma etkisinin kirişlerin statik yük taşıma kapasitesini ne derece etkilediğini belirlemek için çarpma etkisi sonrası artık yük taşıma kapasitesinin, çarpma etkisine maruz kalmamış kirişlerin yük taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu bölümde, sadece statik yüklemeye maruz kalan kirişlerin sonlu eleman modeli oluşturularak literatürden seçilen deneysel çalışmalar ile doğrulaması yapılmıştır.

Statik yüklemeye altındaki UYPLB kirişlerin davranışlarını inceleyebilmek için literatürden seçilmiş 2 farklı deney kullanılmıştır (Yoo ve ark., 2015b; Yoo ve ark., 2016).

Yoo ve arkadaşları (2015b) tarafından yapılan deneysel çalışmada farklı lif içeriğine sahip UYPLB kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Deney numunesi daha önce sonlu eleman modeli oluşturulan, Yoo ve arkadaşları (2017b) tarafından gerçekleştirilen deneydeki UH-S13 numunesi ile aynı özelliklere sahiptir. Çalışmada deney numunesine 4 nokta yüklemesi monotonik olarak uygulanmış (Şekil 4.21.) ve yük, deplasman, şekil değiştirme değerleri kaydedilmiştir.



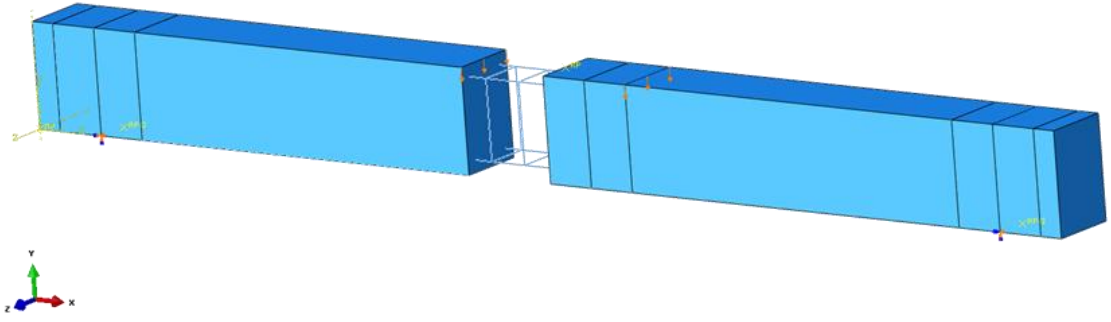
Şekil 4.21. UH-S13 kirişi enkesit ve donatı detayı

Deneysel verilerden elde edilen parametreler kullanılarak elde edilen beton ve donatı mekanik davranışı, Şekil 4.3.'te, Beton Hasar Plastisite modelini oluşturmak için gerekli parametreler Tablo 4.8.'de verilmektedir.

Tablo 4.8. BHP modeli temel parametreleri

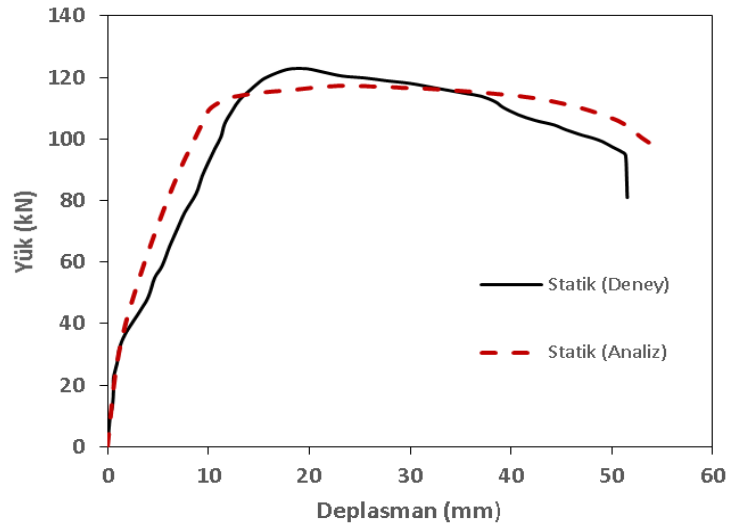
Parametre	Değer
Dilasyon açısı ( $\psi$ )	10
$\sigma_{bo}/\sigma_{co}$	1.05
Eksantrisite parametresi ( $\epsilon$ )	0.1
$K_c$	2/3
Viskozite parametresi ( $\mu$ )	0.0001

Mesnetler deney koşullarına uygun olarak çizgisel ve sol mesnet sabit, sağ mesnet hareketli olacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 4.22.). Yapılan parametrik çalışma ile en-boy oranı 1 olacak şekilde optimum mesh boyutunun 25 mm olduğu görülmüştür.



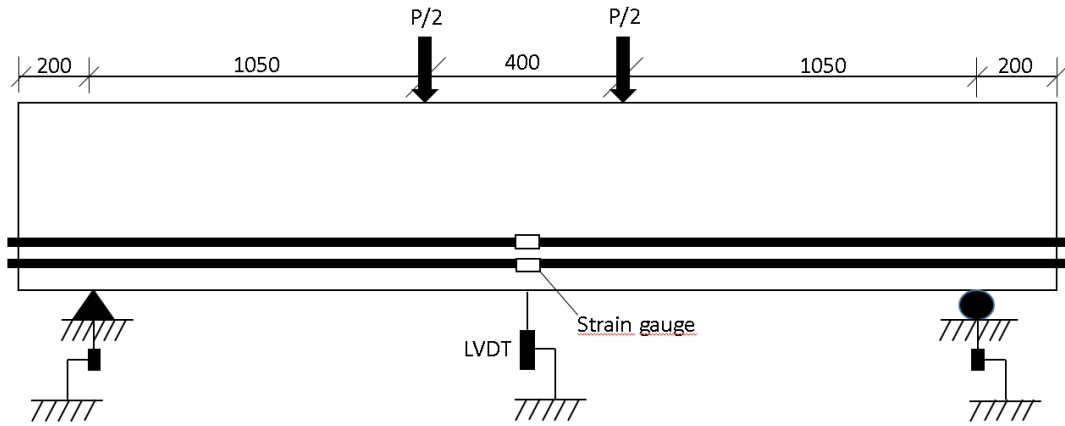
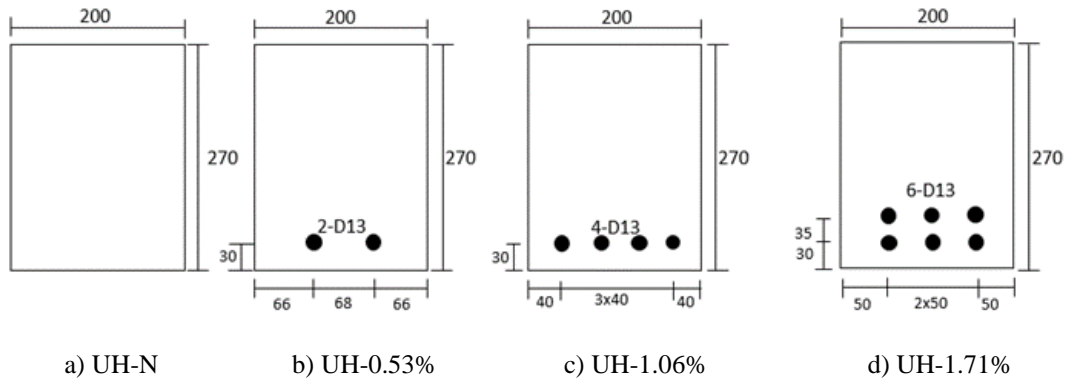
Şekil 4.22. UH-S13 numunesi sonlu eleman modeli

Deney sonucundan elde edilen yük-deplasman değerleri ile analiz sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.23.'te verilmiştir.



Şekil 4.23. UH-S13 kirişi Yük-Deplasman grafiği

Yoo ve arkadaşları (2016) tarafından yapılan diğer bir deneysel çalışmada farklı boyuna donatı oranlarına sahip 4 adet UYPLB kirişin eğilme davranışı incelenmiştir. Deneysel numune boyutları ve betonun özellikleri sabit tutulup donatı oranındaki değişimin davranışa etkisi incelenmiştir. Deneysel numunelerinin boyutları 200x270 mm uzunlukları 2900 mm'dir (Şekil 4.24.). Donatı özellikleri Tablo 4.8.'de verilmiştir. Beton basınç dayanımı 196.7 MPa maksimum yüke karşılık gelen birim şekil değiştirme  $4.4 \times 10^{-3}$ , elastisite modülü 47.8 GPa'dır.



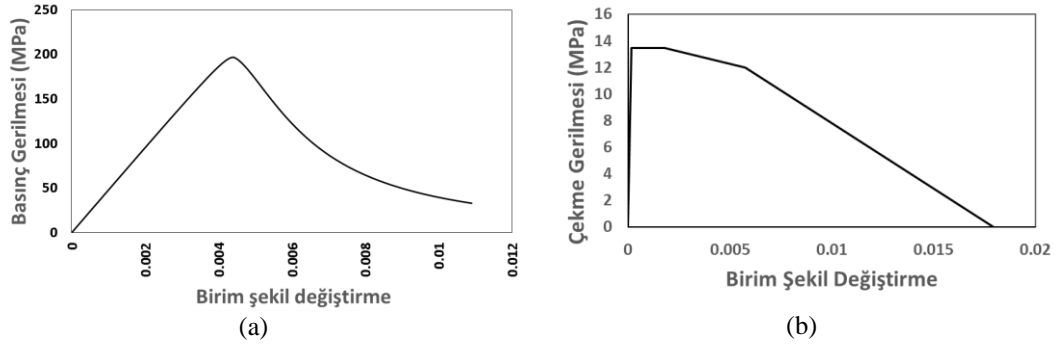
Şekil 4.24. Enkesit ve donatı detayı (Yoo ve ark., 2016)

Tablo 4.9. Donatı mekanik özellikleri (Yoo ve ark., 2016)

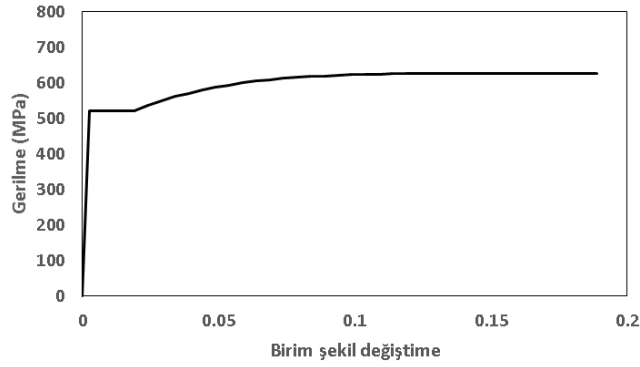
	Çap(mm)	Elastisite Modülü (GPa)	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$	$f_u$ (Mpa)	$\epsilon_u$
<b>Boyuna donatı</b>	12.70	200	522.7	0.0026	627.6	0.164

Deneysel verilerden elde edilen parametreler kullanılarak elde edilen beton basınç ve çekme davranışı Şekil 4.25.'te ve donatı mekanik davranışı Şekil 4.26.'da

verilmektedir. Beton Hasar Plastisite modelini oluşturmak için gerekli parametreler Tablo 4.9.'da verilmektedir.



Şekil 4.25. Beton basınç (a) ve çekme (b) davranışı

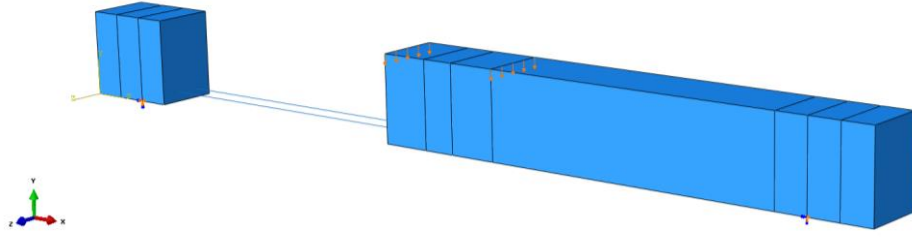


Şekil 4.26. Donatı mekanik davranışı

Tablo 4.10. BHP modeli temel parametreleri

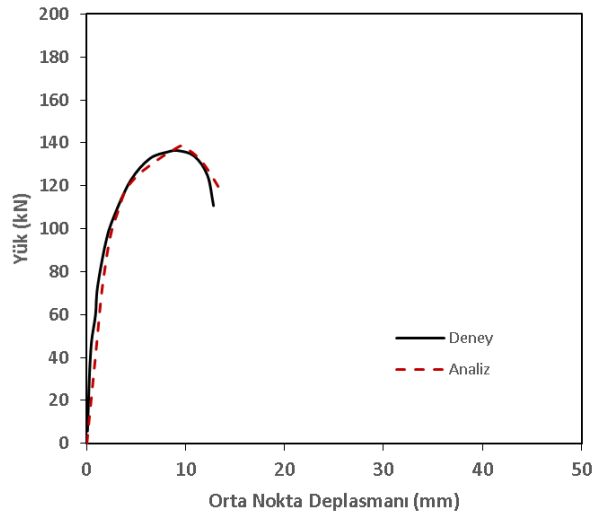
Parametre	Değer
Dilasyon açısı ( $\psi$ )	50
$\sigma_{bo}/\sigma_{co}$	1.05
Eksantrisite parametresi ( $\epsilon$ )	0.1
$K_c$	2/3
Viskozite parametresi ( $\mu$ )	0.00005

Mesnetler deney koşullarını daha iyi yansıtması için çizgisel olarak sol mesnet sabit, sağ mesnet hareketli olacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 4.27.). Yapılan parametrik çalışma ile en-boy oranı 1 olacak şekilde optimum mesh boyutunun 50 mm olduğu görülmüştür.

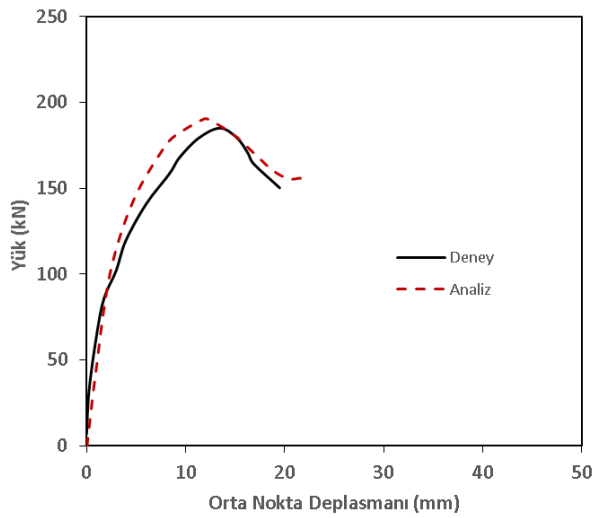


Şekil 4.27. UH-0.53% numunesi sonlu eleman modeli

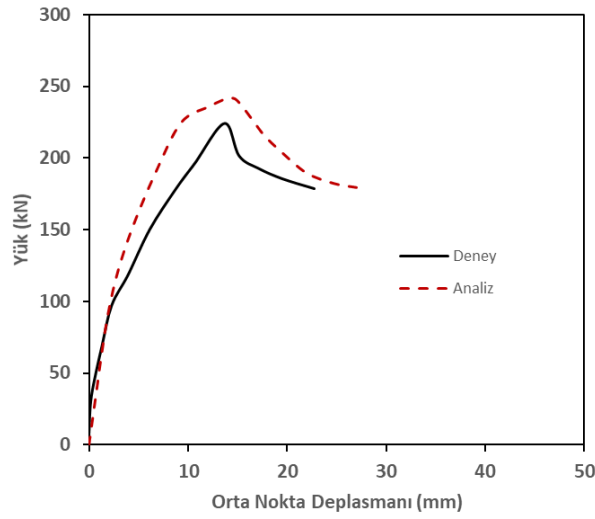
Deney sonucundan elde edilen yük-deplasman değerleri ile analiz sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.28.-4.31.'de verilmiştir.



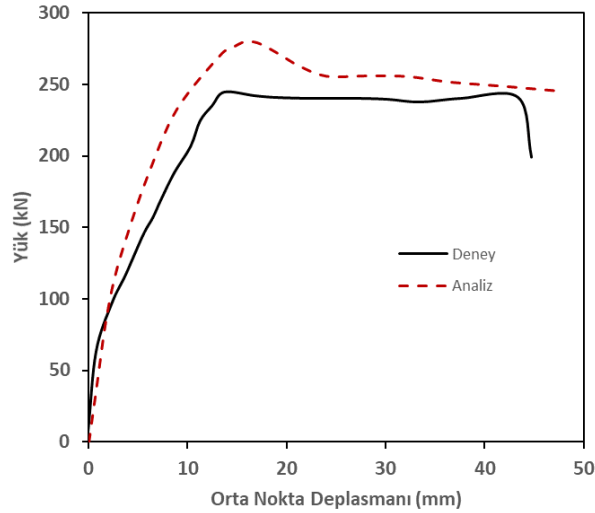
Şekil 4.28. UH-N numunesi Yük-Deplasman grafiği



Şekil 4.29. UH-0.53% numunesi Yük-Deplasman grafiği



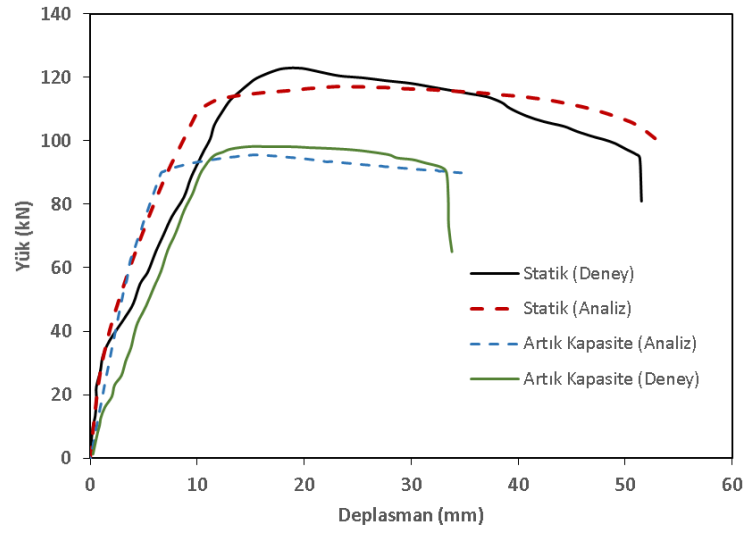
Şekil 4.30. UH-1.06% numunesi Yük-Deplasman grafiği



Şekil 4.31. UH-1.71% numunesi Yük-Deplasman grafiği

Şekil 4.32., UH-S13 numunesinin statik yük taşıma kapasitesi ile 4.20 m/s hız ile çarpmaya maruz kalan kirişin artık yük taşıma kapasitesi arasındaki değişimi göstermektedir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde artık kapasite ile statik yük taşıma kapasitesi arasında numunenin rijitliğinde azalma oluşmadığı gözlemlenmektedir. Sonlu eleman analizlerinde de bu durumun geçerli olduğu Şekil 4.32.'de görülmektedir. Nümerik modellerin deneylere göre daha rijit davranış sergilemiş olması beklenen bir durum olup ideal şartlarda oluşturulan sonlu eleman modelleri ile laboratuvar şartlarında yapılan deneysel çalışmaların farkından kaynaklanmaktadır.





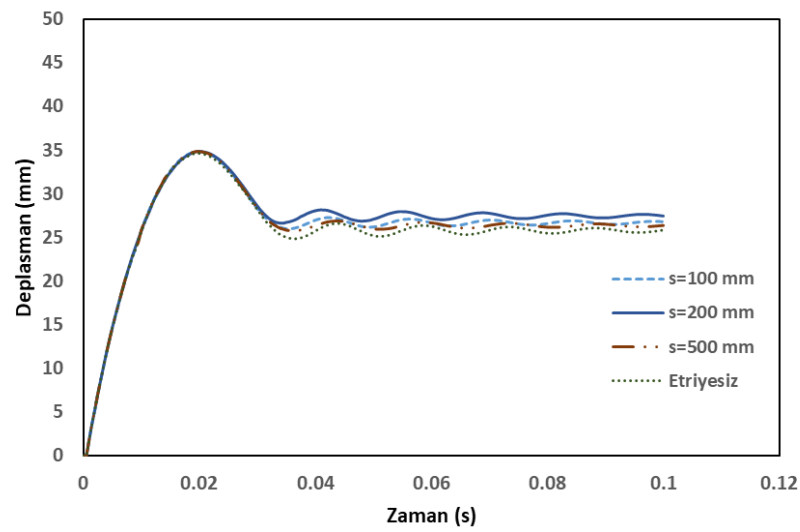
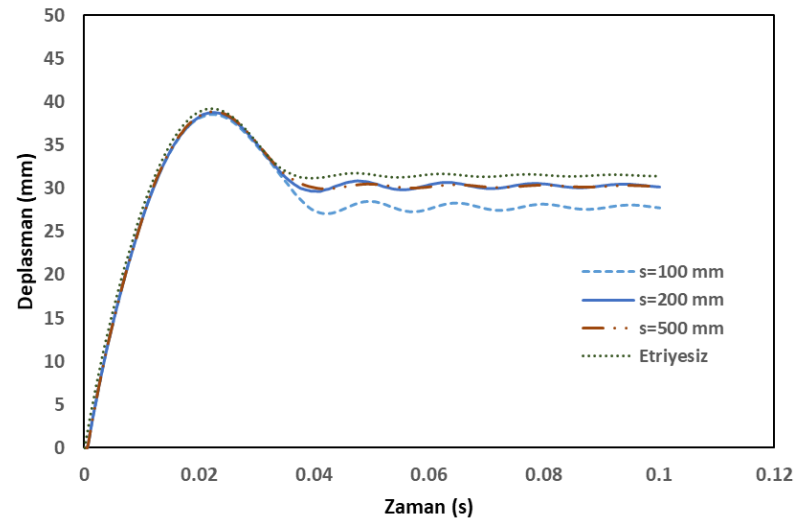
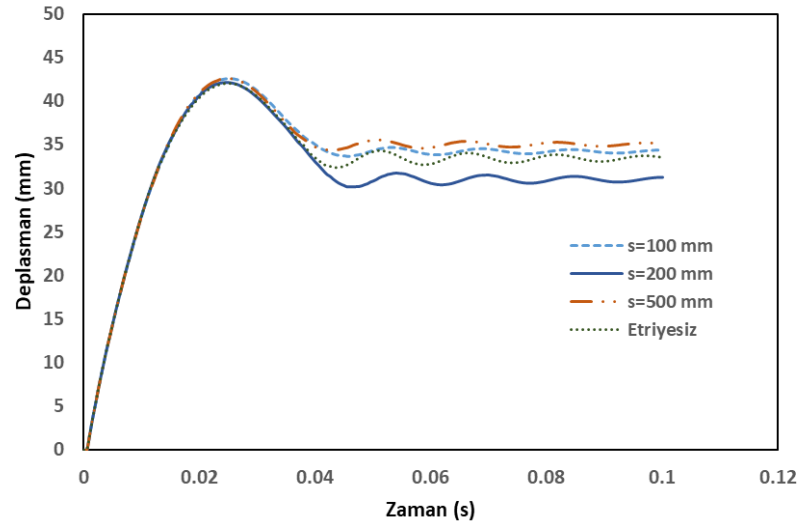
Şekil 4.32. Statik ve artık kapasite sonuçlarının karşılaştırması

Statik ve dinamik analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde sonlu eleman modellerinin UYPLB ile üretilen kirişin davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebildiği görülmektedir.

## BÖLÜM 5. PARAMETRİK ÇALIŞMA

UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarının sayısal olarak incelendiği bu çalışmada doğrulanan sonlu eleman modelleri ile parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışma için önceki bölümde doğrulaması yapılan UH-S13 sonlu eleman modeli seçilmiş ve parametrik çalışma iki aşama halinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında etriye adım mesafesi değişiminin davranışa etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla modeldeki diğer tüm değişkenler sabit tutularak  $V=4.20$  m/s hız değeri ile, etriye adım mesafeleri  $s=100\text{mm}$ ,  $s=200\text{mm}$ ,  $s=500\text{mm}$  ve  $s=1000\text{mm}$  (etriyesiz) ve boyuna donatı akma dayanımı  $f_{yk}=420\text{MPa}$ ,  $f_{yk}=510\text{MPa}$  ve  $f_{yk}=630\text{MPa}$  olan sonlu eleman modellerinin çarpma etkisi altındaki analizleri yapılmış ve Şekil 5.1’de sunulmuştur.

Gerçekleştirilen sonlu eleman modeli analizleri sonucunda Şekil 5.1.’deki sonuçlardan da görüldüğü gibi etriye adım mesafesi değişiminin, tek seferlik çarpma etkisine maruz kalan UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı bu kirişlerin yaklaşık olarak benzer davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Çarpma etkisi altında UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin orta noktasının yaptığı maksimum yerdeğiştirmelerde belirgin bir fark oluşmamakla birlikte kalıcı yerdeğiştirmelerde göreceli olarak farklılık oluşmaktadır. Fakat, etriye adım mesafesinin  $s=100\text{mm}$  ve  $s=500\text{mm}$  değerlerinde olduğu ve ayrıca kirişin etriyesiz ( $s=1000\text{mm}$ ) olması halinde bile davranışının yaklaşık olarak aynı olduğu gözlemlenmektedir. Daha önce Saatci (2007) tarafından yapılan çalışmada da, farklı etriye oranlarına sahip betonarme kirişlerin tek sefer çarpma yüküne maruz kalması ile elde edilen davranışın incelenmesi sonucunda maksimum ve kalıcı deplasman değerlerinde belirgin farklar oluşmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla parametrik çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ile literatürdeki bu çalışma uyumludur.



Şekil 5.1. UYPLB ile üretilen betonarme kirişin davranışına etriye adım mesafesinin etkisi

Kiriş davranışına etkisi çok düşük düzeylerde kaldığı için etriye adım mesafesi (s) değişimi parametrik çalışma kapsamında çıkarılmış ve parametrik çalışmanın ikinci aşamasında s=100mm olarak sabit tutulmuştur. İkinci aşamadaki parametrik çalışmada, dinamik davranışa boyuna donatı dayanımının ve enerji seviyesi değişiminin etkisini incelemek amacıyla dayanımları farklı boyuna donatılı kirişlerin farklı çarpma hızları etkisi altında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. 510 kg'lık kütle, çarpma hızı ve kinetik enerji seviyeleri, belirlenen 3 farklı çarpma yüksekliği dikkate alınarak Denklem 5.1 ile hesaplanmış ve Tablo 5.1.'de sunulmuştur.

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (5.1)$$

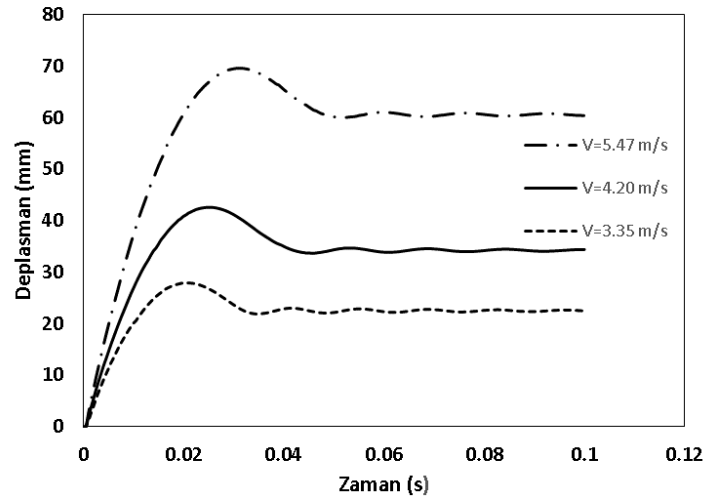
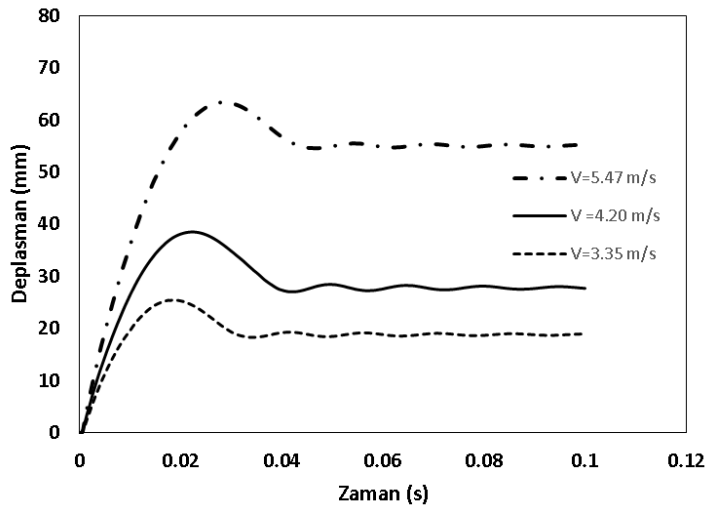
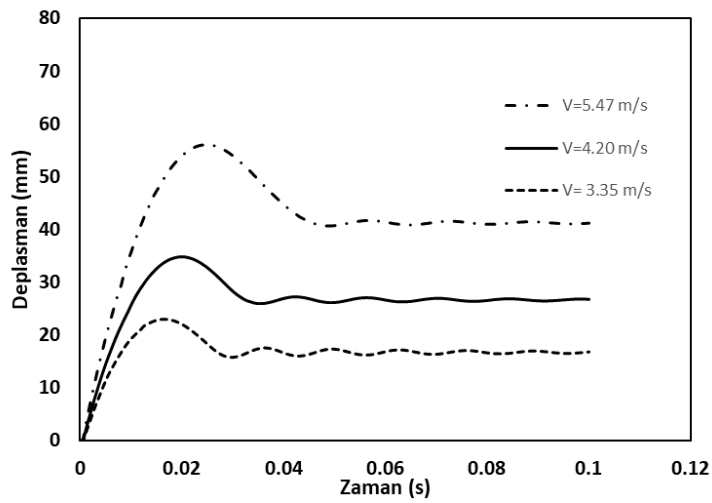
Tablo 5.1. Parametrik çalışma için belirlenen değerler

Düşme yüksekliği (m)	Hız (m/s)	Kinetik enerji (kJ)
0.57	3.35	2.85
0.90	4.20	4.49
1.52	5.47	7.60

Tablo 5.2.'de görüldüğü gibi, çalışmada boyuna donatı dayanımları  $f_{yk} = 420\text{MPa}$ ,  $f_{yk} = 510\text{MPa}$  ve  $f_{yk} = 630\text{MPa}$  olan UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin  $v = 3.35\text{m/s}$ ,  $v = 4.20\text{m/s}$  ve  $v = 5.47\text{m/s}$  çarpma hızları etkisi altında dinamik davranışları incelenmiştir.

Tablo 5.2. Analizi yapılan parametre değerleri

	$f_{yk}$ (MPa)	$v$ (m/s)
Model 1		3.35
Model 2	420	4.20
Model 3		5.47
Model 4		3.35
Model 5	510	4.20
Model 6		5.47
Model 7		3.35
Model 8	630	4.20
Model 9		5.47

a)  $f_{yk} = 420 MPa$ b)  $f_{yk} = 510 MPa$ c)  $f_{yk} = 630 MPa$ 

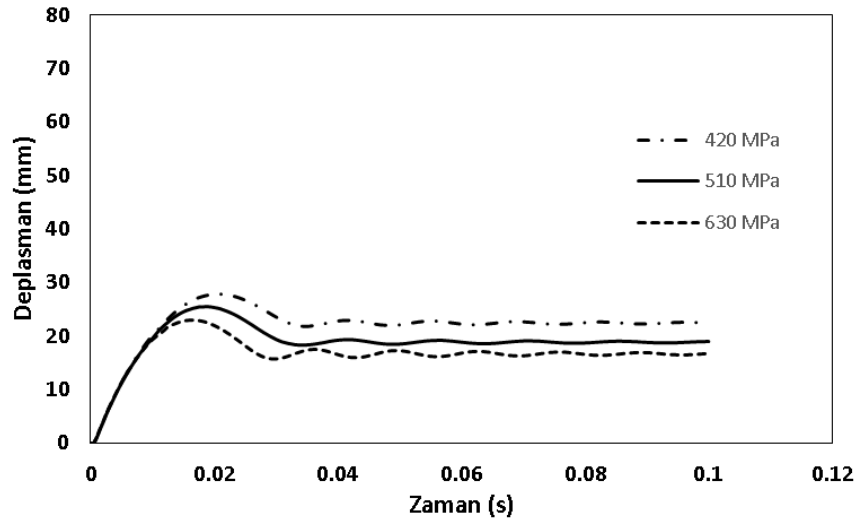
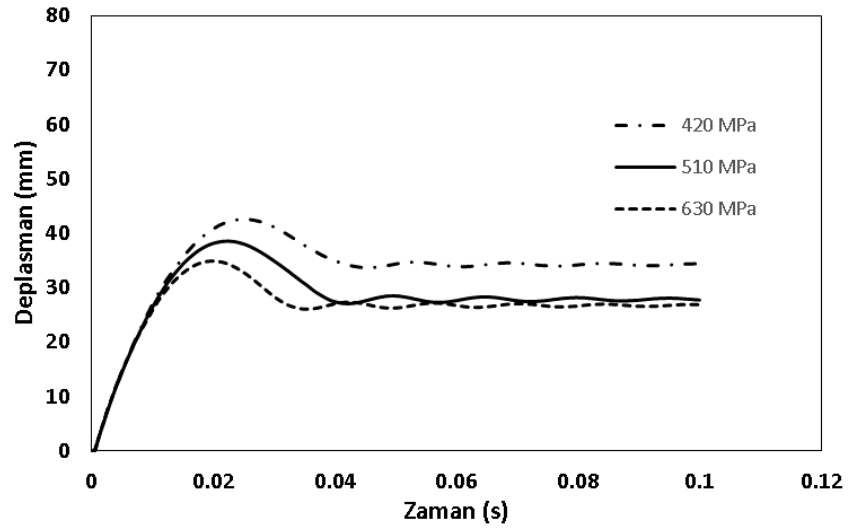
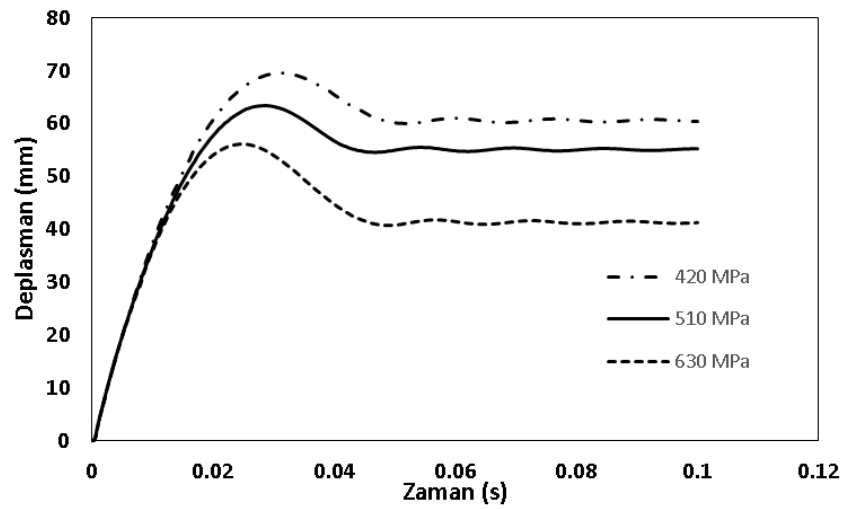
Şekil 5.2. UYPLB ile üretilen betonarme kirişin davranışına malzeme dayanımının etkisi

Analizleri yapılan sonlu eleman modellerinden elde edilen deplasman-zaman grafikleri Şekil 5.2.-5.3.'te ve Tablo 5.3.'te yer almaktadır. Analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, donatı dayanımındaki değişimin çarpma yükü değerlerini etkilemediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yalnızca 510 MPa dayanıma sahip boyuna donatılar ile yapılan analizler sonucunda elde edilen çarpma yükü-zaman grafikleri Şekil 5.4.'te sunulmuştur. Çarpma hızları  $v = 3.35$  m/s,  $v = 4.20$  m/s ve  $v = 5.47$  m/s için sırasıyla maksimum 333kN, 419kN ve 937 kN çarpma yükü değerleri elde edilmiştir.

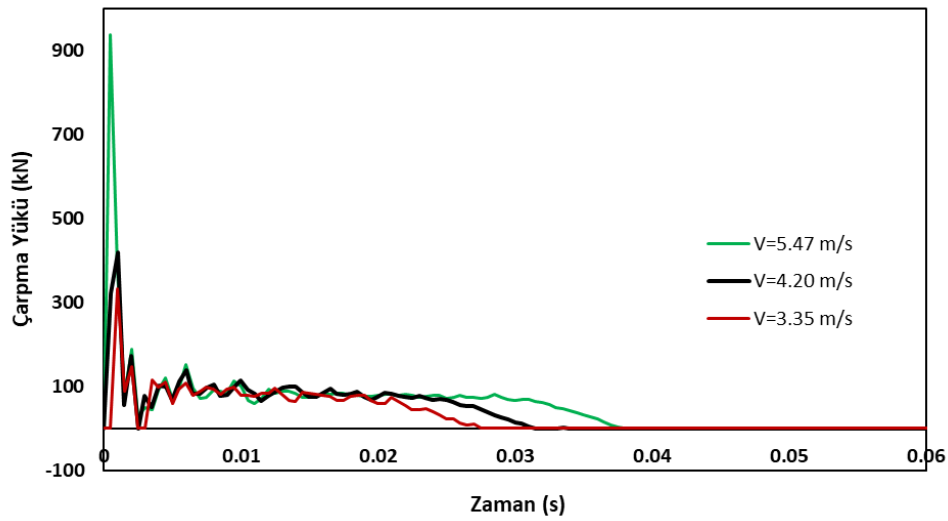
Şekil 5.2-5.3 ve Tablo 5.3.'ten açıkça görüldüğü gibi boyuna donatı malzeme dayanımı ve çarpma hızı (çarpma enerjisi), UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin davranışını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Malzeme dayanımının artması hem maksimum hem de kalıcı deplasman değerini düşürmektedir. Bu durum donatı dayanımının artmasının, çarpma yüklemesi durumunda davranışı iyi yönde etkilediğini göstermektedir.

Maksimum çarpma hızı ( $v = 5.47$  m/s) etkisi altında malzeme dayanımının  $f_{yk} = 420$ MPa olması durumunda kiriş orta noktasının yaptığı maksimum yerdeğiştirme değeri 70mm, kalıcı yerdeğiştirme 60 mm civarında iken  $f_{yk} = 630$ MPa olması durumunda maksimum değer 56mm kalıcı yerdeğiştirme değeri 41 mm civarlarında olmaktadır. Donatı dayanımının artması ile yüksek çarpma hızlarında kiriş orta noktasındaki maksimum yerdeğiştirmelerde yaklaşık olarak % 20, kalıcı yerdeğiştirmelerde %30 civarında azalmalar oluşmaktadır.

Minimum çarpma hızı ( $v = 3.35$  m/s) etkisi altında malzeme dayanımının  $f_{yk} = 420$ MPa olması durumunda kiriş orta noktasının yaptığı maksimum yerdeğiştirme değeri 28 mm, kalıcı yerdeğiştirme 22 mm civarında iken  $f_{yk} = 630$ MPa olması durumunda maksimum değer 23 mm kalıcı yerdeğiştirme değeri 16 mm civarlarında olmaktadır. Malzeme dayanımının artması ile yüksek çarpma hızlarında kiriş orta noktasındaki maksimum yerdeğiştirmelerde yaklaşık olarak % 18, kalıcı yerdeğiştirmelerde %27 civarında azalmalar oluşmaktadır.

a)  $v = 3.35 \text{ m/s}$ b)  $v = 4.20 \text{ m/s}$ c)  $v = 5.47 \text{ m/s}$ 

Şekil 5.3. UYPLB ile üretilen betonarme kirişin davranışına çarpma hızının etkisi



Şekil 5.4.  $f_{yk} = 510 \text{ MPa}$  değeri için çarpma kuvvetinin hız ile değişimi

Tablo 5.3. Parametrik çalışma sonuçları

	$f_y$ (MPa)	$v$ (m/s)	$E_k$ (kJ)	Maksimum Deplasman (mm)	Kalıcı deplasman (mm)
Model 1	420	3.35	2.85	27.82	22.40
Model 2		4.20	4.49	42.54	34.38
Model 3		5.47	7.60	69.57	60.40
Model 4	510	3.35	2.85	35.42	18.97
Model 5		4.20	4.49	38.53	27.72
Model 6		5.47	7.60	63.38	55.21
Model 7	630	3.35	2.85	23.05	16.82
Model 8		4.20	4.49	34.88	26.83
Model 9		5.47	7.60	56.01	41.16

Elde edilen sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde etriye adım mesafesinin değişimi maksimum deformasyonda bir değişim oluşturmazken, Tablo 5.3.'te görüldüğü gibi boyuna donatı dayanımının değişimi ve hız değişimi maksimum deformasyon değerlerinde gözle görülür farklar meydana getirmiştir. Boyuna donatı dayanımının düşmesi ile hem maksimum hem de kalıcı yerdeğiştirmelerde belirgin artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Elemanın deforme olmasında en etkili parametrenin çarpma hızının değişimi olduğu görülmektedir. Çarpma hızları açısından değerlendirildiğinde, beklendiği gibi çarpma hızlarının artması ile kiriş ortasındaki maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmelerde artışlar oluşmaktadır. Bununla birlikte farklı



Çarpma hızları etkisi altında boyuna donatı dayanımının değişimi ile oluşan kalıcı yerdeğiştirmeler arasındaki oransal fark (yaklaşık %20) arpma hızının değişiminden etkilenmeden yaklaşık olarak aynı seviyelerde kalmaktadır

## BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, UYPLB ile üretilmiş betonarme kirişlerin davranışını incelemek amacıyla nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizleri için ABAQUS programı kullanılmıştır. Beton malzemesinin davranışını tanımlamak için Beton Hasar Plastisite modeli kullanılmış ve deneysel verilerden elde edilen değerler ile malzeme modelleri oluşturulmuştur. Malzeme davranışını tanımlamak için literatürden seçilmiş malzeme modelleri kullanılmış ve sonlu eleman modellerinin oluşturulması için gerekli parametreler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Donatı ve beton arasındaki etkileşim gömülü eleman (embedded element) özelliği ile tanımlanmıştır. Modellerde uygun mesh yoğunluğu her model için ayrı olarak incelenmiş ve optimum değerler seçilerek modelleme için kullanılmıştır. Çözüm yöntemi olarak dinamik analizlerde “Explicit” analiz yöntemi, statik analizler için kapalı analiz yöntemlerinden biri olan “Static, General” çözüm yöntemi kullanılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde hem statik hem dinamik analizlerde modellerin deney sonuçlarını gerçekçi bir şekilde simüle edebildiği görülmüştür.

Sonlu eleman modellerinin doğrulanması için literatürden seçilmiş 4 farklı deneysel çalışma kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar ile doğrulanmış nümerik modellerden biri seçilerek parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma ile geometri, malzeme özellikleri ve boyut sabit tutularak UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin dinamik davranışına etriye aralığının, boyuna donatı dayanımının ve çarpma hızının etkisi incelenerek elde edilen deplasman-zaman değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

Parametrik çalışmanın ilk aşama sonuçları incelendiğinde, tek seferlik çarpma yüklemesine maruz kalan kirişlerin davranışı üzerinde etriye aralığı değişiminin belirgin bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

Parametrik çalışmanın ikinci aşama sonuçları incelendiğinde ise boyuna donatı dayanımının düşmesi ile hem maksimum hem de kalıcı yerdeğiştirmelerde belirgin artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Elemanın deforme olmasında en etkili parametrenin çarpma hızının değişimi olduğu gözlemlenmiştir. Çarpma hızları açısından değerlendirildiğinde, hız artması ile kiriş ortasındaki maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmelerde artışlar oluşmaktadır. Bununla birlikte farklı çarpma hızları etkisi altında boyuna donatı dayanımının değişimi ile oluşan kalıcı yerdeğiştirmeler arasındaki oransal fark çarpma hızının değişiminden etkilenmeden yaklaşık olarak aynı seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın bir diğer sonucu da, UYPLB ile üretilen elemanların modellenmesi üzerine çalışacak araştırmacılar için sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında yardımcı olabilecek aşamaların sunulmuş olması ve kullanılabilir malzeme modellerinin gösterilmesidir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen parametrik çalışmada dinamik analizler tek adımlı çarpma etkisi için gerçekleştirilmiştir. İleride yapılabilecek araştırmalarda ise ABAQUS programının “Restart Analysis” özelliği ile tekrarlı çarpma etkisi incelenebilir veya daha önceki bölümde doğrulaması yapıldığı gibi dinamik yüklemeye maruz kalmış numunelerin artık yük taşıma kapasitesi belirlenebilir. Ayrıca dinamik analizlerde, deneysel çalışma ile aynı koşulların sağlanması için kabul edilen hareketli mesnet koşulları değiştirilerek sabit ve ankastre mesnet koşullarında oluşan davranış da incelenebilir.

## KAYNAKÇA

- ABAQUS 2018 Research Edition. Abaqus Unified FEA. Dassault Systèmes SE: 10 rue Marcel Dassault CS 40501 78946 Vélizy-Villacoublay Cedex, France.
- ACI Committee 239. 2012. Ultra-high performance concrete. ACI Fall Convention. Toronto, Ontario, Canada.
- ACI Committee 544. 1988. Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute, Detroit, ACI 544.4R-88.
- AFGC (Association Francaise du Genil Civil) Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes Recommendations. Fransa; 2013.
- Banthia, N., Nandakumar, N. 2003. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 3-9.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S. 2012. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Türkiye.
- Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances, Recommandations Provisoires, (Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes), Interim Recommendations, SETRA-AFGC, Groupe de travail BFUP, Paris, France, January 2002.
- Birtel, V., Mark, P. 2006. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. In ABAQUS users' conference (pp. 95-108).
- Comite' Euro-international du Be'ton, 1988. Concrete structures under impact and impulsive loading. CEB Bulletin 187, Switzerland.
- Chen, Y., May, I. M. 2009. Reinforced concrete members under drop-weight impacts. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 162(1), 45-56.
- Chen, L., Graybeal, B. 2012. Modeling Structural Performance of Ultrahigh Performance Concrete I-Girders. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 754-764.
- Cotsovos, D. M., Stathopoulos, N. D., Zeris, C. A. 2008. Behavior of RC beams subjected to high rates of concentrated loading. *Journal of structural engineering*, 134(12), 1839-1851.

- Curbach, M., Speck, K. 2008. Ultra high performance concrete under biaxial compression. In *Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, (No. 10, p. 477).
- Demir, A. 2018. Betonarme Yüksek Kirişlerde Kesme Çatlağının Artık Yük Taşıma Kapasitesine Etkisinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- Earij, A., Alfano, G., Cashell, K., Zhou, X. 2017. Nonlinear three-dimensional finite-element modelling of reinforced-concrete beams: Computational challenges and experimental validation. *Engineering Failure Analysis*, 82, 92-115.
- FIB MC2010, 2013. CEB-FIB Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: International Federation for Structural Concrete.
- Fujikake, K., Uebayashi, K., Ohno, T., Shimoyama, Y. and Katagiri, M. 2002. Dynamic Properties of Steel Fiber Reinforced Mortar Under High-rates of Loadings and Triaxial Stress States. In: N. Jones, C. A. Brebbia, and A. M. Rajendran, Eds., *Proceedings of the 7th International Conference on Structures Under Shock and Impact*, Montreal, WIT Press, 437-446.
- Fujikake, K., Senga, T., Ueda, N., Ohno, T., Katagiri, M. 2006a. Study on impact response of reactive powder concrete beam and its analytical model. *Journal of advanced concrete technology*, 4(1), 99-108.
- Fujikake, K., Senga, T., Ueda, N., Ohno, T., Katagiri, M. 2006b. Effects of strain rate on tensile behavior of reactive powder concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 79-84.
- Hentz, S., Donzé, F. V., Daudeville, L. 2004. Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates. *Computers & Structures*, 82(29-30), 2509-2524.
- Hibbitt H. D., Karlsson B. I., Sorensen E. P. 2013. ABAQUS user's manual. Providence (RI): Dassault Systemes Simulia Corp.
- Hillerborg, A., Modéer, M., Petersson, P. E. 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and concrete research*, 6(6), 773-781.
- Hughes, G., Speirs, D. M. 1982. An investigation of the beam impact problem.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 1993. Impact behavior and design of structures. *Structural Engineering Series 6*, JSCE, Tokyo in Japanese.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2006. Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft), JSCE Guidelines for Concrete No. 9.

- Kishi, N., Mikami, H., Matsuoka, K. G., Ando, T. 2002. Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar. *International Journal of Impact Engineering*, 27(9), 955-968.
- Lu, Z. H., Zhao, Y. G. 2010. Empirical stress-strain model for unconfined high-strength concrete under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(11), 1181-1186.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Oñate, E. 1989. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of solids and structures*, 25(3), 299-326.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. 1984. Seismic design of bridge piers. Research Rep. No. 84-2, Dept. of Civil Engineering. Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Miyamoto, A., King, M. W., Fujii, M. 1994. Integrated analytical procedure for concrete slabs under impact loads. *Journal of Structural Engineering*, 120(6), 1685-1702.
- NF P 18-470, Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete – Specifications, Performance, Production and Conformity, AFNOR, Paris, 2016.
- NF P 18-710, Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), AFNOR, Paris, 2016.
- Othman, H., Marzouk, H. 2016. Impact response of ultra-high-performance reinforced concrete plates. *ACI Structural Journal*, 113(6), 1325-1334.
- Richard, P., Cheyrezy, M. 1995. “Composition of Reactive Powder Concretes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.
- Roy, D. M., Gouda, G. R., Bobrowsky, A. 1972. “Very High Strength Cement Pastes prepared by Hot Pressing and other High Pressure Techniques”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 349-366.
- Saatci, S. 2007. Behaviour and modelling of Reinforced Concrete Structures Subjected to Impact Loads, Doctor of Philosophy Thesis, University of Toronto, Canada.
- Saatci, S., Vecchio, F. J. 2009. Effects of shear mechanisms on impact behavior of reinforced concrete beams. American Concrete Institute.
- Sangi, A. J. 2011. Reinforced concrete structures under impact loads. Heriot-Watt University. Doctoral dissertation.
- Singh, M., Sheikh, A. H., Ali, M. M., Visintin, P., Griffith, M. C. 2017. Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 138, 12-25.

- Su, Y., Li, J., Wu, C., Wu, P., Li, Z. X. 2016. Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high performance concrete. *Composites Part B: Engineering*, 91, 595-609.
- Sümer, Y. 2010. FRP elemanlarla güçlendirilmiş hasarlı betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- TS 10513, 1992. Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Yoo, D. Y., Banthia, N., Kim, S. W., Yoon, Y. S. 2015a. Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 126, 233-245.
- Yoo, D. Y., Yoon, Y. S. 2015b. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*, 102, 409-423.
- Yoo, D. Y., Banthia, N., Yoon, Y. S. 2016. Experimental and numerical study on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(1), 18-28.
- Yoo, D. Y., Banthia, N. 2017a. Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast. *Construction and building materials*, 149, 416-431.
- Yoo, D. Y., Banthia, N., Yoon, Y. S. 2017b. Impact Resistance of Reinforced Ultra-High-Performance Concrete Beams with Different Steel Fibers. *ACI Structural Journal*, 114(1).
- Yudenfreund, M., Skalny, J., Mikhail, R.S., Brunauer, S. 1972. "Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, II. Exploratory Studies, Dimensional Changes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 331-348.
- Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E. 2011. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Materials and Structures*, 44(3), 583-598.

## ÖZGEÇMİŞ

Gamze Demirtaş, 14.09.1993'te Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ankara'da tamamladı. 2011 yılında Esenevler Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2011 yılında başladığı Selçuk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2016 yılında bitirdi. Aynı yıl akabinde, Selçuk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.