

## Çarpma Etkisindeki Ultra Yüksek Performanslı Lifli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Analizi

<sup>1</sup>Gamze Demirtaş, Naci Çağlar\*<sup>1</sup> ve Yusuf Sümer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

### Özet

Ultra yüksek performanslı lif katkılı betonarme elemanların davranışı geleneksel betona göre oldukça farklıdır. Fakat yüksek maliyetinden dolayı 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 çalışmalar, sonlu eleman programları ile azaltılabilir. Doğrulanmış sayısal modeller; geometri, yükleme koşulları ve donatı oranındaki değişimin yapısal davranış üzerindeki etkisini incelemek için kullanılabilir. Bu çalışmada dinamik yüklemeye maruz kalan UYPL betonarme bir kiriş sonlu eleman programı ile modellenmiş ve nümerik modelin tahmin kabiliyeti incelenmiştir. Analiz ABAQUS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Malzeme modelini oluşturmak için gerekli parametreler basınç ve çekme deneylerinden elde edilmiştir. Nümerik modellerden elde edilen sonuçlar, CDP modelinin UHPFRC kirişlerinin dinamik davranışlarının doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu Eleman Analizi, Çarpma, UYPL betonarme kiriş, ABAQUS.

## Finite Element Analysis of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Impact Load

### Abstract

The behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete elements is quite different from that of conventional concrete. However, due to its high cost, in the literature, there are a limited number of studies on the dynamic behavior of the structural member made up of ultra-high performance fiber reinforced concrete. Experimental studies for the development of design procedures for large-scale structural elements can be reduced by finite element programs. Verified numerical models can be used to study the effect of change in geometry, loading conditions and reinforcement ratio on structural behavior. In this study, UHPFRC reinforced concrete beam exposed to dynamic loading was modeled by a finite element program and the predictive ability of the numerical model was investigated. The analysis was performed using finite element program ABAQUS. The parameters required for the material model were obtained from uniaxial pressure and tensile tests. The results from the numerical models show that the CDP model can accurately predict the dynamic behavior of the UHPFRC beams.

**Key words:** Finite element analysis, impact, UHPFRC beam, ABAQUS.

## 1. Giriş

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 malzemedir [1-4]. Bu üstün özellikler düşük su/çimento oranı (yaklaşık %2), tane yoğunluğunu maksimize eden ve homojenlik sağlayan çok ince katkı malzemeleri, buhar kürü ve mikro çelik liflerin katkısı ile sağlanmaktadır [5]. UYPLB'un bu özellikleri sayesinde ani ya da 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 uygun bir malzeme olabilmektedir[1]. Fakat UYPL betonarme elemanların dinamik davranışının incelenmesi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Fujikake vd. [1] UYPLB kirişin dinamik davranışını deneysel olarak incelemiş ve bu çalışmada etriye donatısı olmayan kirişte eğilme kırılması gerçekleştiğini raporlamıştır. Othman vd.[6] beton tipi, lif içeriği ve donatı oranının UYPLB döşemelerin dinamik davranışına etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Lif içeriğinin ve donatı oranının artması aynı dinamik yük altında daha az tepe noktası ve kalıcı deplasman oluştuğunu gözlemlemiştir. Yoo vd. [7] dinamik yükleme altındaki UYPLB kirişlerin eğilme davranışında donatı oranının etkisini incelemiştir. Donatı oranı arttıkça daha az kalıcı deplasman oluştuğunu ve maksimum çatlak genişliğinin azaldığını tespit etmiştir. Yoo vd. [8] dinamik yükleme altındaki UYPLB kirişlerde hacimce %2 oranında çelik lif kullanılması durumunda hasar seviyesinin azaldığı ve dolayısıyla kalıcı ve maksimum deplasman değerlerinde ciddi oranlara düşmeler oluştuğunu rapor etmişlerdir.

Literatürde, UYPLB ile üretilen yapı elemanlarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelendiği çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu tür yapı elemanlarının tasarım prosedürünün çok iyi bilinmemesi ve deneysel çalışma için kullanılacak test ekipmanı ve malzemenin yüksek maliyetli olması gibi nedenler de bu sonuca yol açabilmektedir. Bununla birlikte, hızla gelişen bilgisayar teknolojileri bu tür deneylerin bilgisayar ortamında yapılabilmesine, oluşturulan deney matrislerinin 2 veya 3 boyutlu modellerle hızlı bir şekilde değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Ancak oluşturulan sayısal modellerin gerçek yapı davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebildiği kanıtlanmalıdır.

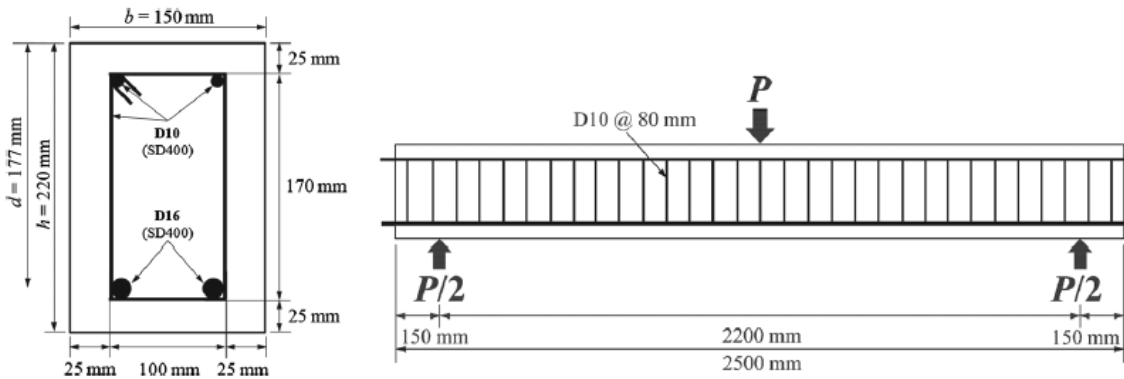
Bu çalışmada UYPLB ile üretilen betonarme bir kirişin sonlu eleman programıyla modellenmesi ve çarpma yükleri etkisi altındaki davranışının gerçekçi bir şekilde simüle edildiğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla doğrusal olmayan analizler yapabilen ABAQUS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, literatürden seçilen UYPLB ile üretilen betonarme bir kirişin sonlu eleman modeli oluşturulmuş, nümerik modelin oluşturulması için gerekli modelleme parametreleri ayrıntılı olarak açıklanmış ve bu kirişin çarpma etkisi altındaki dinamik analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmış ve modelin, çarpma etkisi altındaki betonarme kirişin davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebildiği gösterilmiştir.

## 2. Deneysel Çalışma

Bu çalışma kapsamında sayısal analizleri yapılan deneysel çalışma literatürden seçilmiş olup farklı lif içeriğine sahip UYPLB kirişlerin darbe direncinin incelenmesi ile ilgilidir [8]. Deney numunelerinin boyutları 150 x 220 mm ve uzunlukları 2500 mm dir. Çekme bölgesinde D16 (15.9mm) ve basınç bölgesinde D10 (9.53mm) çapında boyuna donatılar kullanılmıştır (Şekil 1). Bu çalışmada modellenen deney numunesinde UYPLB üretmek için narinlik oranı (aspect ratio) 65 olan, 13 mm uzunluklu düz (smooth) çelik lif kullanılmıştır. Çarpma deneyleri 510kg lık kütlelerin, deney numunelerinin orta noktalarına 2 farklı yükseklikten (0.90 ve 1.15 m) serbest düşürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Simüle edilen kirişin üretiminde kullanılan UYPLB için tek eksenli basınç deneyinden elde edilen dayanım 211.8 MPa'dır. Donatı elemanlarının, deney sonuçlarından elde edilen mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

**Tablo 1.** Beton ve Donatı mekanik özellikleri [8]

| Tip           | İsim | Çap (mm) | $E_s$ (Gpa) | $f_y$ (Mpa) | $\epsilon_y$ | $f_u$ (Mpa) | $\epsilon_u$ |
|---------------|------|----------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| Boyuna donatı | D16  | 15.90    | 200         | 510         | 0.0026       | 626         | 0.19         |
| Etriye        | D10  | 9.53     | 200         | 491         | 0.0025       | 609         | 0.20         |



**Şekil 1.** Kesit geometrisi ve donatı düzeni [8]

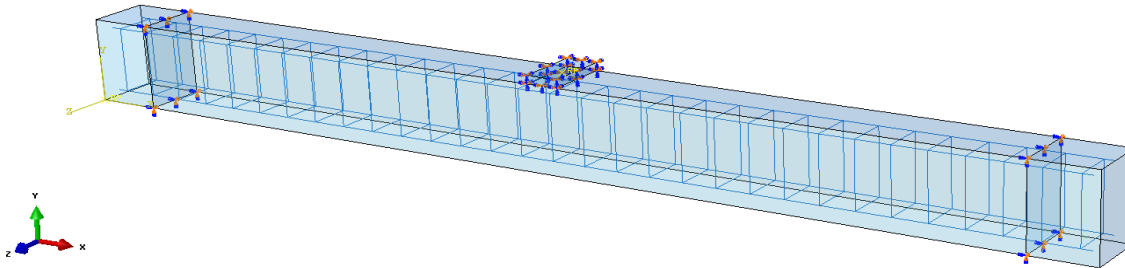
## 3. Sonlu Eleman Modeli

Deneysel çalışması yapılan darbe etkisi altındaki numunelerin nümerik analizi ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak yapılmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizler için Abaqus programında açık (explicit) ya da kapalı (implicit) direk integrasyon sistemi kullanılabilir. Doğrusal olmayan denklemlerin, kısa süreli problemlerin çözümünde daha hızlı ve daha verimli sonuçlar verdiği için bu çalışma kapsamında açık dinamik analiz yöntemi kullanılmıştır [9].

### 3.1. Sınır koşulları ve yük uygulaması

Mesnetler deneyde verilen konumlarda çizgisel olarak tanımlanmış ve deney verilerine göre X yönündeki hareketleri ve Z yönündeki dönmeleri serbest bırakılmıştır. Çelik çarpma ağırlığı rijit

cisim (rigid body) olarak modellenmiştir ve cismin orta noktasında belirlenen referans noktasına kütlesi atanmıştır. Çarpma kütlelerinin 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 (Şekil 2).



**Şekil 2.** Sonlu eleman modeli

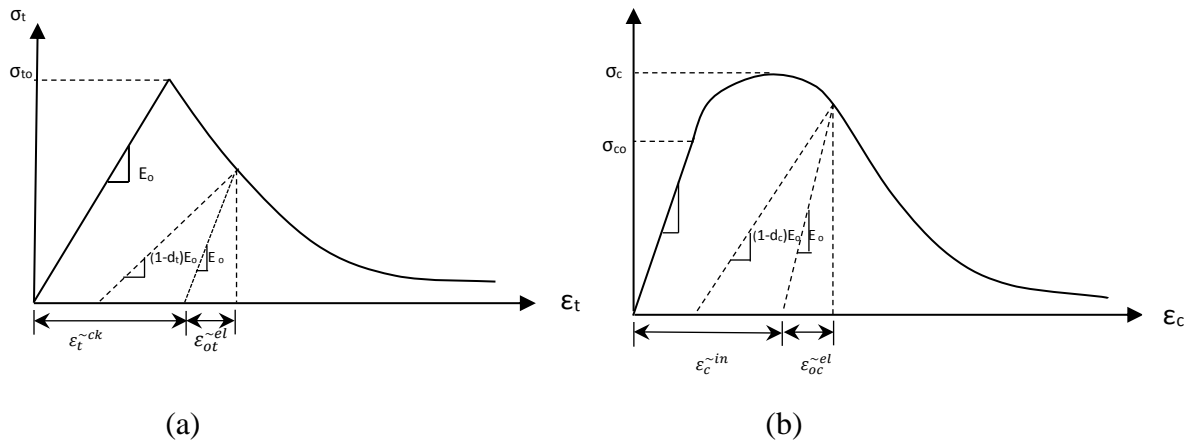
### 3.2. Sonlu eleman geometrisi

Çözüm ağında beton; 3 yer değiştirme serbestlik dereceli, 8-düğüm ve azaltılmış integrasyon noktalı (C3D8R) sonlu elemanlar olarak modellenmiştir. Donatı çubukları ise aksel doğrultuda tek serbestlik dereceli, 2-düğüm noktalı, lineer doğrusal (T3D2) sonlu eleman parçaları olarak modellenmiştir. Donatı ve beton arasında etkileşim kesitler arasında ortak serbestlik derecesi ile hareketi sağlayan gömülü (embedded) özelliği ile tanımlanmıştır.

### 3.3. Malzeme Modelleri

Donatı malzeme modelini tanımlamak için elastoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Bu davranış özelliğinin tanımlanabilmesi için gerekli parametreler deneysel çalışmadan elde edilmiş olup, Tablo 1’de sunulmuştur.

Beton malzeme modelini tanımlamak için basınç ezilmesi ve çekme çatlama olmak üzere iki temel yenilme mekanizması vardır (Şekil 3). Betonun doğrusal olmayan davranışını tanımlamak Beton Hasar Plastisite (BHP) modeli kullanılmıştır. BHP modeli öncelikli olarak, çevrimsel veya dinamik yükleme altında beton yapıların analizi için kullanılmaktadır [9]. Şekil 3’ten de görüldüğü gibi BHP modelinin tek eksenli çekme altındaki davranışı maksimum çekme gerilmesi 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 [10].



**Şekil 3.** Eksenel çekme (a) ve basınç (b) altında betonun davranışı [9]

Tek eksenli basınç yüklemesi altında, BHP modeli  $\sigma_{c0}$  değerine kadar lineer bir davranış sergilemektedir. Bu dayanım aşıldıktan sonra betonda plastik şekil değiştirmeler başlamaktadır.  $\sigma_{c0}$  ile  $\sigma_{cu}$  arasındaki davranış dayanım pekleşmesi,  $\sigma_{cu}$  aşıldıktan sonra oluşan davranış ise dayanım yumuşaması olarak ifade edilmektedir.

$d_c$  ve  $d_t$  betonun basınç ve çekme etkisi altındaki elastik rijitlikteki azalmayı ifade eden hasar parametreleri olup Denklem 1 ve 2 ile ifade edilmektedir [11]. Hasar parametresi 0 ile 1 arasında değişen değerler almaktadır ve 0 hasarsız durumu, 1 tam hasarlı durumu ifade etmektedir.

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

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_{t0}/E_0}{\sigma_{t0}/E_0 + \epsilon_t^{ck}(1-b_t)} \quad (2)$$

BHP modelinin güç tükenme zarfını belirlemek için 4 parametre gereklidir. Eksantriste parametresi ( $\epsilon$ ), varsayılan değer olarak 0.1 kabul edilmiştir. İki eksenli başlangıç basınç akma gerilmesinin tek eksenli başlangıç basınç gerilmesine oranı ( $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ ) için tipik değerler 1.10 ile 1.16 arasında değişmektedir [12]. UYPLB için bu değer 1.05 olarak raporlanmıştır [13].  $K_c$  değeri nümerik analizlerde varsayılan değer olarak verilen 2/3 kabul edilmiştir. Dilasyon açısı ( $\psi$ ) ise, hassasiyet analizi yapılarak belirlenmiştir.

Betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme davranışı deney sonuçlarına dayanarak normal ve yüksek dayanımlı betonlar için ampirik denklemlerle tanımlanmıştır [14]. Singh, Lu tarafından önerilen ampirik denklemi tekrar düzenleyerek UYPLB'nin gerilme-şekil değiştirme davranışını tek eksenli basınç altında tanımlamıştır [15]. Singh tarafından önerilen formül tam ölçekli kirişin sonlu eleman analizi yönteminde kullanılmış ve dinamik analiz için geçerliliği araştırılmıştır.

$$\sigma_c = f'_c \left[ \frac{(E_0/E_{sc})(\epsilon/\epsilon_0) - (\epsilon/\epsilon_0)^2}{1 + (E_0/E_{sc} - 2)(\epsilon/\epsilon_0)} \right] \quad (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0) \quad (3)$$

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

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

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

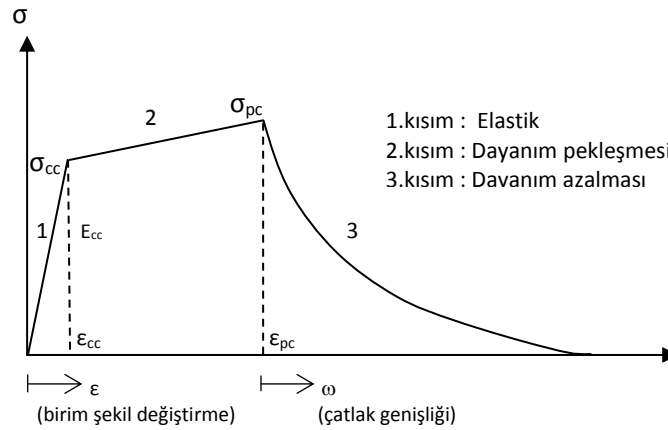
$$E_0 = 15050(f'_c/10)^{1/3} \quad (7)$$

$$E_{sc} = f'_c/\varepsilon_0 \quad (8)$$

$f'_c$  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 ifade etmektedir.

UYPLB malzemesinin çekme altındaki davranışı normal dayanımlı betonun davranışından farklıdır. Normal betonda kırılma sonrası yük azalma hızı çok yüksek ve deformasyon çok düşük olmasına karşın, lifli betonda çatlama sonrası yükün daha da arttığı görülür. UYPL betonda lifler köprü görevi görerek betonda oluşan mikro çatlakların büyümesini engelleyip beton matrisi üzerinden boşalan gerilmeyi karşılar ve lokal çatlak oluşana kadar bir miktar daha gerilme almasını sağlar. Gerilme transferi sebebiyle, Çatlağın yayılması için gerekli olan enerji miktarı da normal betona göre çok daha fazla olmaktadır [16].

İdealleştirilmiş model yaklaşımı çekme davranışını elastik, dayanım pekleşmesi ve dayanım azalması olmak üzere 3 kısma ayırmaktadır (Şekil 4) [2].

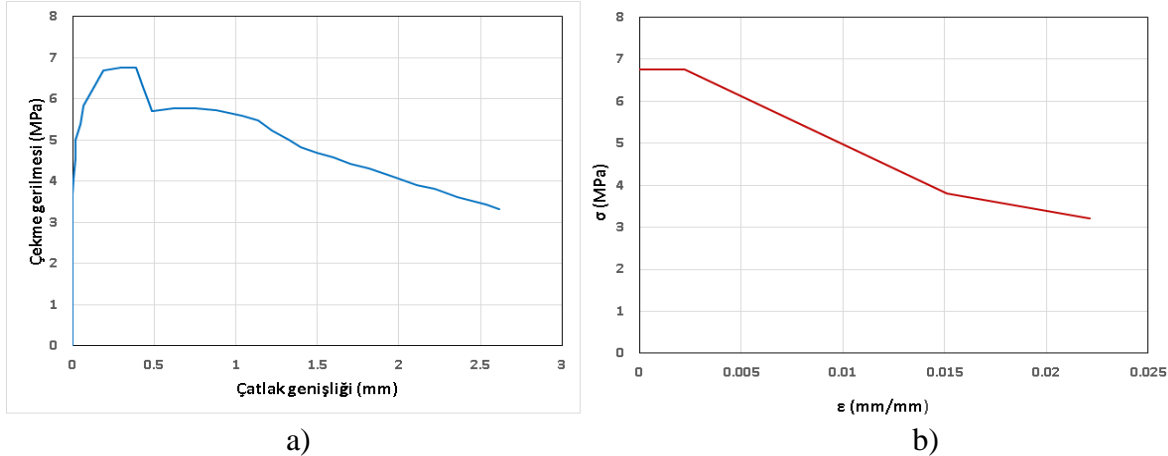


Şekil 4. UYPLB için idealleştirilmiş çekme davranışı

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

Deneysel çalışmada betonun çekme davranışını elde etmek için eğilme testi yapılmış, daha sonra

geri analiz metodu ile çekme gerilmesi-çatlak genişliği grafiği elde edilmiştir. Deneysel çalışmadan edilen çekme gerilmesi- çatlak genişliği eğrisi AFGC [4] tarafından önerilen formüller kullanılarak gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine dönüştürülerek oluşturulan eğri modelleme için kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Deney sonuçlarından elde edilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrisi b) AFGC'ye göre idealleştirilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrisi

$$\varepsilon_{0.3} = \frac{w_{0.3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_c} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_c} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c} \quad (11)$$

$\varepsilon_{0.3}$  çatlak genişliğinin 0.3 mm olduğu ( $w_{0.3}$ ) birim şekil değiştirme,  $\varepsilon_{1\%}$  kiriş yüksekliğinin %1'i kadar çatlak genişliği ( $w_{1\%}$ ) olduğu birim şekil değiştirme değerini ifade etmektedir.  $l_c$  karakteristik uzunluktur ve kiriş yüksekliğinin 2/3'ü olarak ifade edilmektedir.  $l_f$  lif uzunluğu,  $\gamma_{bf}$  kısmi güvenlik faktörü,  $E_c$  beton elastisite modülüdür.

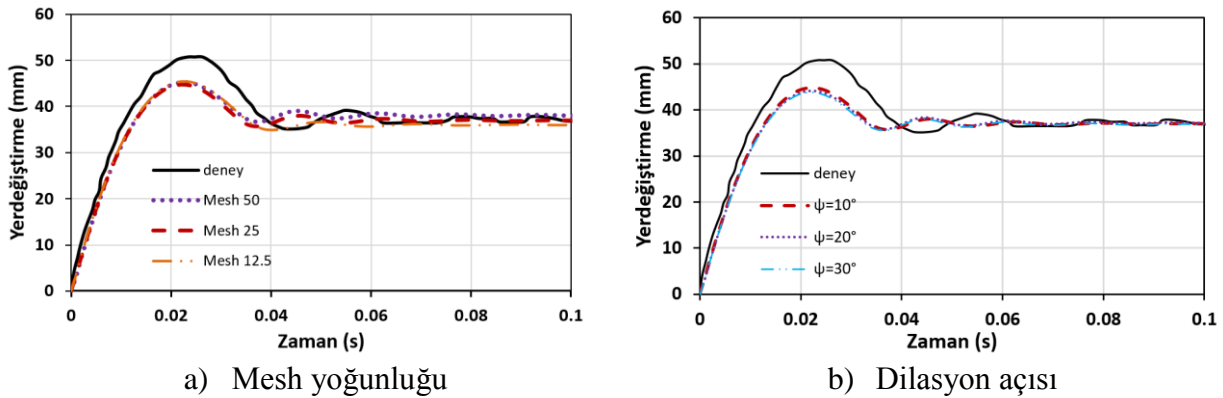
#### 4. Sonlu eleman modeli parametrelerinin seçimi

Sonlu eleman modelinin kirişin davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebilmesi için gerekli parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Sonlu eleman modelinin üzerinde bu parametrelerin etkisini belirlemek için hassasiyet analizi (sensitivity analyses) yapılmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda  $\varepsilon$ ,  $\sigma_{bo}/\sigma_{co}$ ,  $K_c$  değerlerinin analiz sonuçlarını etkilemediği ifade edilmiştir [16]. Bu çalışma kapsamında mesh (sonlu eleman ağı) yoğunluğu ve dilasyon açısı parametresi için parametrik bir çalışma yapılacak olup bu parametrelerin kirişin davranışına etkisi araştırılacaktır.

Sonlu eleman modelinin analiz sonuçları üzerinde mesh boyutunun etkisini belirlemek üzere 50, 25 ve 12.5mm olmak üzere üç farklı mesh yoğunluğu seçilmiştir (Şekil 6a). Şekilden de görüldüğü gibi tepe noktası değerine ulaşana kadar seçilen mesh yoğunlukları için sonlu eleman modelinin

davranışı yaklaşık aynıdır. Kalıcı yerdeğiştirmeler açısından ise mesh yoğunluğunun davranışı etkilediği görülmüştür. Bu sonuçlar dikkate alındığında mesh yoğunluğu açısından 25mm değerinin seçilmesine karar verilmiştir.

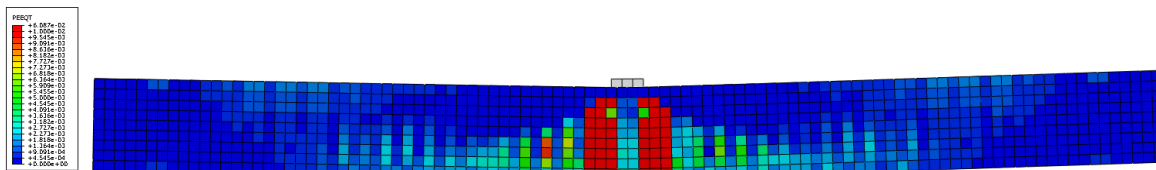
Betonda kritik gerilmeye kadar hacimsel değişimler poisson oranıyla belirlenirken kritik gerilmeye ulaşılmaya basınç altında plastik hacimsel değişimler başlar [17]. Bu davranış dilasyon açısı parametresiyle dikkate alınmaktadır. Sonlu eleman modelinde 3 farklı dilasyon açısı değeri ile analiz yapılmış ve  $10^0$  dilasyon açısı tepe noktası değerine daha yakın sonuç vermiştir. Ayrıca, seçilen dilasyon açısının Othman vd. [18] ve Chen vd. [19] tarafından yapılan çalışmalar ile de uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Farklı parametrelere bağlı yerdeğiştirme-zaman grafiği

## 5. Sonlu Elemanlar Modeli ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Seçilen parametreler ve mesh yoğunluğu ile sayısal modelin dinamik analizleri yapılmış ve deforme olmuş numune Şekil 7’de gösterilmektedir. Çarpma ağırlığının 1.15 m ve 0.90 m yükseklikten serbest bırakılmasıyla elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 8.a ve Şekil 8.b’de sunulmuştur. Ayrıca deney ve sayısal modelden elde edilen sonuçlar Tablo 2’de özetlenmiştir. Şekil 8 ve Tablo 2’den de görüldüğü gibi, sonlu eleman modellerinden elde edilen sonuçlar laboratuvar deneyleri ile somut bir uyumu kanıtlamaktadır. Farklı yüksekliklerden yük bırakılarak yapılan deneyler için elde edilen kinetik enerji değerleri model ile tam uyumlu olduğu görülmektedir. Oluşan deformasyonlar arasındaki farklar ise maksimum %12.15 olması modellemeye yapılan sınır şartları kabullerinin deneyle uyumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuçlar dikkate alındığında, UYPLB ile üretilmiş betonarme kirişin çarpma yükleri etkisi altındaki davranışını gerçekçi bir şekilde simüle etmek için sonlu eleman modelinin kullanılması uygundur.

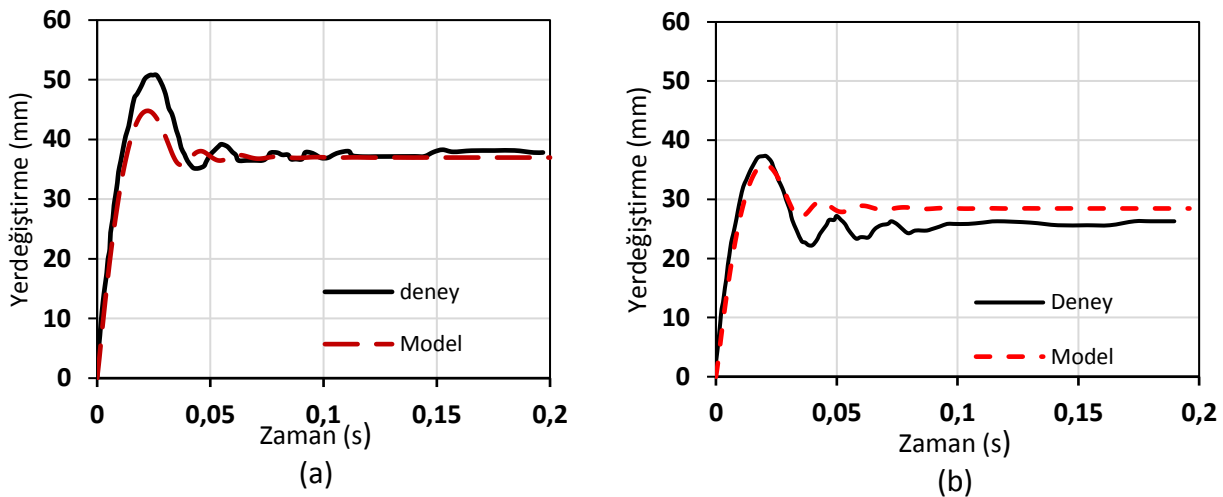


Şekil 7. Nümerik analiz sonucu



**Tablo 2.** Deney sonuçları ile sonlu eleman modeli sonuçlarının karşılaştırılması

|        | Düşme yüksekliği (m) |     | Kinetik Enerji (kJ) |      | Hız (m/s) |      | Maksimum deformasyon (mm) |      | Kalıcı deformasyon (mm) |      | Kırılma tipi |        |
|--------|----------------------|-----|---------------------|------|-----------|------|---------------------------|------|-------------------------|------|--------------|--------|
|        | Deney                | SEM | Deney               | SEM  | Deney     | SEM  | Deney                     | SEM  | Deney                   | SEM  | Deney        | SEM    |
| UH-S13 | 0.90                 | -   | 4.50                | 4.50 | 4.20      | 4.20 | 37.3                      | 35.9 | 25.6                    | 28.4 | Eğilme       | Eğilme |
|        | 1.15                 | -   | 5.75                | 5.75 | 4.75      | 4.75 | 51.0                      | 44.8 | 37                      | 36.9 | Eğilme       | Eğilme |

**Şekil 8.** yerdeğiştirme-zaman grafiği a)  $V=4.75$  m/s b)  $V=4.20$  m/s

## 6. Sonuçlar

Modelleme sonucuna göre, ABAQUS yazılımı kullanılarak yapılan sayısal simülasyon, deneysel sonuçlara oldukça yakın sonuçlar vermiştir. UYPL betonarme kirişlerin nümerik analizleri, yeni bir malzeme olan UYPLB'nin dinamik tepkisini tahmin etmekte BHP modelinin elverişli olduğunu, önerilen beton basınç ve çekme eğrilerinin dinamik analizlerde yüksek dayanımlı ve lif katkılı betonların davranışını modellemede kullanılabilir olduğunu göstermektedir. ABAQUS yazılımı kullanılarak UYPL betonarme kirişlerin darbe yükleri altındaki sonlu eleman analizi altındaki olası hasar modlarını araştırmak için makul ve gerçekçi tahminler geliştirebilmektedir.

Model ile deney sonuçları arasında oluşan fark malzeme deneylerindeki yükleme hızından ve lif yönelim açısından farklılıklardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Fujikake vd. [1] yaptığı çalışmada yükleme hızının beton çekme davranışını etkilediğini ifade etmiştir. Fakat kullanılan modelde yükleme hızının (strain rate) malzeme üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Modeli geliştirebilmek için model dinamik malzeme testlerine göre revize edilebilir.

## Kaynaklar

- [1] Fujikake K, Senga T, Ueda N, Ohno T, Katagiri M. Study on Impact Response of Reactive Powder Concrete Beam and Its Analytical Model. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2006; 4:99-108.
- [2] Wille K, Kim D J, Naaman A E. Strain Hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Materials and Structures* 2011; 44:583–598
- [3] Othman H, Marzouk H. Performance of UHPFRC Plates Under Repeated Impact Load, First International Interactive Symposium on UHPC – 2016; 1-8.
- [4] AFGC (Association Francaise du Genil Civil) Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes Recommendations Fransa; 2013.
- [5] Yoo, Mechanical and Structural behaviors of ultra-high performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast
- [6] Othman H. Impact Response of Ultra-High-Performance Reinforced Concrete Plates
- [7] Yoo D Y, Banthia N, Kim S W, Yoon Y S. Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low velocity impact loading, *Composite Structures* 2015;126: 233–245
- [8] Yoo D Y, Banthia N, Yoon Y S. Impact Resistance of Reinforced Ultra-High-Performance Concrete Beams with Different Steel Fibers. *ACI Structural Journal* 2017; 114-S10:113-124.
- [9] ABAQUS Analysis User's Manual Online Documentation (Version 6.12)
- [10] Earij A, Alfano G, Cashell K, Zhou X. Nonlinear Three-Dimensional Finite-Element Modelling of Reinforced-Concrete Beams: Computational Challenges and Experimental Validation. *Engineering Failure Analysis* 2017; 82: 92–115.
- [11] Birtel V, Mark P, Parametericed finite element modelling of RC beam shear failure, *Abaqus User's Conference* 2006:95-107
- [12] Lubliner, J, Oliver J, Oller S, Onate E. A Plastic-Damage Model for Concrete. *International Journal of Solids and Structures* 1989; 25:299-329.
- [13] Curbach M, Speck K. Ultra High Performance Concrete under Biaxial Compression. *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*,2008, 477-484
- [14] Lu Z H, Zhao Y G. Empirical Stress Strain Model for Unconfined High Strength Concrete under Uniaxial Compression. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2010: 1181-1186
- [15] Singh M, Sheikh A H, Mohamed Ali M S, Visintin P, Griffith M C. Experimental and Numerical Study of The Flexural Behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete Beams, *Construction and Building Materials* 138 (2017) 12–25
- [16] Redaelli D, Muttoni A. Tensile Behaviour of Reinforced Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete Elements, *Concrete Structures: stimulators of development. fib Symposium, Dubrovnik* 2007:267-274
- [17] Sümer Y. FRP Elemanlarla Güçlendirilmiş Hasarlı Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, 2010.
- [18] Othman H, Marzouk H. Finite Element Analysis of UHPFRC Plates under Impact Loads. *AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete,UHPFRC* 2017:337-346
- [19] Chen L, Graybeal B. Modeling Structural Performance of Ultra High Performance Concrete I-Girders. *J. Brid. Eng* 2011;17: 754-764.