

Çelik Fiber İlaveli Betonarme Kirişlerin Çarpma Yükleri Altındaki Davranışının Doğrusal Olmayan Analizi

Ahmet Hamdi Serdar¹, Mehmet Saribiyik¹, Gamze Demirtas² ve Naci Caglar*²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye

Özet

Çelik lifli beton, normal betona göre; süneklik, enerji yutma kapasitesi, kırılma tokluğu, yorulma direnci gibi parametreler açısından çok daha iyi performans gösteren kompozit bir yapı malzemesidir. Bu yapı malzemesi üzerine yapılan çalışmalar, malzemenin yaygın olarak kullanılmaması ve darbe testi için kullanılacak test ekipmanlarının teminindeki zorluklar sebebiyle sınırlı düzeyde kalmıştır. Çelik lifli beton kullanımıyla ilgili çalışmalar deneysel olarak gerçekleştirileceği gibi gerçek yapı davranışını simüle etmek için sayısal modeller de kullanılabilir. Bu çalışma ile, darbe yüküne maruz kalan çelik lifli beton kullanılarak üretilen kirişin darbe etkisi karşısındaki davranışını temsil edebilen doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli (FEM) geliştirilmiştir. Davranışın simüle edildiği modeller ABAQUS paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal modeller ile çelik lifli betonarme kiriş davranışında vurma başlığının etkisi de incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, modelin literatürden seçilen kirişlerin deneysel sonuçlarını yakalamada oldukça başarılı olduğunu göstermiştir. Doğrulama sonrasında, numunelerinin davranışına orta nokta deplasmanı, darbe yükü değeri, donatı oranı ve darbe hızı etkisinin araştırılması için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışma kapsamında 9 farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonuç olarak çelik lifli beton kullanılarak üretilen darbe etkisi altındaki kirişlerin davranışında betondaki lif oranının, kirişin donatı oranının ve çarpma hızının önemli etkilerinin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik lifli beton, kiriş, darbe yükü, ABAQUS.

1. Giriş

Karakteristik çekme dayanımı normal betona göre oldukça yüksek olan çelik lifli beton; normal betona göre süneklik, enerji yutma kapasitesi, kırılma tokluğu, yorulma direnci gibi parametreler açısından da oldukça iyi performans gösteren kompozit bir yapı malzemesidir. Çelik lifli betonda meydana gelen yüksek mukavemet ve sünekliğin sebebi; çatlaklar üzerinde liflerin oluşturduğu köprüleme etkisidir [1]. Bu özelliklerden dolayı çelik fiber beton betonarme yapıların dinamik yüklere karşı dayanımına fayda sağlayacak bir malzeme olarak değerlendirilmektedir [2].

Dinamik etki üzerine gerçekleştirilmiş olan ilk deneysel çalışmalarda yükleme hızının, beton malzeme dayanımını değiştiren parametre olduğu belirlenmiştir [3]. Sonraki yıllarda matrisine farklı malzemelerin katıldığı betonlar da dinamik etki altında incelenmiştir [4]. Standart silindir

Corresponding author. (N. Caglar)

E-mail: caglar@sakarya.edu.tr

Mailing Address: Sakarya University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering Esentepe Campus, 54050, Sakarya – Turkey.

Tel. No: +90 264 295 5729

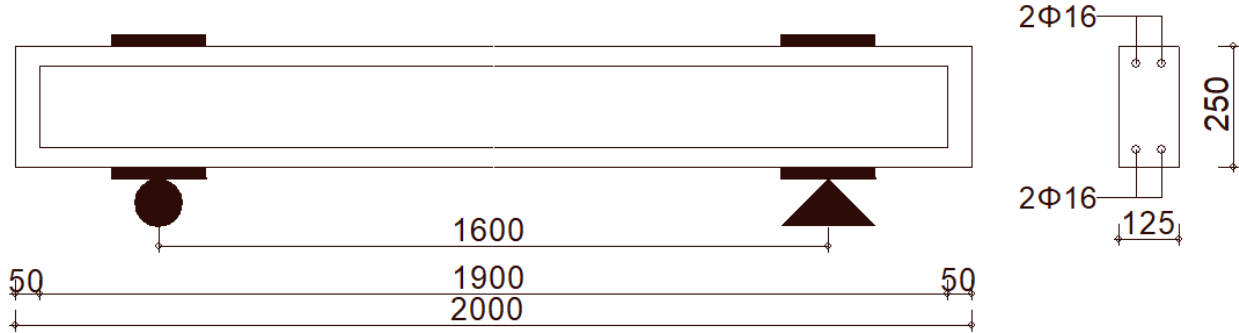
basınç ve kiriş eğilme numuneleri üzerinde gerçekleştirilen testlerde, lifli betonun geleneksel betona göre daha sünek olduğu, çatlama riskini azalttığı ve lif oranına bağlı olarak patlama etkisini daha iyi sönmülediği belirtilmiştir [5].

Bu çalışma kapsamında çelik fiber beton ile üretilmiş betonarme kirişlerin çarpma yükleri etkisi altındaki davranışı incelenmektedir. Doğrusal olmayan sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında ABAQUS programı kullanılmıştır. Sonlu eleman modelinin doğrulamasında literatürdeki deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır. Doğrulanmış sonlu eleman modeli yardımıyla bir parametrik çalışma yapılmıştır.

2. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Literatürden elde edilen, Zanuy ve Ulzurrun [4] tarafından yürütülen deneysel çalışma referans alınarak, deney numunesinin sonlu eleman modeli oluşturulup doğrulanması deneysel sonuçlar ile yapılmıştır.

Zanuy ve Ulzurrun [4] tarafından yürütülen deneysel çalışmada kiriş numunesi 2 m açıklığında 125x250 mm dikdörtgen kesite sahiptir. Basınç ve çekme bölgesinde 16 mm çapında 2 adet nervürlü donatı bulunmaktadır. Kirişlerde etriye bulunmamakta, kesme etkisi beton matrisinde bulunan çelik lifler ile karşılanmaktadır ve şematik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulan referans numunenin malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Deney numunesi % 0.50 çelik lif oranına sahiptir. Deneysel çalışmada Zanuy ve Ulzurrun, numuneye, 200 kg ağırlığındaki vurma başlığının 1,75 m yükseklikten serbest düşüm yapmasıyla dinamik bir test gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 1. Kiriş geometri ve enkesiti

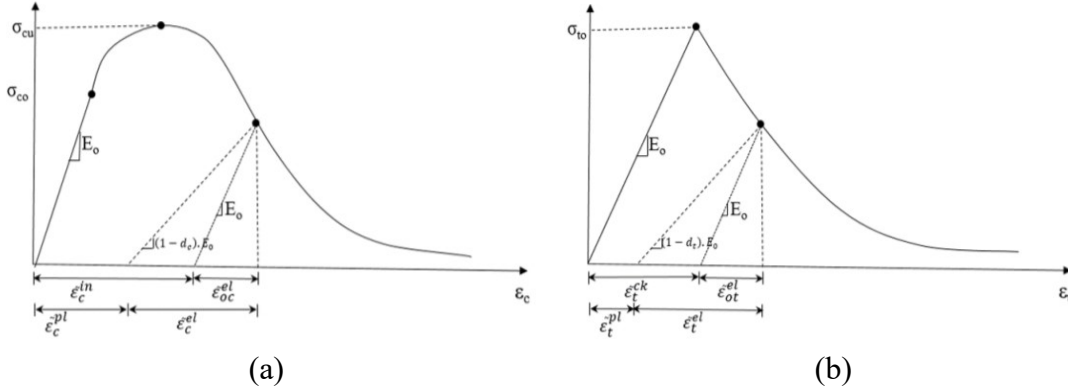
Tablo 1. Beton malzeme özellikleri

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)
B	0.5	Kancalı	60/1.00	830	59.4	6.1	3.14

Zanuy ve Ulzurrun [4] tarafından yürütülen deneysel çalışmanın, sonlu eleman modeli oluşturularak, deneysel çalışma ve nümerik analizden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak sayısal

modelin doğrulanması yapılmıştır. Bu kapsamda ABAQUS sonlu eleman programı ile 3 boyutlu sayısal modeller oluşturulmuş ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

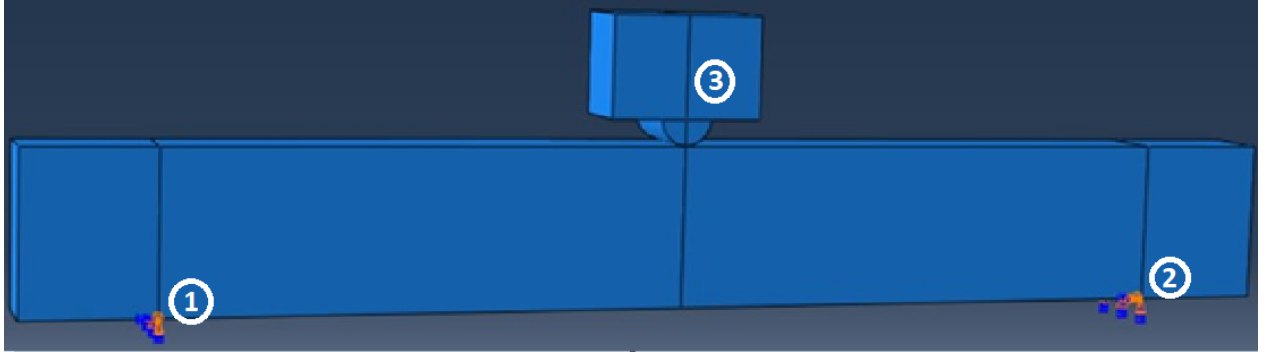
Beton malzemenin doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için Beton Hasar Platisite (BHP) Modeli kullanılmıştır. Betonun basınç gerilmesi ve şekil değiştirmesi arasındaki ilişki Şekil 2a'daki gibi tanımlanmaktadır. Tek eksenli basınç yüklemesi altında, BHP modeli σ_{c0} değerine kadar lineer bir davranış sergilemektedir (Şekil 2a). Bu dayanım aşıldıktan sonra betonda plastik şekil değiştirmeler başlamaktadır. σ_{c0} ile σ_{cu} arasındaki davranış dayanım pekleşmesi, σ_{cu} aşıldıktan sonra oluşan davranış ise dayanım yumuşaması olarak ifade edilmektedir [6]. BHP modelinin tek eksenli çekme altındaki davranışı Şekil 2b'de gösterilmiştir. Beton maksimum çekme gerilmesi (σ_{t0}) değerine ulaşana kadar davranış, 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 [7]. Bu çalışmada çekme rijitliği kırılma enerjisi ile ifade edilmiştir.



Şekil 2. Betonun malzeme davranışı (a) basınç (b) çekme [11]

Çelik donatının mekanik davranışını tanımlanırken 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 vd [8] tarafından önerilen malzeme modeli kullanılmıştır.

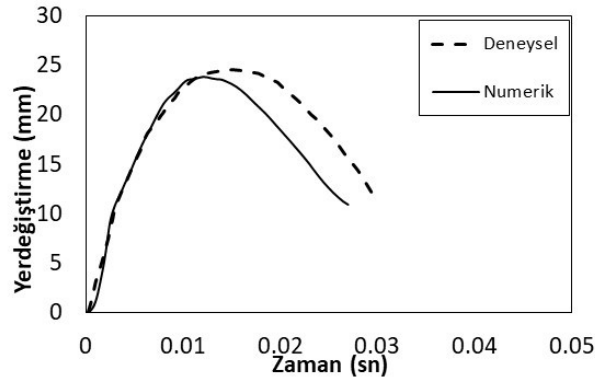
Oluşturulan sonlu eleman modelinde, beton C3D8R, donatı ise T3D2 eleman tipleri ile modellenmiştir. Her iki uçtaki mesnetler çizgisel olarak tanımlanmıştır. Sol mesnetin düşey hareketi, sağ mesnetin ise düşey ve yatay hareketi engellenmiştir. Modelin ağ yapısı hassasiyet analizi ile belirlenmiş ve 50 mm seçilmiştir. Analiz artımı dinamik olduğu için 0.001 sn olarak seçilmiştir. 200 kg olan vurma başlığı Şekil 3 görüldüğü gibi modellenmiş ve rijit cisim olarak tanımlanmıştır. Vurma başlığının hareketi, sadece düşey yönde hareket edecek şekilde sınırlandırılmıştır.



Şekil 3. Model geometrisi (1. Kayıcı Mesnet, 2. Sabit mesnet, 3. Çarpma başlığı)

3. Sonlu eleman Modelinin Doğrulanması

Literatürden seçilen deney numunesinin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve çarpma yükü etkisi altında doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4’de sunulmuştur.



Şekil 4. Yerdeğiştirme-Zaman

Şekil 4’de deney numunesine ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi doğrusal olmayan sonlu eleman modelinin, çelik fiber beton ile üretilmiş betonarme kirişin darbe yükü etkisi altındaki gerçek davranışını simüle etmekte oldukça başarılıdır.

Tablo 2. Sonlu eleman modeli ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Kinetik Enerji (kJ)		Hız (m/s)		Maks. yerdeğiştirme (mm)	
Deney	SEM	Deney	SEM	Deney	SEM
3.43	3.46	5.86	5.86	23.84	24.48

5. Parametrik Çalışma

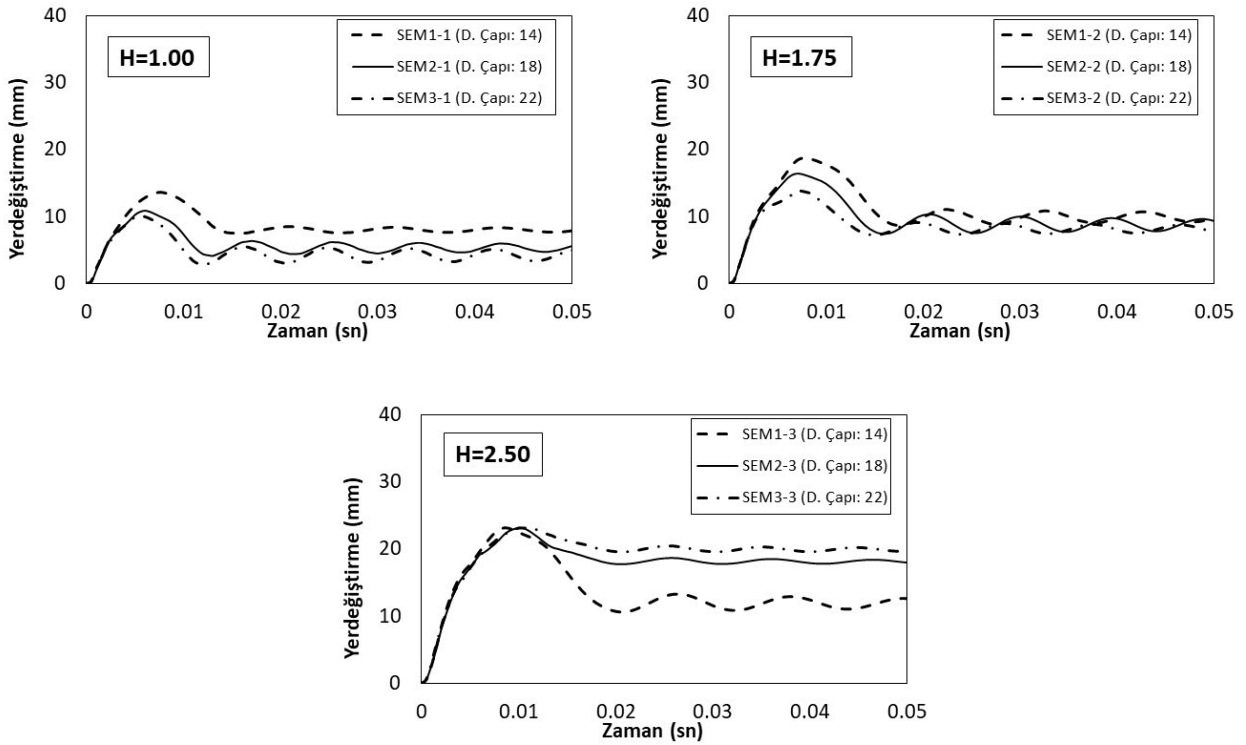
Bu çalışma kapsamında yapılan parametrik çalışmada, çelik fiber beton ile üretilmiş betonarme kirişin kırılma mekanizması üzerinde etkisi bulunan parametrelerden donatı oranı ve

düşüm yüksekliği etkisi incelenmiştir. Parametrik çalışma kapsamında, numunelerin tamamında çekme ve basınç donatıları aynı seçilmiş olup 9 farklı sayısal model incelenmiştir. Parametrik çalışma değişkenleri Tablo 3 de sunulmuştur.

Tablo 3. Parametrik çalışma değişkenleri

Çekme/Basınç Donatısı	Model Adı	Düşüm Yüksekliği (m)
2 ϕ 14	SEM1-1	1.00
	SEM1-2	1.75
	SEM1-3	2.50
2 ϕ 18	SEM2-1	1.00
	SEM2-2	1.75
	SEM2-3	2.50
2 ϕ 22	SEM3-1	1.00
	SEM3-2	1.75
	SEM3-3	2.50

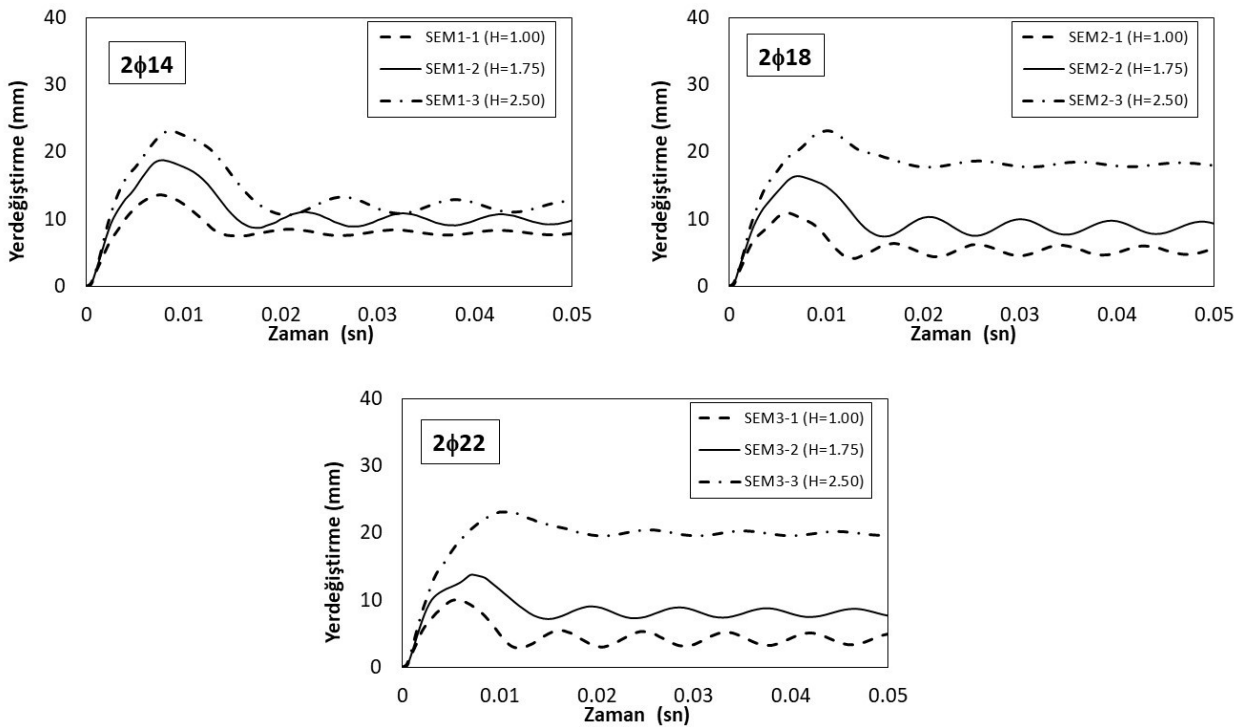
Doğrulanmış sonlu eleman modeli yardımıyla oluşturulan sayısal modellerin analizleri gerçekleştirilmiş ve sayısal modellerin davranışı giriş orta noktasına ait yer değiştirme-zaman değişimi grafikleri ile sunulmuştur. Vurma başlığının üç farklı sabit yükseklikten düşürülmesi durumuna ait üç farklı donatı oranı için giriş davranışı Şekil 9 da gösterilmiştir. Ayrıca analiz sonuçları Tablo 4'te özetlenmiştir.



Şekil 9. Sabit düşüm yüksekliğinde farklı çekme donatı oranları için giriş davranışları

Şekil 9'dan da görüldüğü gibi, H=1.00m ve H=1.75m iken beklendiği gibi donatı oranının artmasıyla maksimum deplasmanlar daha düşük değerlerde kalmaktadır. Kalıcı deplasmanlar ise H=1.00m olması durumunda donatının artmasıyla azalırken, H=1.75m olması durumunda ise tüm donatı oranları için yaklaşık olarak aynı seviyelerde kalmaktadır. Bununla birlikte, H=2.50 m iken maksimum deplasmanlar tüm donatı oranları için neredeyse eşit kalmaktadır. Kalıcı deplasman değerleri SEM2-3 ve SEM3-3 numunelerinde maksimum deplasmana yakın sonuçlar vermektedir. Donatı oranına bağlı olarak oluşan deplasman değerleri, yüksekliğin artması ile değişim göstererek yüksek donatı oranına sahip numunelerde kalıcı hasar oluşumuna sebep olmuştur. Bu numunelerde gevrek hasar oluşumuyla kırılma gerçekleşmektedir.

Çekme Donatısı oranının üç farklı sabit değeri için üç farklı düşüm yüksekliğine karşılık gelen giriş davranışı Şekil 10 da gösterilmiştir. Ayrıca analiz sonuçları Tablo 4'te özetlenmiştir.



Şekil 10. Çekme Donatısı Sabit Düşüm Yüksekliği Farklı Olanı Durumunda Yerdeğiştirme Değerleri

Şekil 10'da verilen grafikler donatı oranı sabit kalırken hızın değişimine bağlı giriş davranışının incelenmesi için oluşturulmuştur. SEM1 grubu modellerin numunelerinde 2φ14 lük boyuna donatı, SEM2 grubu modellerde numunelerde 2φ18 lük boyuna donatı, SEM3 grubu modellerde numunelerde 2φ22 lük boyuna donatı kullanılmıştır. Tüm gruplarda Hızın artmasıyla kalıcı ve maksimum deplasman değerleri artmıştır. Ayrıca donatı oranı yüksek olan numunelerde (SEM2-3, SEM3-3) çarpma yüksekliği arttıkça gevrek hasar oluşarak kalıcı deplasman değerleri maksimum deplasman değerlerine yakın sonuçlar vermektedir.

Tablo 4. Parametrik çalışma numuneleri sonuçları

	Maksimum deplasman (mm)	Kalıcı deplasman (mm)
SEM1-1	13.63	7.60
SEM 1-2	18.77	9.62
SEM 1-3	23.20	13.20
SEM 2-1	10.90	5.02
SEM 2-2	16.43	8.92
SEM 2-3	23.15	18.17
SEM 3-1	10.07	3.67
SEM 3-2	13.78	7.99
SEM 3-3	23.15	19.77

4. Sonuçlar

Literatürden elde edilen deneysel bir çalışma ile lifli beton ile üretilmiş betonarme kirişin sonlu eleman modeli oluşturularak, modelin etkinliği incelenmiş ve deneysel sonuçlar ile sonlu eleman modeli sonuçlarının tutarlı olduğu gözlenmiştir.

Lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin davranışına donatı oranı ve düşme yüksekliğinin etkisini incelemek amacı ile parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 1.00 m, 1.75 m ve 2.50 m yükseklikten çarpma başlığının numune üzerine düşürülmesi ile elde edilen grafikler incelendiğinde tüm donatı oranları için deplasman değerlerinde artış oluşmuştur. Düşme yüksekliğinin artması ile maksimum ve kalıcı deplasman değerleri birbirine yaklaşmaktadır. 2φ14, 2φ18 ve 2φ22 donatı oranları için yapılan analizlerde 1.00 m düşme yüksekliğinde düşük donatı oranında deplasman değerleri daha fazla oluşmuştur. 1.75 m düşme yüksekliğinde kalıcı deplasman değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. 2.50 m düşme yüksekliğinde donatı oranı yüksek olan numunede deplasmanların daha yüksek sonuçlara ulaştığı görülmektedir. Düşme yüksekliğinin artması ile yapı elemanının daha gevrek hasar oluşumu gözlenmektedir.

Çekme donatısı oranı arttıkça davranış sünekten gevreğe doğru değişmektedir. Dolayısıyla lifli beton ile üretilen yapı elemanlarında lifin olumlu katkısından daha fazla yararlanabilmek için çekme donatısı oranı arttırılmamalıdır.

References

- [1] Ezeldin A S, Balaguru N P, Normal- and High-Strength Fiber-Reinforced Concrete under Compression, Journal of Materials in Civil Engineering, 1992.
- [2] Casanova P, Rossi P, Analysis and Desing of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, Structural Journal, 1997; 94:595-602.
- [3] Tokgöz S, Tests on Plain and Steel Fiber Concrete-Filled Stainless Stell Tubular Columns, Journal of Constructional Steel Research, 2015; 129-135.
- [4] Ulzurrun G S D, Zanuy C, Enhancement of Impact Performance of Reinforced Concrete Beams without Stirrups by Adding Steel Fibers, Construction and Building Materials, 2017.

- [5] Altun F, vd, Çelik Lif Katkılı ve Katkısız Betonarme Kirişlerin Basit Eğilme ve Patlama Yükleme ile Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 2006, 22.1: 112-120.
- [6] Hibbit H D, Karlsson B I, Sorensen E P, ABAQUS User's & Theory Manuals, 6.14. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2013.
- [7] 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, 82, 92-115, 2017.
- [8] Mander J B, Priestley M J N, Park R, Seismic design of bridge piers. Research Rep. No. 84-2, Dept. of Civil Engineering. Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1984.