

Betonarme kirişlerde ultra yüksek dayanımlı beton kullanımının eğilme performansına etkisi

Tamer BİROL*, Altuğ YAVAŞ

Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çağış kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 28.09.2017

Kabul Tarihi (Accepted Date): 10.11.2017

Özet

Bu çalışmada, Ultra Yüksek Dayanımlı Beton'un (UYDB) betonarme kirişlerin eğilme davranışına etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel kısımda ortalama 135 MPa'lık UYDB kullanılarak düşük ve yüksek donatı oranlarına sahip dört adet betonarme kiriş üretilmiş ve dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Sayısal kısımda ise test kirişleri için UYDB ve normal dayanımlı beton kullanılarak kesit analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak UYDB'nin özellikle yüksek donatı oranları için eğilme sünekliği, moment kapasitesi ve eğilme rijitliği parametreleri bakımından normal dayanımlı betona göre önemli avantajlar sağladığı görülmüştür. UYDB ile üretilen kirişlerin TS 500'de verilen maksimum donatı sınırının aşılmasına rağmen yeterli sünekliği sağladığı, hatta daha yüksek donatı oranlarının da kullanılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: *Ultra yüksek dayanım, normal dayanım, beton, eğilme, donatı oranı, betonarme kiriş.*

Impact of ultra high strength concrete to flexural performance of RC beams

Abstract

In this study, the effects of Ultra High Strength Concrete (UHSC) on the flexural behavior of reinforced concrete beams have been investigated experimentally and numerically. In the experimental section, four reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios were produced by using UHSC with an average compressive strength of 135 MPa and tested under four-point loading. In the numerical section,

*Tamer BİROL, tbirol@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-2428-6202>

Altuğ YAVAŞ, ayavas@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-2619-8671>

cross section analyzes were carried out by using UHSC and normal strength concrete for test beams and the results were compared. It has been observed that UHSC provides significant advantages over normal strength concrete in terms of flexural ductility, moment capacity and flexural stiffness especially for high reinforcement ratios. It is considered that the beams produced with UHSC provide sufficient ductility even though the limit given in TS 500 is exceeded and higher reinforcement ratios can be used.

Keywords: *Ultra high strength, normal strength, concrete, flexure, reinforcement ratio, reinforced concrete beam.*

1. Giriş

Günümüzde yüksek binalara ve büyük açıklıklı yapı türlerine olan gereksinimlerin artması, beraberinde çok yüksek dayanımlı betonlara olan talebi de arttırmaktadır. Bu tür betonların basınç dayanımları yanında elastisite modüllerinin de geleneksel betonlara göre yüksek olması, yapılarda daha küçük kesitli (narin) eleman kullanımına olanak vermektedir [1]. Buna bağlı olarak yapı ağırlığı, deprem yükleri ve temel boyutları azaltılarak önemli ekonomi sağlanmakta ve daha estetik yapılar elde edilebilmektedir [2]. Ayrıca, bu tür betonlar çok sıkı içyapıları sayesinde geleneksel betonlara göre üstün durabiliteye sahip olmakta ve bunun sonucunda yapıların uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır [3, 4].

Son yıllarda beton teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar (UYDB) daha kolay üretilebilir hale gelmiştir. Genellikle çok ince ve yüksek dayanımlı agrega ve çok düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilen bu tür betonlar için standart üretim teknikleri ile 100 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilebilmektedir [5-7]. Özel karıştırıcılar, yüksek performanslı beton kimyasalları veya özel kür koşulları (ısı, basınç vb.) uygulanması durumunda ise çok daha yüksek dayanımlara (200 MPa ve üzeri) ulaşılabilmektedir [8-11].

Beton teknolojisindeki bu gelişmelere paralel olarak betonarme yapılarda bu betonların kullanımına yönelik çalışmalar da önem kazanmıştır. UYDB, birçok yapı elemanında geleneksel betonlara göre çeşitli avantajlar sağlama potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda en önemli elemanlardan biri kirişlerdir. UYDB, basınç altındaki yüksek şekildeğiştirme kapasitesi nedeniyle kirişlerde yüksek donatı oranlarının kullanılmasına imkan vermektedir. Bu da elemanlardaki taşıma kapasitesini artırarak önemli ekonomi sağlamaktadır. Buna karşın mevcut tasarım yönetmeliklerinde sünek davranış için öngörülen maksimum çekme donatısı oranları, bu tür özel betonların basınç altındaki kapasitesinin etkin olarak kullanılmasını sınırlamaktadır. UYDB'nin yüksek basınç kapasitesinden yararlanmak için yüksek dayanımlı çeliklerin kullanılması ya da geleneksel yumuşak çeliklerin yüksek oranda kullanılması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda, geleneksel donatılı ve UYDB içeren betonarme kirişlerin eğilme davranışlarında oldukça iyi performanslar elde edildiği ve yönetmeliklerde verilen donatı sınırlarının üzerine çıkılmasına rağmen belirli süneklik değerlerinin sağlandığı görülmektedir [12-17]. Ancak beton basınç dayanımı, kesit geometrisi, basınç donatısı oranı, sargı donatısı oranı vb. parametreler süneklik değerlerini etkilemekte ve geleneksel betonarme için yönetmeliklerde verilen tasarım esasları çok yüksek dayanımlı betonlar geçerli olmamaktadır [18]. Bu nedenle, kirişlerde UYDB'nin

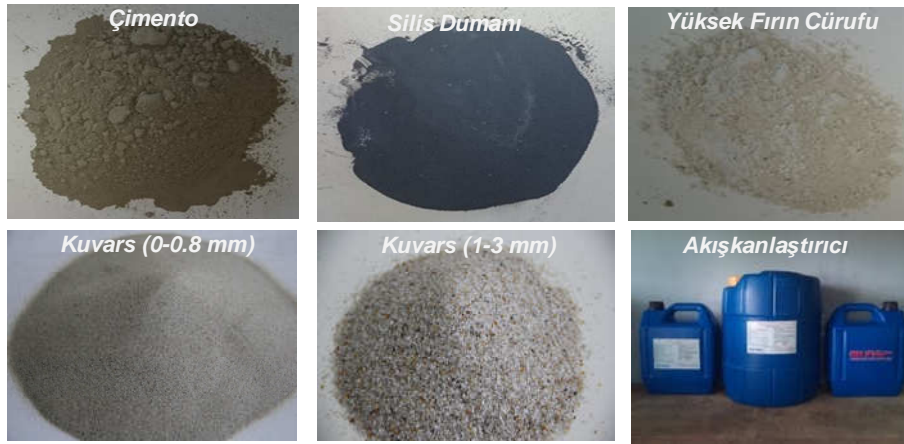
eğilme performansından etkin olarak yararlanabilmek için yeterli sünekliği sağlayacak çekme donatısı oranları üzerinde parametrik deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, UYDB'nin betonarme kirişlerin eğilme davranışına etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için, standart karıştırıcılarla ve standart kür koşulları altında 120 MPa ve üzeri basınç dayanımına sahip betonun üretilmesi öngörülmüştür. Çalışmada UYDB içeren düşük ve yüksek çekme donatısı oranlarına sahip dört adet betonarme kiriş hazırlanmış ve bu kirişlerin dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca UYDB ve normal dayanımlı beton (C25) kullanılarak kesit analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yer değiştirme sünekliği, moment kapasitesi ve eğilme rijitliği parametreleri açısından karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Ultra yüksek dayanımlı betonun özellikleri

Çalışmada incelenen kirişlerde kullanılmak üzere 28 günlük basınç dayanımı en az 120 MPa olan UYDB üretilmesi öngörülmüştür. Betonun bağlayıcı kısmı CEM I 42.5 sınıf Portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufundan oluşmaktadır. Agrega olarak iki farklı boyutta yüksek dayanımlı kuvars agregası kullanılmıştır. UYDB çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip olduğundan, betonun işlenebilirliğinin sağlanması için ASTM C 494 [19] F tipi polikarboksilat eter esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Betonu oluşturan bileşenler Şekil 1'de verilmiştir. Bu bileşenlerin 1 m³ beton için ağırlıkları Tablo 1'de [20], betonun bağlayıcı kısmını oluşturan bileşenlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. UYDB'yi oluşturan bileşenler.

Tablo 1. Betonu oluşturan bileşenlerin miktarları (kg/m³).

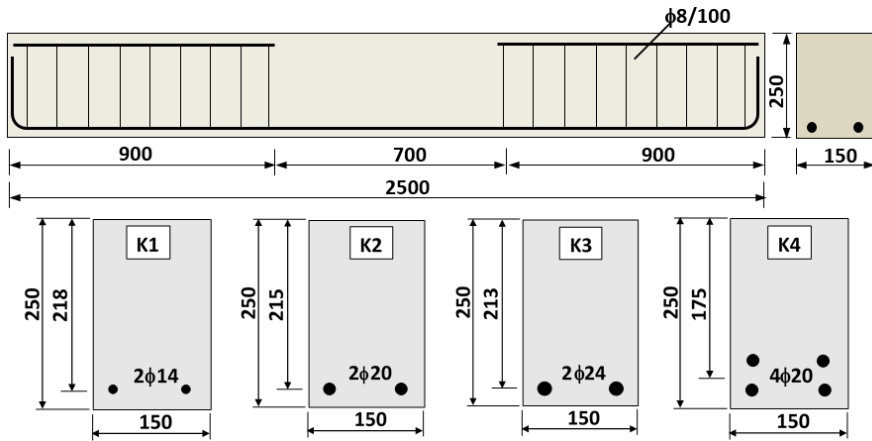
Çimento	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu	Süper Akışkanlaştırıcı	0-0.8 mm Kuvars	1-3 mm Kuvars	Su/ Bağlayıcı
690	138	276	19	530	530	0.18

Tablo 2. Betonun bağlayıcı kısmını oluşturan bileşenlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Bileşen (%)	Çimento	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	19.8	90-93	41.49
Al ₂ O ₃	5.47	0.4-0.9	16.34
Fe ₂ O ₃	3.46	1.0-2.0	0.61
CaO	64.44	0.2-0.7	29.26
MgO	1.30	0.9-1.3	7.68
SO ₃	2.67	-	1.90
Na ₂ O	0.40	0.2-0.6	0.80
K ₂ O	0.67	1.0-1.3	1.10
Cl	0.012	-	0.01
Fe ₂ O ₃	-	1.0-2.0	-
Özgül yüzey (m ² /kg)	380	20000	-
Yoğunluk (g/cm ³)	3.13	2.10	-

2.2. Test kirişlerinin özellikleri

Çalışmada incelenmek üzere 4 adet 150x250x2500 mm boyutlarında test kirişi üretilmiştir. Kirişlerin geometrik özellikleri ve tipik donatı yerleşimleri Şekil 2’de verilmiştir. Kirişlerde basınç donatısı bulunmamaktadır. Kesme kırılmasını önlemek amacıyla salt eğilme bölgesi dışında $\phi 8/100$ etriye kullanılmıştır. Test kirişlerinin boyuna donatıları ve bunlara ait mekanik özellikler Tablo 3’te verilmiştir. Çalışmada düşük çekme donatısı oranını (ρ) temsil etmek amacıyla K1 kirişinde 0.009’luk boyuna donatı oranı kullanılmıştır. K2 kirişi yaklaşık olarak TS 500’de [21] verilen maksimum çekme donatısı oranına (0.019) sahiptir. K3 ve K4 kirişleri ise, TS 500’deki maksimum oranının üzerindeki yüksek donatı oranlarını temsil etmektedir. Bununla birlikte, incelen tüm kirişlerde çekme kırılması oluşması için boyuna donatı oranları dengeli donatı oranının (ρ_b) altında tutulmuştur. Dengeli donatı oranı ρ_b için geleneksel betonarmedeki esaslar kullanılmış ve tüm kirişlerde 0.066 olarak hesaplanmıştır. Test kirişlerindeki çekme donatılarının dengeli donatıya oranları Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Kirişlerin geometrik özellikleri ve tipik donatı yerleşimi.

Çalışmada kullanılan UYDB, 125 dm³ kapasiteli standart bir panmikserde üretilmiş ve el arabası aracılığı ile çelik kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3). UYDB’nin basınç dayanımını belirlemek amacıyla her bir kiriş için 6 adet 100x100x100 mm’lik küp

numune alınmıştır. Kalıptan çıkarılan kiriş ve küp numuneleri test tarihine kadar laboratuvar ortamı sıcaklığında bekletilmiştir. Betonarme kirişlerde kullanılan betonun test günündeki basınç dayanımları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Kirişlerdeki boyuna donatılar ve mekanik özellikleri.

Kiriş Kodu	Çekme Donatısı		f_y (MPa)	f_u (MPa)	ρ / ρ_b
	Miktarı	Oranı (ρ)			
K1	2 ϕ 14	0.009	469	590	0.136
K2	2 ϕ 20	0.019	462	654	0.288
K3	2 ϕ 24	0.028	491	606	0.424
K4	4 ϕ 20	0.043	468	661	0.652

f_y : Boyuna donatının akma dayanımı

f_u : Boyuna donatının çekme dayanımı



Şekil 3. UYDB'nin hazırlanması ve kalıplara yerleştirilmesi.

Tablo 4. Test kirişlerinin ortalama basınç dayanımları.

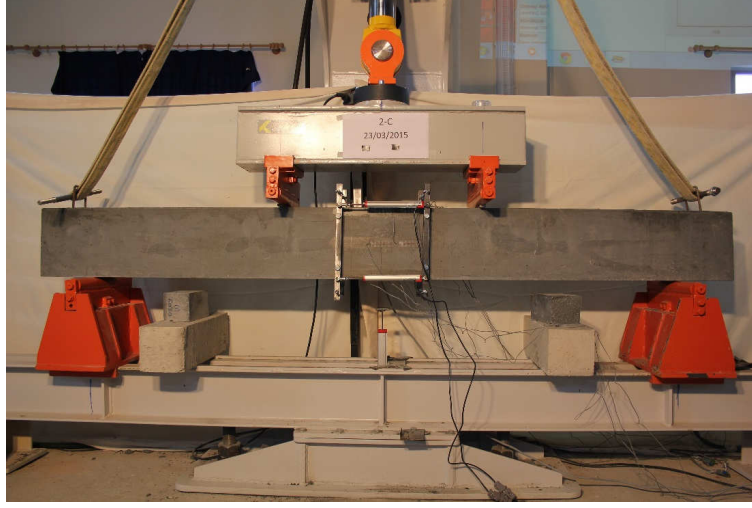
Kiriş Kodu	K1	K2	K3	K4
Test Günü	50	54	45	38
Basınç Dayanımı (MPa)	135	133	132	139

2.3. Test düzeneği ve yapılan ölçümler

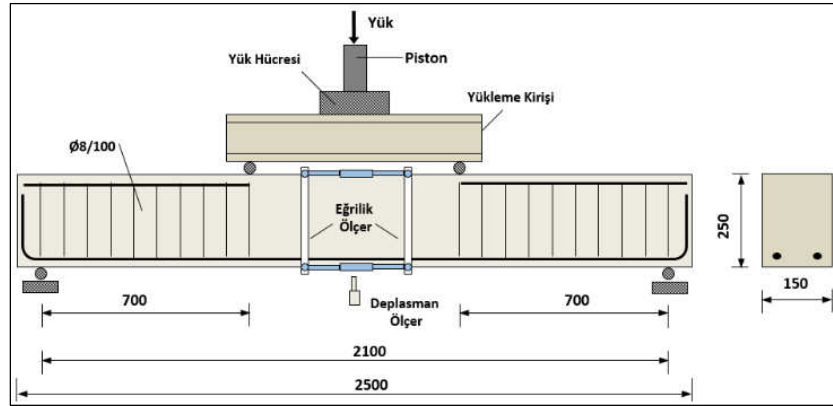
Kirişlerin eğilme testleri, Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan dört noktalı eğilme test düzeneği ile yapılmıştır. Bu düzenedeki 500 kN kapasiteli hidrolik bir yük veren aracılığı ile kirişlerin testleri yer değiştirme kontrollü olarak yapılabilmektedir (Şekil 4).

Numunenin düşey yer değiştirmesini ölçmek için kiriş açıklık ortasına bir potansiyometrik cetvel ve uygulanan yükü ölçmek için yük verenin altına bir yük hücresi (load cell) yerleştirilmiştir. Yük, rijit çelik bir profil aracılığıyla aralarında 700 mm olan iki tekil yüke dönüştürülerek kirişe uygulanmıştır. Kiriş orta bölgesindeki eğriligi (birim dönmeyi) belirlemek amacıyla basınç ve çekme bölgesine iki adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Bu potansiyometrik cetveller en dış beton basınç lifindeki ve en alt beton çekme lifindeki yer değiştirmeleri 300 mm'lik bir bölgede rölatif olarak ölçmektedir. Böylece potansiyometrik cetvellerden elde edilen

kısalma ve uzama değerlerinden yararlanılarak salt eğilme bölgesindeki ortalama eğrilik doğrudan belirlenmiştir (Şekil 5). Ayrıca, salt eğilme bölgesindeki betonun basınç altındaki şekil değiştirme kapasitesini belirlemek amacıyla beton yüzeyine şekil değiştirme ölçerler (strain gauges) yerleştirilmiştir.



Şekil 4. Dört noktalı eğilme test düzeneği.



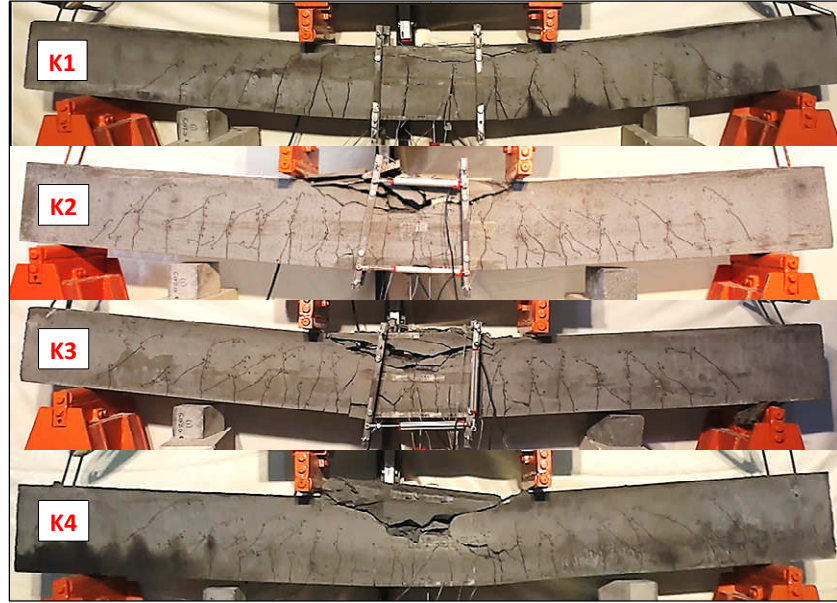
Şekil 5. Şematik yükleme ve ölçüm düzeneği.

3. Deneysel çalışma sonuçları

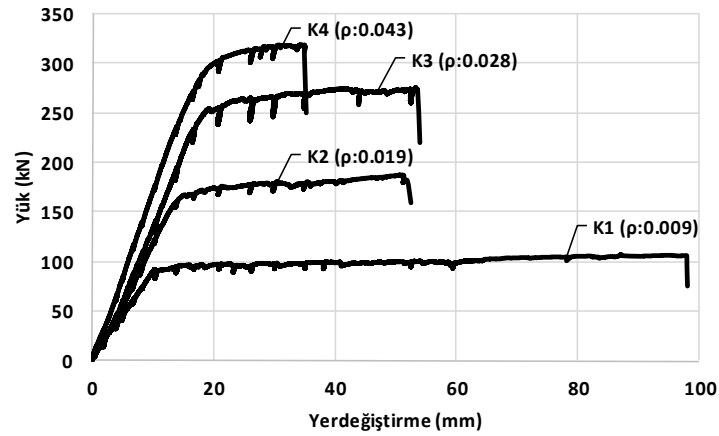
İncelenen kirişler göçme yüküne kadar yükleme yapılarak kırılma mekanizmaları belirlenmiştir. Çekme donatısı oranları dengeli donatı oranının altında olduğu için, beklenildiği gibi, tüm kirişlerde betonda ezilme olmadan önce donatı akmış ve testler basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle sonuçlanmıştır (Şekil 6). Tüm kirişlerde kesme (asal çekme) çatlakları gözlenmiş, ancak kirişlerin kesme kapasiteleri yeterli olduğu için kesme kırılması oluşmadan eğilme kapasitelerine ulaşılmıştır.

Test kirişlerinin eğilme davranışını değerlendirmek amacıyla, her bir kiriş için yük-açıklık ortası düşey yer değiştirme ve açıklık ortasındaki kiriş kesiti için moment-eğrilik grafikleri elde edilmiştir (Şekil 7, 8). K1 ve K3 kirişlerine ait testlerde, eğrilik ölçüm

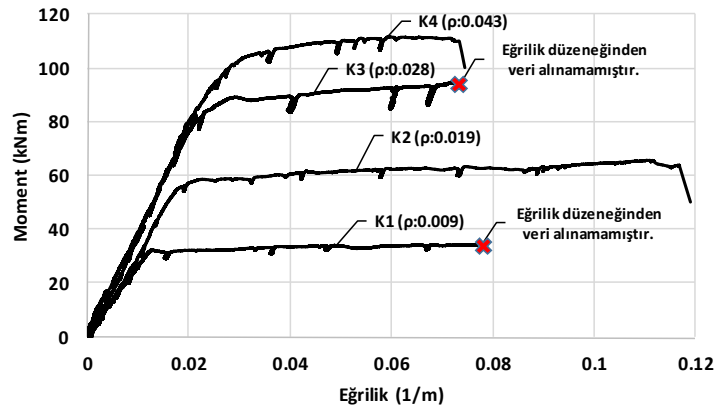
düzeneğinin sabitleme bölgesinde oluşan çatlaklar nedeniyle belirli bir yer değiştirmeden sonra veri alınamamıştır (Şekil 8).



Şekil 6. Eğilme testi sonucu kırılma yüküne ulaşan betonarme kirişler.

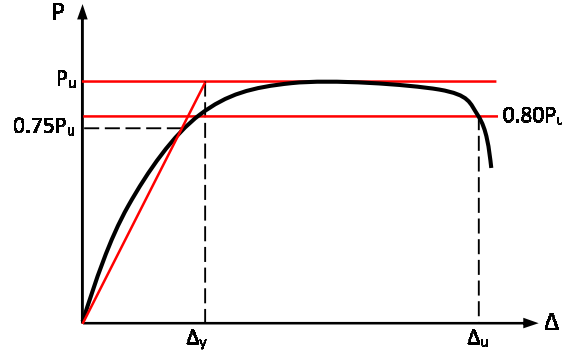


Şekil 7. Test kirişlerine ait yük-düşey yer değiştirme davranışlarının karşılaştırılması.



Şekil 8. Test kirişlerine ait moment-eğrilik davranışlarının karşılaştırılması.

Yük-düşey yer değiştirme ilişkisinden yararlanarak akma yükü (P_y), maksimum yük (P_u), akma yer değiştirmesi (Δ_y) ve maksimum yer değiştirme (Δ_u) değerleri elde edilmiştir. Akma yer değiştirmesinin belirlenmesinde, elasto-plastik davranıştaki akmayı esas alan azaltılmış rijitlik yaklaşımı kullanılmıştır (Şekil 9) [22].



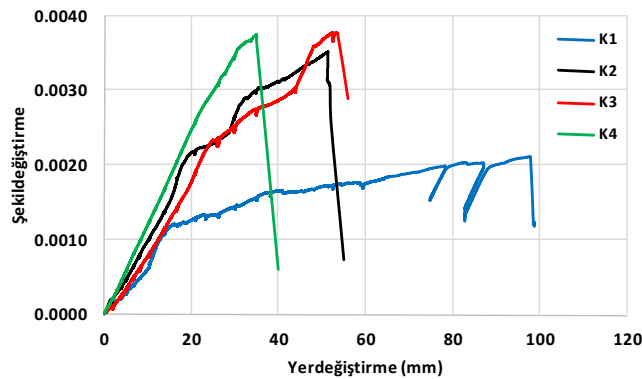
Şekil 9. Akma yer değiştirmesinin belirlenmesi [22].

Maksimum yer değiştirme ve akma yer değiştirmesi kullanılarak her bir kiriş için yer değiştirme sünekliğini ifade eden (Δ_u/Δ_y) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 5). Benzer şekilde moment-eğrilik ilişkilerinden yararlanılarak akma eğriliği (ϕ_y), maksimum eğrilik (ϕ_u) ve eğrilik sünekliğini ifade eden (ϕ_u/ϕ_y) değerleri hesaplanmış ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen karakteristik değerler.

Kiriş Kodu	P_y (kN)	Δ_y (mm)	ϕ_y (1/m)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	ϕ_u (1/m)	Δ_u/Δ_y	ϕ_u/ϕ_y
K1	91.46	12.05	-	107.13	97.87	-	8.12	-
K2	167.31	16.00	0.021	187.19	52.12	0.117	3.26	5.57
K3	251.10	19.80	-	275.32	53.65	-	2.71	-
K4	295.06	19.10	0.029	318.88	35.00	0.073	1.83	2.52

İncelenen tüm kirişler için donatı artışına bağlı olarak, beklenildiği gibi, dayanımların ve çatlama kesit rijitliklerinin (EI_c) artış gösterdiği, buna karşın sünekliklerin azaldığı görülmüştür (Şekil 7,8 ve Tablo 5). Maksimum donatı oranı koşulunun aşıldığı K3 ve K4 kirişlerinde önemli yük ve moment taşıma kapasitesi artışları elde edilirken, sünek davranışın da sağlandığı gözlemlenmiştir (Tablo 5).

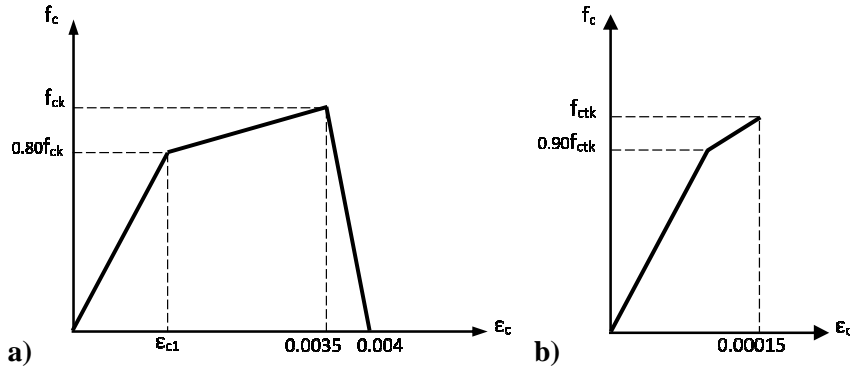


Şekil 10. Betondaki maksimum şekil değiştirmelerin donatı oranına göre değişimi.

Kiriş orta bölgesinde beton yüzeyine yerleştirilen şekil değiştirme ölçerlerden alınan verilerin kiriş düşey yer değiştirmesi ile değişimi Şekil 10’da verilmiştir. En dış beton basınç lifindeki maksimum şekil değiştirmenin genel olarak 0.0035 ile 0.0037 arasında değiştiği belirlenmiştir.

3.1. Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması

Çalışmada incelenen kirişlerin açıklık ortası kesitinde deneysel olarak elde edilen moment-eğrilik ilişkileri teorik kesit analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kesit analizlerinde, UYDB’nin basınç altındaki davranışı için Betonkalender’de [23] önerilen beton modeli, çekme altındaki davranışı için ise Fib 2010’da [24] önerilen model kullanılmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. a) UYDB için basınç davranış modeli [23], b) UYDB için çekme davranış modeli [24].

UYDB’ye ait basınç modelinde elastisite modülü (E_c), (1) bağıntısı ile hesaplanmış ve modeldeki ϵ_{c1} değeri basınç dayanımlarına bağlı olarak elde edilmiştir (Şekil 11).

$$E_c = 8800(f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (1)$$

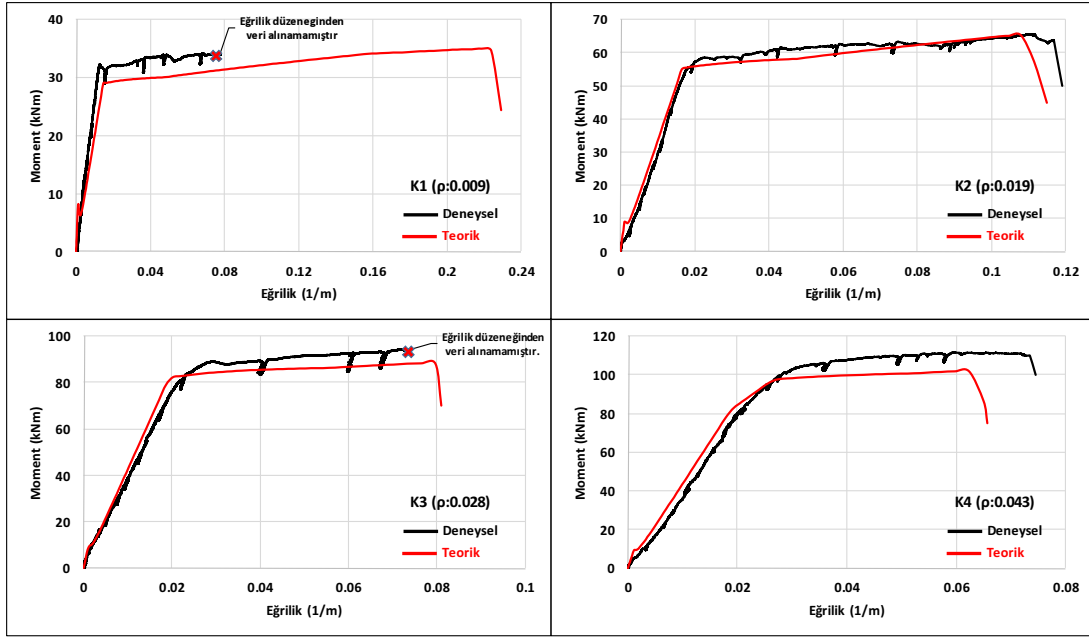
Bu bağıntıda f_{ck} betonun karakteristik basınç dayanımını ifade etmektedir. Betonun çekme dayanımını (f_{ctk}), (2) bağıntısı ile belirlenmiş ve çekmede maksimum uzama şekil değiştirmesi 0.00015 alınmıştır [24].

$$f_{ctk} = 2.12 \ln[1 + 0.1(f_{ck} + 8)] \quad (2)$$

Çelik için ise DBYBHY-2007’de [25] önerilen model esas alınmış ve buna ait karakteristik değerler çekme testlerinden elde edilmiştir. Betonarme kesitler için moment-eğrilik analizleri SAP2000 Section Designer modülü ile gerçekleştirilmiştir [26]. Göz önüne alınan farklı kiriş kesitlerine ait deneysel ve teorik moment-eğrilik grafikleri Şekil 12’de verilmiştir. Kirişlerin kırılma (göçme) durumuna karşı gelen deneysel ve teorik eğilme momentleri Tablo 6’da verilmiştir.

Deneysel ve teorik sonuçların, eğilme rijitlikleri ve kırılma (göçme) momentleri bakımından genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 12, Tablo 6). Eğrilik ölçümleri tamamlanan K2 ve K4 kirişlerinde maksimum eğrilik değerlerinin de uyumlu olduğu söylenebilmektedir (Şekil 12). Buna göre, yapılan kesit analizlerinin

plastikleşmenin meydana geldiği orta bölgedeki (300 mm'lik) eğilme davranışını belirli yaklaşıklıkla temsil edebildiği görülmüştür.



Şekil 12. Test kirişinin deneysel ve teorik moment-eğrilik davranışları.

Tablo 6. Teorik ve deneysel kırılma momentleri.

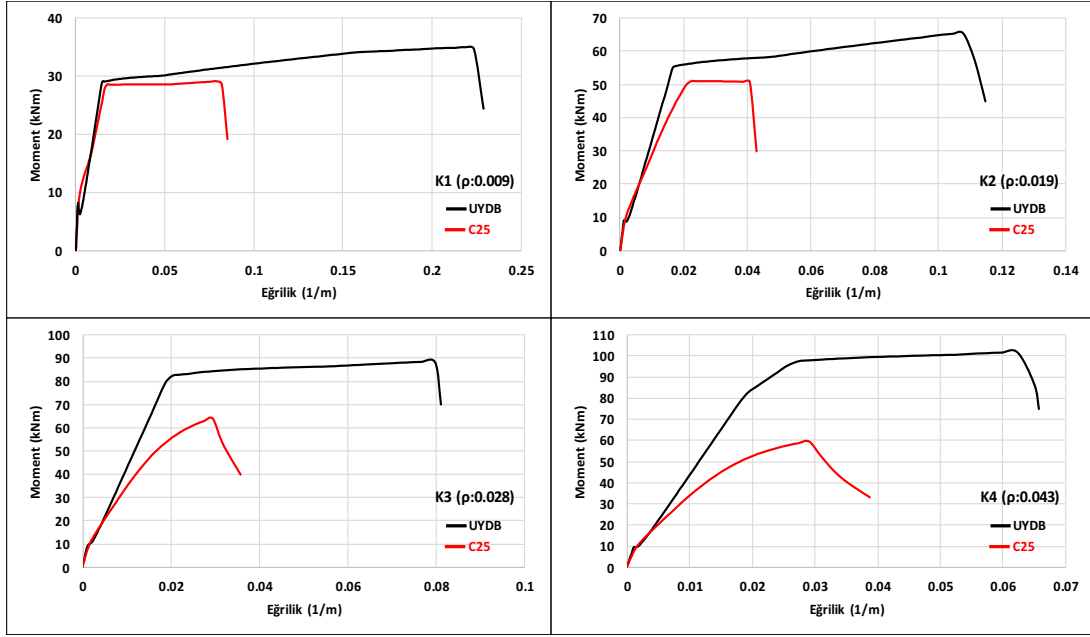
Kiriş Kodu	$M_{u(Teorik)}$ (kNm)	$M_{u(Deneysel)}$ (kNm)	$M_{u(Deneysel)}/M_{u(Teorik)}$
K1	34.58	37.03	1.07
K2	65.19	63.69	0.98
K3	88.04	96.60	1.10
K4	101.80	109.84	1.08

Deneysel ve teorik kırılma (göçme) momentlerinin belirli bir yaklaşıklıkla elde edilmesi, UYDB için 0.0035'lik maksimum şekil değiştirme değerinin beton ezilmesini temsil ettiğini göstermiştir. Bu sonuç, deneysel olarak elde edilen maksimum şekil değiştirme değerleri ile de uyumludur (Şekil 10).

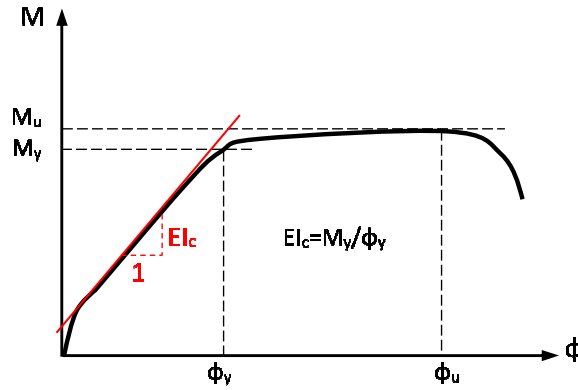
3.2. UYDB ve normal dayanımlı beton içeren kiriş davranışlarının karşılaştırılması

Bu bölümde, betonarme kirişlerde UYDB kullanımının moment taşıma kapasitesi, süneklik ve eğilme rijitliği bakımından normal dayanımlı betona göre avantajlarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Bunun için, çalışmada incelenen kiriş kesitlerinin sadece beton basınç dayanımları değiştirilerek C25 sınıfı beton için moment-eğrilik analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, UYDB'ye ait teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. C25 sınıfı beton için DBYBHY-2007'de önerilen sargısız beton modeli esas alınmıştır. UYDB ve C25 sınıfı beton için maksimum beton şekil değiştirme değeri (ϵ_{cu}) 0.0035 alınmıştır. Her bir kiriş kesiti için elde edilen moment-eğrilik ilişkileri Şekil 13'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Moment-eğrilik ilişkilerinden yararlanarak, Şekil 14'te gösterildiği gibi kesitlerin çatlama rijitlikleri (EI_c), moment taşıma kapasiteleri (M_u), akma eğrilikleri (ϕ_y), maksimum eğrilikleri (ϕ_u) ve eğrilik süneklikleri (ϕ_u/ϕ_y) belirlenmiştir (Tablo 7).



Şekil 13. UYDB ve C25 için moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması.



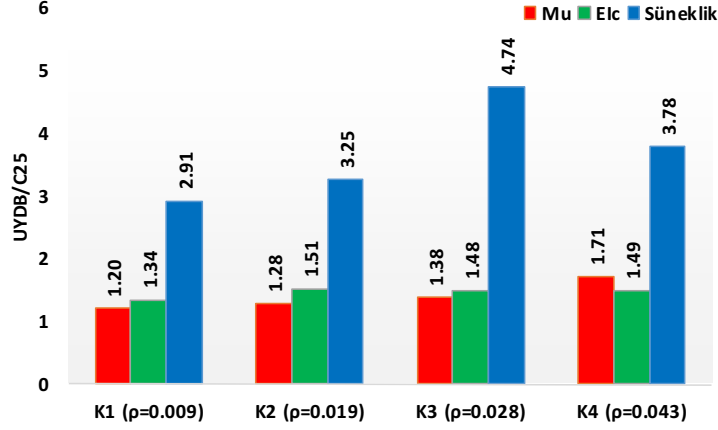
Şekil 14. Moment-Eğrilik ilişkisine ait karakteristik değerler.

İncelenen kiriş kesitleri için UYDB kullanılarak elde edilen süneklik, moment taşıma kapasitesi ve çatlama kesit eğilme rijitlikleri, C25 betonu kullanılarak elde edilen değerlere oranlanmış ve Şekil 15’te karşılaştırılmıştır.

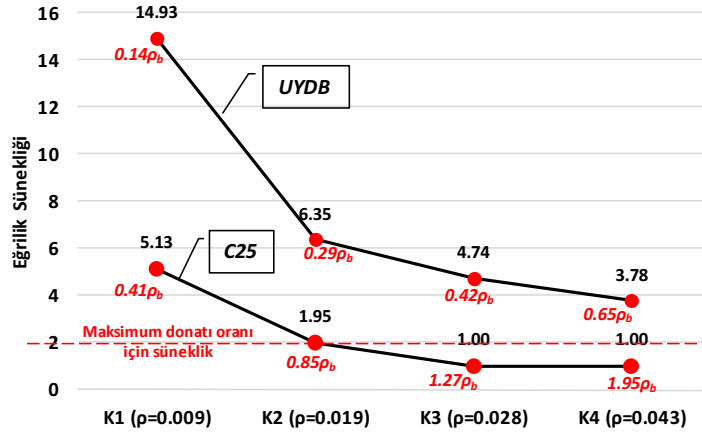
Tablo 7. UYDB ve C25 betonu için kirişlerin eğilme davranışına ait karakteristik parametreler.

Kiriş Kodu	Beton	ϕ_y (1/m)	ϕ_u (1/m)	ϕ_u/ϕ_y	M_u (kNm)	EI_c (kNm ²)
K1	UYDB	0.015	0.224	14.93	34.93	1973
	C25	0.016	0.082	5.13	29.17	1475
K2	UYDB	0.017	0.108	6.35	65.19	3303
	C25	0.021	0.041	1.95	50.97	2194
K3	UYDB	0.019	0.090	4.74	88.26	4201
	C25	-	-	-	64.06	2842
K4	UYDB	0.018	0.068	3.78	101.8	4342
	C25	-	-	-	59.68	2919

UYDB ve C25 betonu için kesit davranışları karşılaştırıldığında; UYDB'nin eğrilik sünekliğini 2.91-4.74 kat, çatlama kesit eğilme rijitliğini 1.34-1.51 kat ve moment taşıma kapasitesini 1.20-1.71 kat artırdığı belirlenmiştir (Şekil 15). C25 betonu kullanılması durumunda, TS 500'te verilen maksimum donatı oranının aşıldığı K3 ve K4 kirişlerinde sünek davranış elde edilemediği görülmektedir (Şekil 13).



Şekil 15. Eğilme davranışına ait parametrelerinin oransal karşılaştırılması (UYDB/C25).



Şekil 16. UYDB ve C25 betonu için kiriş kesitlerinin eğrilik sünekliğinin değişimi.

Şekil 16'da UYDB ve C25 betonu için kiriş kesitlerinde elde edilen eğrilik sünekliğinin donatı oranıyla değişimi gösterilmiştir. K2 kirişinin donatı içeriği, TS 500'e göre maksimum donatıya karşı gelmektedir. Bu kirişte C25 betonu kullanılması durumunda ise eğrilik sünekliği 1.95 olarak elde edilmiştir. Buna göre, incelenen kiriş kesiti için TS 500'de öngörülen en düşük süneklik değerinin 1.95 olduğu söylenebilmektedir. UYDB kullanılması durumunda, %2'lik maksimum donatı oranının aşıldığı kiriş kesitlerinde dahi minimum sünekliğin çok üzerinde süneklikler elde edildiği görülmektedir (Şekil 16). Analizler sonucunda UYDB ile üretilen yüksek donatı oranına sahip kirişlerin yeterli sünekliği sağladığı, hatta daha yüksek donatı oranlarının da kullanılabilirliği söylenebilmektedir.

4. Sonuçlar

Çalışmada, UYDB'nin betonarme kirişlerin eğilme davranışına etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel kısımda ortalama 135 MPa ortalama basınç dayanımına sahip UYDB kullanılarak düşük ve yüksek donatı oranlarına sahip dört adet betonarme kiriş üretilmiş ve dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Daha sonra, test kirişleri için UYDB ve normal dayanımlı beton kullanılarak kesit analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

- Çalışmada kullanılan UYDB, standart karıştırıcılar ve standart kür koşulları altında üretilmekte ve kendiliğinden yerleşen özelliktedir. Bu özellikleri nedeniyle betonun pratikte uygulanabilir olduğu düşünülmektedir.
- Kirişler üzerinde yapılan teorik analizler deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında; literatürde UYDB için önerilen teorik modellerin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.
- Kirişlerdeki çekme donatısı oranları arttıkça UYDB'nin eğilme performansı normal dayanımlı betonla kıyaslandığında önemli artış göstermiştir. UYDB'nin eğilme sünekliğinde 4.74 kat, moment taşıma kapasitesinde %71, çatlamış kesit eğilme rijitliğinde % 51'e varan önemli artışlar sağlayabildiği belirlenmiştir. Bu artışlar, TS 500'de verilen maksimum donatı sınırının aşılması durumu için geçerlidir. Düşük donatı oranları için, beton basınç bölgesindeki yüksek şekil değiştirme kapasiteden yararlanılamaması nedeniyle UYDB'nin performansının etkin olarak kullanılamadığı söylenebilir.

UYDB ile üretilen kirişlerde TS 500'de verilen maksimum donatı sınırının aşılmasına rağmen kirişlerin yeterli sünekliği sağladığı, hatta daha yüksek donatı oranlarının da kullanılabileceği düşünülmektedir.

Çalışmada incelenen kirişlerde süneklik açısından en elverişsiz durumların incelenmesi amaçlandığından sadece çekme donatısı kullanılmıştır. Basınç donatısı ve yeterli sargı donatısı kullanıldığında elde edilen sünekliklerin büyük artış göstereceği söylenebilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, kirişlerde UYDB'nin kullanımının eğilme davranışı bakımından önemli avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu betonlara ait tasarım esaslarının oluşturulabilmesi için çok daha fazla sayıda parametrik deneysel çalışmalara ihtiyaç bulunduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan Ultra Yüksek Dayanımlı Betonun geliştirilmesine 113M432 nolu proje kapsamında destek sağlayan TÜBİTAK'a, akışkanlaştırıcıların teminindeki katkılarından dolayı BASF firmasına ve yüksek fırın cürufunun teminindeki katkılarından dolayı BURSA ÇİMENTO firmasına teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- [1] Voo, Y.L., Poon, W.K. ve Foster, S.J., Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups, **Journal of Structural Engineering**, 136, 1393-1400, (2010).
- [2] Türker, K., Birol, T., Yavaş, A. ve Hasgöl, U., Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton İçeren Kirişlerde Etkin Çelik Lif Tipi İncelemesi, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 16, 776-785, (2016).
- [3] Aitchin, P.C., The durability characteristics of high performance concrete: a review, **Cement and Concrete Composites**, 25, 4-5, 409-420, (2003).
- [4] Voo, Y.L. ve Foster, S.J., Characteristics of ultra-high performance 'ductile' concrete and its impact on sustainable construction, **The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering**, 3, 3, 168-187.
- [5] Yudenfreund, M., Skalny, J., Mikhail, R.S. ve Brunauer, S., Hardened portland cement pastes of low porosity, II. Exploratory studies. Dimensional changes, **Cement and Concrete Research**, 2, 3, 331-348, (1972).
- [6] Roy, D.M., Gouda, G.R. ve Bobrowsky, A., Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques, **Cement and Concrete Research**, 2, 349-366, (1972).
- [7] Bache, H. H., **Densified cement/ultrafine particle-based materials**, In: 2nd int. conference on superplasticizers in concrete, Ottawa, 10-12 June, (1981).
- [8] Wille, K., Naaman, A.E., El-Tawil, S. ve Parra-Montesinos, G.J., Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, **Materials and Structures**, 45, 3, 309-324, (2012).
- [9] El-Dieb, A.S., Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fiber, **Materials and Design**, 30, 4286-92, (2009).
- [10] Kamal, M.M., Safan, M.A., Etman, Z.A. ve Salama, R.A., Production of ultra high-strength concrete using local materials, **Engineering Research Journal**, 36, 1, 91-100, (2013).
- [11] Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C. ve Pu, X., Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials, **Cement and Concrete Composites**, 34, 538-544, (2012).
- [12] Rashid, M.A. ve Mansur, M.A., Reinforced high-strength concrete beams in flexure, **ACI Structural Journal**, 102, 3, 462-471, (2005).
- [13] Jang, I.Y., Park, H.G., Kim, S.S., Kim, J.H. ve Kim, Y.G., On the ductility of high-strength concrete beams, **International Journal of Concrete Structures and Materials**, 2, 2, 115-122, (2008).
- [14] Shin, S.W., Kang, H., Ahn, J. M. ve Kim, D.W., Flexural capacity of singly reinforced beam with 150 MPa ultra high-strength concrete, **Indian Journal of Engineering and Material Science**, 17, 414-426, (2010).
- [15] Bai, Z.Z. ve Au, F.T.K., Flexural ductility design of high-strength concrete beams, **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, (2011).
- [16] Mansur, M.A., Chin, M.S. ve Wee, T.H., Flexural behavior of high-strength concrete beams, **ACI Structural Journal**, 94, 6, 663-673, (1997).
- [17] Shin, S.W., Ghosh, S.K. ve Moreno, J., Flexural ductility of ultra-high strength concrete members, **ACI Structural Journal**, 86, 4, 394-400, (1989).

- [18] Wu, Z., Choi, W., Mirmiran, A., Rizkalla, S. ve P. Zia, P., Flexural behavior and design of high-strength concrete members, **ACI Structural Journal**, 228, 421-438, (2005).
- [19] ASTM C494 / C494M-15a, Standard specification for chemical admixtures for concrete, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, (2015).
- [20] Birol, T., Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2016).
- [21] TS 500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2000).
- [22] Park, R., Ductility evaluation from laboratory and analytical testing, **Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering**, Tokyo, Kyoto, 8, 605-616, (1988).
- [23] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T. ve Fröhlich, S., **Ultra-High Performance Concrete UHPC**, **Betonkalender**, Wilhelm Ernst & Sohn, (2014).
- [24] Fédération International du Béton, **International Federation for structural concrete(fib)**. fib Model code for concrete structures, Ernst & Sohn, (2010).
- [25] DBYBHY, Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, **TDY 2007**, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, (2007).
- [26] CSI, Integrated finite element analysis and design of structures basic analysis reference manual, **SAP2000V.8**. Computers and Structures, Inc. C.A., USA, (2002).