

## Lif Katkılı Beton ile Üretilen Enine Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Doğrusal Olmayan Analizi

<sup>1</sup>Ahmet Hamdi Serdar, \* <sup>1,2</sup>Naci Çağlar, <sup>1</sup>Gökhan Dok, <sup>2</sup>Gamze Demirtaş ve <sup>1</sup>Mehmet Sarıbyık  
<sup>1</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye  
<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

### Özet

Lifli betonların, yapı taşıyıcı sistem üretimlerinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Lifli betonlar, klasik betonlara kıyasla daha sünek ve daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olmanın yanında dayanım açısından da daha olumlu sonuçlar vermektedirler. Bu çalışmada lif katkılı beton ile üretilen enine donatılı betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Bu amaçla, literatürden seçilen enine donatısız deneysel bir çalışma ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla modellenmiş ve doğrulanmıştır. Ardından doğrulanmış sayısal model ile gerçekleştirilen parametrik çalışmada enine donatılı ve lif katkılı beton ile üretilen betonarme kirişlerin farklı çekme donatıları etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunularak yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Lifli beton, Sonlu eleman analizi, Eğilme davranışı, ABAQUS.

## Nonlinear Analysis of Transverse Reinforced Concrete Beams with Fiber Reinforced Concrete Under the Effect of Bending

### Abstract

The use of fiber concretes in the production of structural bearing systems is becoming increasingly common. Fiber concretes are more ductile and have higher energy absorption capacity compared to conventional concretes, and they also give more positive results in terms of strength. In this study, the behavior of transverse reinforced concrete beams produced with fiber reinforced concrete was investigated. For this purpose, an experimental study without transverse reinforcement selected from the literature was modeled and verified with the ABAQUS finite element program. Then, the behavior of reinforced concrete beams with transversely reinforced and fiber-reinforced concrete under the effects of different tensile reinforcements was investigated in the parametric study carried out with the verified numerical model. Obtained results are presented as graphics and interpreted.

**Keywords:** Fiber reinforced concrete, Finite element analysis, Bending behavior, ABAQUS.

### 1. Giriş

Betonarme yani beton ve çeliğin birlikte kullanılması fikri ilk olarak 19.yy'ın ortalarında T. Hyatt tarafından öne sürülmüştür [1]. Beton matrisine lif ya da tel katılması durumu ise aynı dönemlerde J. Lambot tarafından patentleştirilmiştir [1]. Lifli beton; yalın beton matrisine çeşitli tür ve geometriye sahip liflerin gelişigüzel dahil edilmesiyle üretilmektedir. Beton içerisine lif katılmasıyla malzeme davranışı oldukça farklılaşmaktadır. Geleneksel beton çekme çatlaklarına

\* Sorumlu Yazar

[caglar@sakarya.edu.tr](mailto:caglar@sakarya.edu.tr); [caglar@subu.edu.tr](mailto:caglar@subu.edu.tr)

+90 264 616 00 10 ; +90 264 295 5729

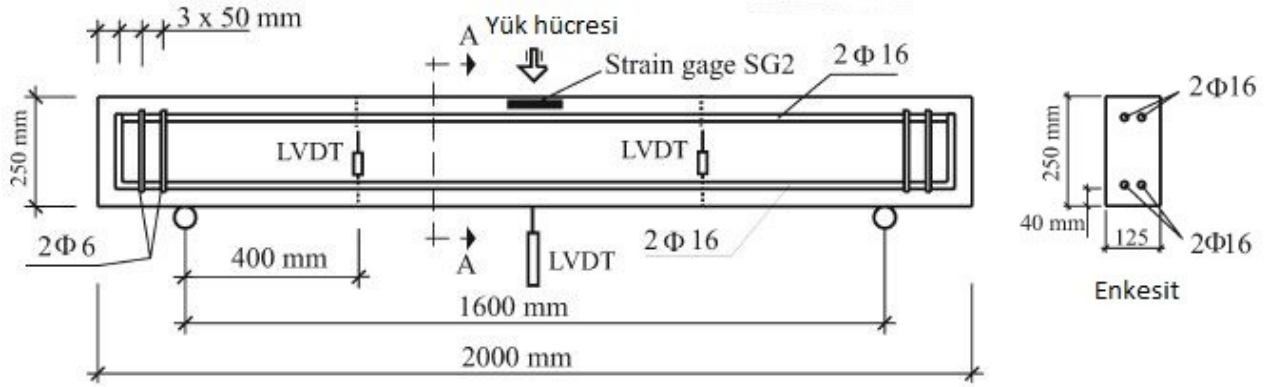
karşı dayanım gösterememektedir. Bunun aksine lifli betonlarda; çekme çatlağı oluşumunun ardından oluşan gerilmeler, liflerin köprüleme etkisi dolayısıyla komşu bölgelere aktarılmaktadır[2]. Literatürde bulunan nümerik ve deneysel çalışmalarda, yapı davranışında klasik betona göre lifli betonun süneklik, dayanım ve enerji yutma kapasitesi açısından önemli katkılar sağladığı belirlenmiştir[2-6]. Literatürde bulunan birçok çalışma da, matrisinde kancalı lif bulunan betonların davranışında iyileşmeler olduğu [3], çelik lif katkılı geleneksel betonlardan üretilen kirişlerin kesme dayanımların doğrudan lifli betonun çekme gerilmesiyle ilişkili olduğu belirlenmiştir [4]. Beton kullanılarak üretilen yapı elemanlarının birleşim bölgelerinde lifli beton kullanımının çatlak oluşumunun engellenmesinde, enine donatının kullanımına göre daha olumlu sonuçlar verdiği ve daha yüksek miktarda moment taşıyabildiği belirlenmiştir [2-6].

Gelişen bilgisayarlar ve bu teknolojinin deney metodolojisiyle işbirliği içinde işletilebilmesi ile bilgisayar yazılımları sayesinde oluşturulan modeller ile gerçek davranışlar simule edilerek, deneysel çalışma ile elde edilebilecek olan sonuçlar elde edilebilmekte ve davranış hakkında yorumlamalar yapılabilmektedir. Nümerik model doğru sonuçlar verebildiğini gösterebilmek amacıyla literatürden laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olan bir çalışma seçilmekte ve bu çalışmanın analiz sonuçları ile deney sonuçlarının yakın sonuçlar verdiğini belirtmek gerekmektedir. Yapı elemanlarının farklı parametreleri üzerinden de gözlem yapılabilmesi, deney ve analiz sonuçlarının uyumlu olmasına bağlıdır. Nümerik analizlerin veri doğruluğu açısından tüm gereklilikleri sağlaması durumunda numune çeşitliğinin artırılabilmesinin yanında, hem daha düşük maliyet hem de daha kısa süre sonuç alabilmek mümkün olmaktadır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada lif katkılı beton kullanımıyla üretilen enine donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Bu doğrultuda ABAQUS paket programı kullanılarak nümerik modeller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, literatürden seçilen lif katkılı beton kullanımıyla üretilen enine donatısız betonarme kirişlerin deneysel çalışma sonuçları kullanılarak betonarme kiriş davranışı ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla modellenmiş ve doğrulanmıştır. Doğrulanmış sayısal model yardımıyla parametrik çalışmada lif katkılı beton ile üretilen enine donatılı betonarme kirişlerin farklı çekme donatıları etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

## 2. Deneysel Çalışma

Serdar vd (2020) tarafından, literatürden seçilen deneysel çalışma [7] sonuçları kullanılarak sonlu eleman modelinin uyumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Deneysel çalışma [7] da numune olarak kullanılan kiriş 125x250 mm dikdörtgen kesite sahiptir. Çekme ve basınç bölgelerinde 2'şer adet 16 mm çapında nervürlü donatı mevcuttur. Şekil 1'de de görüldüğü gibi kirişler enine donatısız olarak üretilmiştir. Kesme etkisi beton matrisinde bulunan çelik liflerce karşılanmaktadır. Numuneler üzerinde 1.60 m net açıklıkla 3 noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleri oluşturulan C ve F serisine ait numunenin malzeme özellikleri tablo halinde gösterilmektedir (Tablo 1). Statik testler 0.1mm/s hızla çalışan piston kolu yardımıyla numunenin orta noktasından sabit hızlı düşey yük uygulanması ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Kiriş geometri ve en kesiti [7]

Tablo 1. Beton malzeme özellikleri [7]

Seri	Lif oranı (%)	Lif tipi	Lif uzunluğu/ Lif çapı (mm)	Lif akma dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)	Dolaylı çekme dayanımı (MPa)	Kırılma enerjisi (kJ/m)
C	0.5	Kancalı	60/0.75	1200	61.4	6.7	6.75
F	1	Kancalı	60/0.75	1200	61.3	6.8	9.04

### 3. Sonlu Eleman Modeli

Betonarme kirişlere ait doğrusal olmayan analizler ABAQUS paket programı kullanılarak yapılmıştır. Donatı çubuk elemanlar (truss), beton ise 3 boyutlu katı eleman (solid) olarak modellenmiştir. Beton modeli; 3 yer değiştirme serbestlik dereceli, 8-düğüm ve azaltılmış integrasyon noktalı (C3D8R) sonlu elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Donatı elemanlarının modellenmesi ise aksel doğrultuda tek serbestlik dereceli, 2-düğüm noktalı, lineer doğrusal (T3D2) sonlu eleman parçaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Beton ve donatı arasındaki aderansın sağlanabilmesi için ortak serbestlik derecesi ile hareketi sağlayan gömülü (embedded) özelliği kullanılmıştır.

Nümerik modelleme de statik yükleme kiriş orta noktasından çizgisel yük tanımlanmasıyla oluşturulmuş, böylece deney koşullarına uygun yükleme modeli oluşturulmuştur. Mesnetler ise basit mesnet olarak deneysel çalışmadaki konumlarına uygun olarak modellenmiştir. Analizlerin hassas olması amacıyla mesh boyutu 50 mm olarak seçilmiştir [8].

Donatı malzemesi numerik modele; B500SD özellikte, akma gerilmesi 500 MPa, kopma gerilmesi 575 MPa olmak üzere elastoplastik olarak girilmiştir. Matrisinde çelik lif bulunan betonun doğrusal olmayan basınç gerilmesi-birim şekil değiştirme ilişkisi Dhakal ve diğ. [9] tarafından geliştirilen model aracılığıyla modellenmiştir.

$$\sigma_c = f_c \left[ \frac{(\varepsilon/\varepsilon_{peak})}{1 - (\varepsilon/\varepsilon_{peak}) + (\varepsilon/\varepsilon_{peak})^2} \right] \quad (1)$$

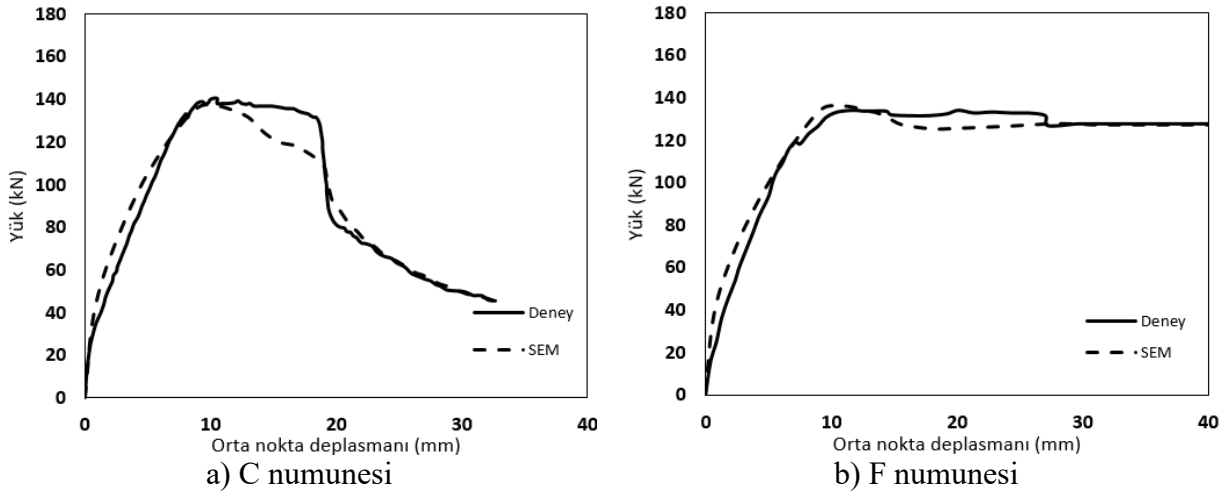
$$\varepsilon_{peak} = \varepsilon_0 (1 + 2000x a_e x V_f^2) \quad (2)$$

- $f_c$  çelik lifli betonun basınç dayanımını,  
 $\epsilon_0$  yalın beton için maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme  
 $\epsilon_{peak}$  çelik lifli beton için maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme  
 $a_e$  lifin özelliğini dikkate alan deneysel sabit  
 $V_f$  hacimsel lif oranını

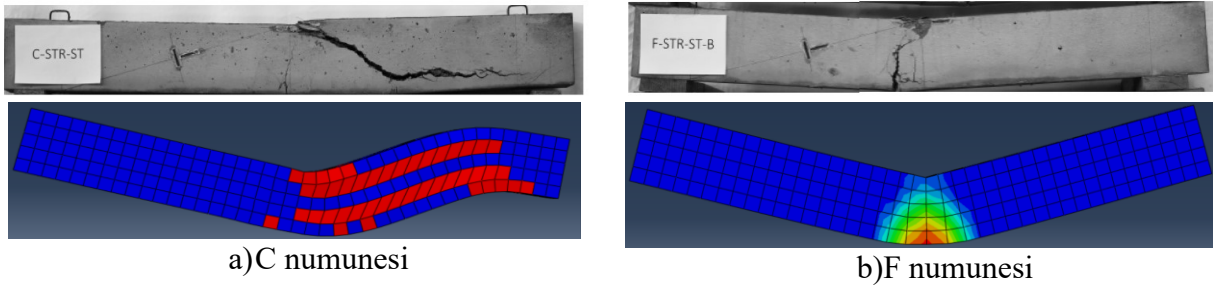
Temsil etmektedir. Betona ait çekme modeli ise, deneysel çalışma ile belirlenmiş olan kırılma enerjisi ile programa tanımlanmıştır.

## 5. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması

Serdar ve diğ., literatürden seçtikleri deneysel çalışma[7] ile doğrulama yapmışlardır. Deneysel çalışma ve numerik analizlere ait yük-deplasman eğrileri şekil 2a ve 2b’de görülmektedir. Ek olarak, numerik ve deneysel çalışmalara ait çatlak gelişimleri Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 2. Sonlu eleman modeli sonuçları ile deney sonuçlarını karşılaştırılması[8]



Şekil 3. Statik deney sonrası kiriş numunelerinin çatlak dağılımı[8]

Şekil 2 ve Şekil 3'den görüldüğü gibi sayısal model sonuçları ile deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Maksimum yük kapasitelerinde deneysel çalışma ve numerik çalışma arasında C numunesi için %2.17, F numunesi için %1.48'lik fark mevcuttur. Hem kesme hem de eğilme numuneleri için numerik çalışma ve deneysel çalışmada çatlak dağılımları birbirine benzerdir. Sonuç olarak oluşturulan sonlu eleman modelinin, lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin davranışında deneysel gerçek davranışa yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

## 6. Parametrik Çalışma

Lifli beton ile üretilen enine donatılı betonarme kirişlerin farklı çekme donatıları etkisi altındaki davranışını incelemek amacıyla kullanılacak olan doğrulanmış malzeme modeli ile parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında numerik modeller oluşturulurken 20 cm adım aralığı ve 8 mm çapında ( $\phi 8/20$ ) enine donatılar kullanılmıştır. Numerik modellere ait donatı oranları Tablo 2'de görülmektedir.

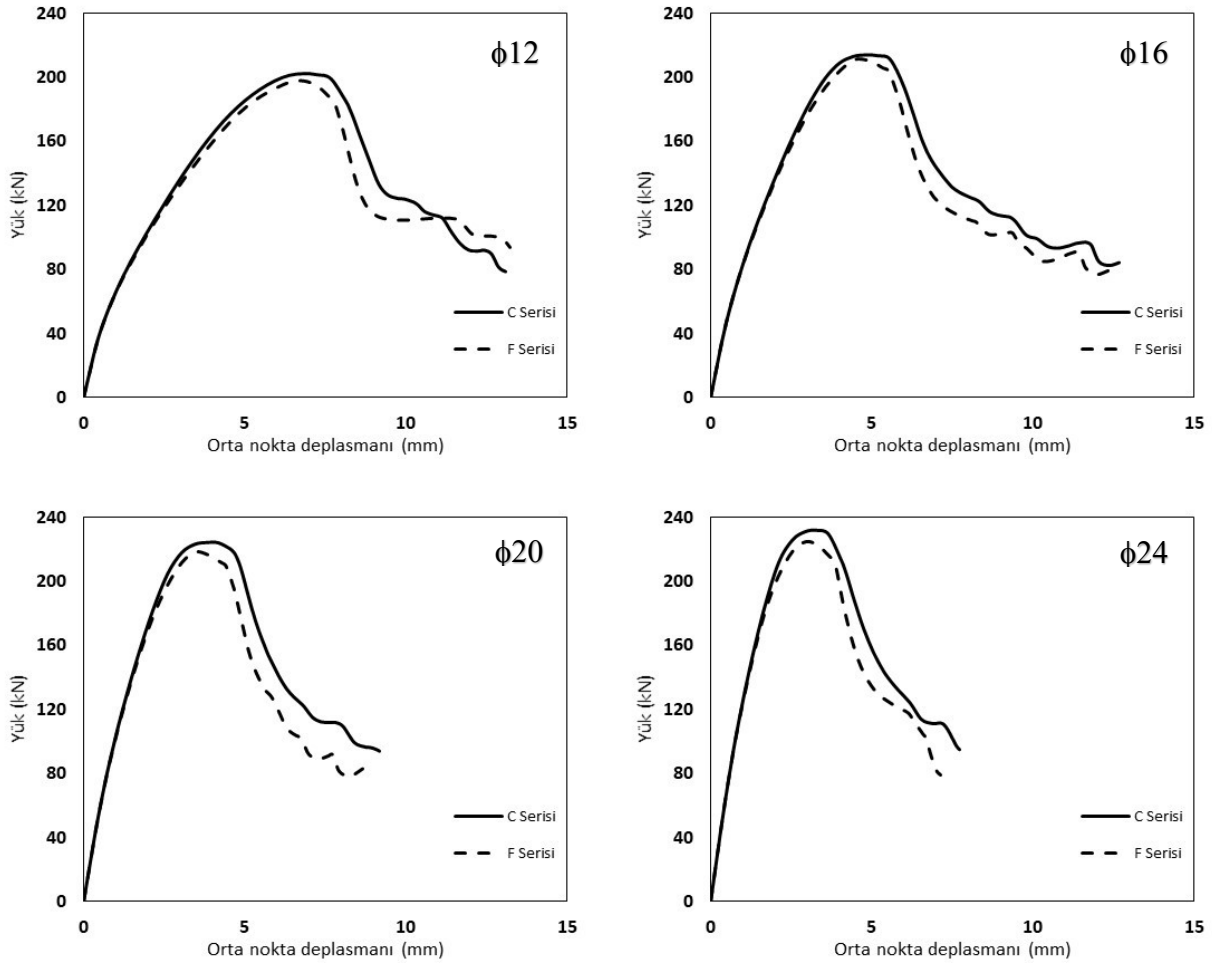
**Tablo 2.** Parametrik çalışma verileri

<i>Seri</i>	<i>Lif oranı (%)</i>	<i>Basınç dayanımı (MPa)</i>	<i>Çekme Donatısı</i>
C	0.50	61.4	2 $\phi$ 12
			2 $\phi$ 16
			2 $\phi$ 20
			2 $\phi$ 24
F	1.00	61.3	2 $\phi$ 12
			2 $\phi$ 16
			2 $\phi$ 20
			2 $\phi$ 24

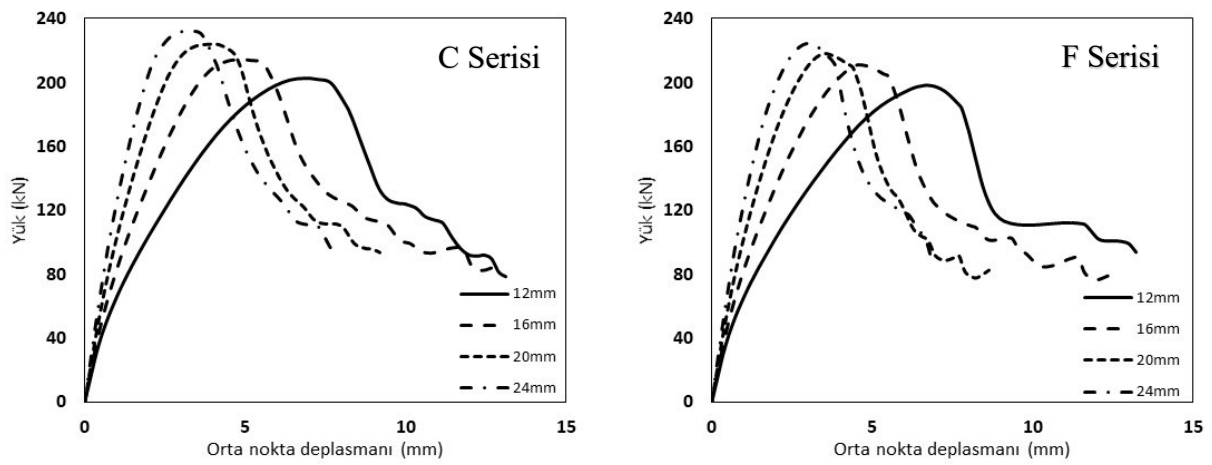
Analiz sonuçlarına göre, klasik beton davranışına benzer şekilde donatı oranının artmasıyla yapı davranışı da sünekten, gevreğe doğru geçiş yapmaktadır. Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri, donatı oranının artışıyla doğru orantılı olarak artmakta iken, donatı oranındaki artış davranışı daha gevrek hale getirmektedir (Şekil 4).

Enine donatısız numuneler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, beton matrisi içerisindeki lif miktarının yapı davranışına doğrudan belirgin etkilerinin olduğu açıkça görülmektedir [8]. Ancak enine donatı kullanılarak üretilen betonarme kiriş modellerinde, lifli beton kullanımının davranışa olumlu katkılarının olduğu fakat hacimce %0,5 oranında lif kullanılan C Serisi numuneler ile %1.00 oranında lif kullanılan F Serisi numuneler arasındaki davranış farkının belirli düzeyde kaldığı ve kırılma şekillerinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığı görülmektedir (Şekil 5).

Enine donatılı modeller incelendiğinde, çalışma kapsamındaki yapı elemanlarının enine donatılı olarak üretilmesi durumunda kırılmaların eğilme kırılması şeklinde olacağı, kesme hasarlarının minimuma indiği anlaşılmaktadır (Şekil 4-5).



Şekil 4. Donatı çapına bağlı yük-deplasman grafikleri



Şekil 5. Donatı çapına bağlı yük-deplasman grafiklerinin toplu halde gösterimi

Analiz sonuçlarından da görüldüğü lifli beton ile üretilen enine donatılı betonarme kirişlerde lif kullanımının, sünek davranışa olumlu katkılarının olduğu ve enerji yutma kapasitelerinde artışa yol açtığı gözlemlenmektedir. Bununla birlikte boyuna donatı çapının artmasıyla beklendiği gibi yük taşıma kapasitesi artmakta ve davranış önemli ölçüde gevrekleşmektedir.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen parametrik çalışmada lif katkılı beton ile üretilen enine donatılı betonarme kirişlerin farklı çekme donatıları etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Literatürden seçilen lif katkılı beton kullanımıyla üretilen enine donatısız betonarme kirişlerin deneysel çalışma sonuçları kullanılarak betonarme kiriş davranışı ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla modellenmiş ve doğrulanmıştır. Doğrulanmış sonlu eleman modeli sonuçlarının deneysel çalışma sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu ve kırılma mekanizmalarının oldukça benzer olduğu görülmektedir.

Lif katkılı beton ile üretilen enine donatılı betonarme kirişlerin farklı çekme donatıları etkisi altında incelenmesinde, enine donatı ile birlikte lif kullanımının yapı elemanının sünek davranışına önemli katkısının olduğu, boyuna donatı oranının artmasıyla davranışın gevrekleştiği, yapı elemanının maksimum yük taşıma kapasitesini arttırdığı anlaşılmaktadır. Ancak beton matrisindeki lif oranı artışının enine donatılı betonarme kirişlerin davranışa önemli bir katkısının olmadığı ve lif oranının %0.50 gibi belirli oranlarda tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca bu sınırlama ile hem maliyet artışının önüne geçileceği hem de beton dökümü sırasında topaklaşma gibi olumsuz etkilerin azaltılacağı belirlenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Kurt G, Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, YL Tezi, 2006.
- [2] Taşdemir M A, Yerlikaya M, Bayramov F, Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar, TMH 2003;4:76-84.
- [3] Ezeldin A S, Balaguru N P, Normal- and High-Strength Fiber-Reinforced Concrete under Compression, Journal of Materials in Civil Engineering, 1992.
- [4] Casanova P, Rossi P, Analysis and Desing of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, Structural Journal, 1997; 94:595-602.
- [5] Koç V, Birinci F, Lifli Betonda Boyut Etkisi Tokluk ve Kırılma Enerjisi, SDU International Thecnologic Science, 2012; 4:24-40.
- [6] Tokgöz S, Tests on Plain and Steel Fiber Concrete-Filled Stainless Stell Tubular Columns, Journal of Constructional Steel Research, 2015; 129-135.
- [7] Zanuy C, Ulzurrun G S, Residual behavior of reinforced steel fiber-reinforced concrete beams damaged by impact. Structural Concrete, 2019; 20(2): 597-613.
- [8] Serdar, A. H., Demirtaş, G., Sarıbiyık, M., & Çağlar, Eğilme Etkisi Altındaki Lifli Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi. Academic Perspective Procedia, 2020 3(2), 976-982.
- [9] Dhakal R P, Wang C, Mander J B, Behavior of steel fiber reinforced concrete in compression, 2005.