



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Hibrit (GFRP-Çelik) donatılı kirişlerde donatı oranının eğilme davranışına etkileri

The effects of reinforcement ratio on flexural behavior in hybrid (GFRP-Steel) reinforced concrete beams

Yazar(lar) (Author(s)): Nalan KAYA¹, Eda AVANOĞLU SICACIK², Şule BAKIRCI ER³, Yağmur KOPRAMAN⁴, Alper BÜYÜKKARAGÖZ⁵

ORCID¹: 0000-0002-6719-102X

ORCID²: 0000-0003-4154-6758

ORCID³: 0000-0003-1021-3678

ORCID⁴: 0000-0001-9552-3039

ORCID⁵: 0000-0003-1074-7637

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kaya N., Sıcacık A. E., Er B.Ş., Koprman Y. ve Büyükkaragöz A., “Hibrit (GFRP-Çelik) donatılı kirişlerde donatı oranının eğilme davranışına etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 24(3): 1109-1119, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.817398

Hibrit (GFRP-Çelik) Donatılı Kirişlerde Donatı Oranının Eğilme Davranışına Etkileri

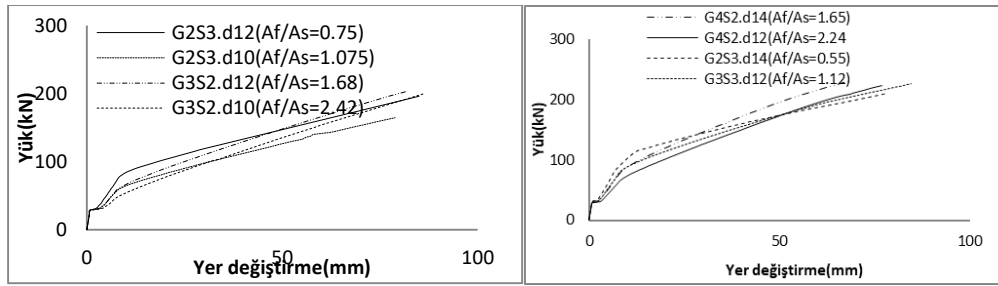
The Effects of Reinforcement Ratio on Flexural Behavior in Hybrid (GFRP-Steel) Reinforced Concrete Beams

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ GFRP donatı oranının hibrit kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisi/Effect of GFRP reinforcement ratio on the flexural behavior of the hybrid beams
- ❖ Çelik donatı oranının hibrit kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisi/Effect of steel reinforcement ratio on the flexural behavior of the hybrid beams

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada denge altı ve denge üstü donatı oranlarına göre tasarlanmış iki grup hibrit kirişin eğilme davranışı teorik ve sonlu eleman programı ile incelenmiştir./In this study the flexural behavior of two group hybrid beams designed according to the under/over balanced reinforcement ratio were investigated by theoretical and finite element analysis.



Şekil. Denge altı ve denge üstü hibrit kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri /Figure. Load-deflection curve of the under/over reinforced hybrid beams

Amaç (Aim)

GFRP ve çelik donatı oranının hibrit kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisinin belirlenmesi./Determining the effect of GFRP and steel reinforcement ratio on the flexural behavior of the hybrid beams.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada hibrit kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri teorik olarak elde edilmiş ve ANSYS sonlu elemanlar programından elde edilen değerler ile karşılaştırılabilir olarak yorumlanmıştır./In this study load-displacement curve of the hybrid beams were obtained with theoretical method and interpreted comparatively with the values obtained from the ANSYS finite element programme.

Özgünlük (Originality)

Farklı oranlarda çelik ve GFRP donatuların kullanıldığı hibrit kirişlerin eğilme davranışlarının belirlenmesi. / Determining the flexural behavior of the hybrid beams with different steel and GFRP reinforcement ratio.

Bulgular (Findings)

Her iki grup kirişte de artan GFRP donatı oranının şekil değiştirme indeksinin arttırdığı, rijitliği ise azalttığı belirlenmiştir./ It has been determined that increasing GFRP reinforcement ratio increases the displacement index and reduces the stiffness of beams.

Sonuç (Conclusion)

Denge üstü tasarlanan kirişlerin yük taşıma kapasiteleri denge altı tasarlanan kirişlere oranla daha büyüktür ancak şekil değiştirme indeksleri daha küçüktür. Her iki grup kiriş içinde GFRP ve çelik donatı oranı eğilme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir./ Load carrying capacities of over reinforced beams are greater than under reinforced beams, but displacement indexes are smaller. In both group of beams the ratio of GFRP and steel reinforcement has great effect on the flexural behavior of beams.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Hibrit (GFRP-Çelik) Donatılı Kirişlerde Donatı Oranının Eğilme Davranışına Etkileri

Araştırma Makalesi / Research Article

Nalan KAYA^{1*}, Eda AVANOĞLU SICACIK², Şule BAKIRCI ER³, Yağmur KOPRAMAN², Alper BÜYÜKKARAGÖZ²

¹Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, İnş. Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

³Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received :28.10.2020; Kabul/Accepted : 29.12.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 02.01.2021)

ÖZ

Bu çalışmada hibrit donatılı kirişlerin eğilme davranışları teorik olarak ve sonlu eleman yöntemi ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında özdeş geometri ve beton basınç dayanımına sahip kirişler; farklı donatı oranına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Teorik çalışma ve sonlu eleman yönteminden elde edilen sonuçlar yük-yer değiştirme eğrileri, yük taşıma kapasiteleri ve şekil değiştirme indeksleri kullanılarak yorumlanmıştır. Lifli polimer/çelik oranının (A_f/A_s) kirişlerin rijitliği, dayanımı ve orta nokta deplasmanları üzerine yaptığı etkiler incelenmiştir. Ayrıca donatı oranının yük taşıma kapasitesi ve şekil değiştirme indeksleri üzerine etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: FRP, GFRP, sonlu eleman yöntemi, donatı oranı, şekil değiştirme indeksi.

The Effects of Reinforcement Ratio on Flexural Behavior in Hybrid (GFRP-Steel) Reinforced Concrete Beams

ABSTRACT

In this study, flexural behavior of hybrid reinforced concrete beams were investigated theoretically and by the finite element method. Within the scope of the study, beams with identical geometry and concrete compressive strength; designed as having different reinforcement ratios. The results obtained from the theoretical work and finite element method were commented by using load-displacement curves, load carrying capacities and strain indices. The effects of the fibrous polymer / steel ratio (A_f / A_s) on the stiffness, strength and midpoint displacement of the beams were investigated. In addition, the effects of reinforcement ratio on load carrying capacity and deformability indexes were investigated.

Keywords: FRP, GFRP, finite element analysis, reinforcement ratio, deformability index.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme taşıyıcı elemanların tasarımında, yapının ömrü boyunca karşılaşılabileceği yük ve çevre etkileri altında, güvenilir bir şekilde kullanımını sürdürmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla istenilen özelliklere sahip yeni nesil malzemelerin üretimi ve inşaat malzemesi olarak kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Lifli polimerler korozyon ve kimyasallara karşı dayanımlarının çeliğe göre yüksek olması, manyetik alan oluşturmamaları, çekme dayanımlarının yüksekliği, bakım masraflarının azlığı, ve hafif olmaları gibi özellikleri ile yapı malzemesi olarak daha çok tercih

edilmeye başlanmıştır. Lifli polimerlerin, onarım ve güçlendirme çalışmalarında şerit ve levha şeklinde kullanılan çeşitlerinin yanında, betonarme elemanlarda donatı olarak kullanılan çeşitleri de bulunmaktadır. İnşaat sektöründe en çok tercih edilen lifli polimerler ise

karbon lifli (CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)), cam lifli (GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)), aramid lifli (AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer)) ve bazalt lifli (BFRP (Bazalt Fiber Reinforced Polymer)) polimerler olarak sıralanmaktadır.

Lifli polimerlerin donatı olarak kullanıldığı durumlarda yapı elemanlarında karşılaşılan en büyük problem ise, malzemenin göçme anına kadar doğrusal elastik bir davranış sergilemesi ve ardından aniden kopması nedeniyle sünek bir davranış elde edilememesidir. Halbuki betonarme kirişlerin tasarımında artan yük etkisi ile birlikte çekme bölgesindeki donatının akmasını takip eden basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile birlikte göçmenin gerçekleşmesi istenilmektedir. Bu nedenle yapı elemanlarında sadece lifli polimer donatı kullanımı yerine çelik ve lifli polimer donatıların (hibrit donatılandırma) birlikte kullanılması araştırmacılar tarafından önerilmektedir. Lifli polimer ve hibrit (çelik-lifli polimer) donatılı kirişler ile ilgili olarak literatürde birçok çalışma mevcuttur.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nbulut@gazi.edu.tr

Lau, D., Pam, H. J. [1] hibrit donatılı kirişlerin sünekliğinin, GFRP donatılı kirişlere göre daha yüksek olduğunu belirtmişler, hibrit kirişlerin tasarımında denge üstü donatılardırma yapılabileceğini ifade etmişlerdir.

Yinghao, L., Yong, Y. [2] çalışmalarında GFRP ve çelik donatı düzenini (iç-dış) değiştirerek kiriş davranışında meydana gelen değişimi incelemişlerdir. Yüksek dayanımlı betondan üretilmiş aynı donatı oranına sahip kirişlerde eğilmede taşıma gücü üzerinde en etkili düzenlemenin, GFRP ve çelik donatıların birlikte dış katmanda kullanıldığı düzen olduğu belirtilmiştir.

El Refai, A., Abed, F., Al-Rahmani, A. [3] çalışmalarında donatı oranı ve GFRP-çelik donatı alanları oranının kiriş davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Etkili donatı oranının dengeli donatı oranından büyük olduğu tüm kirişlerde kırılmanın sünek olarak gerçekleştiği görülmüştür.

Kara, İ. F., Ashour, A. F., Köroğlu, M. A. [4] önerdikleri nümerik yöntem ile yüzeye yakın yapıştırma (NSM) yöntemi ile güçlendirilen hibrit donatılı ve çelik donatılı betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkilerini, deplasmanlarını ve moment kapasitelerini incelemişlerdir.

Pang, L., Qu, W., Zhu, P., Xu, J. [5] hibrit donatılı kirişler için geleneksel süneklik indekslerinden farklı, enerji emilimi kapasitesi ve şekil değiştirilebilirliğin temel alındığı yeni bir indeks önermişlerdir. Ayrıca çalışma kapsamında hibrit donatılı kirişlerde sünek kırılmayı sağlamak için gerekli donatı oranı da önerilmiştir.

Bencardino, F., Condello, A., Ombres, L. [6] çelik, FRP ve çelik-FRP donatılı kirişlerin davranışlarını incelemek için iki boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturmuşlardır. Oluşturulan sonlu eleman modellerinin analiz sonuçları literatürde yer alan deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Qin, R., Zhou, A., Lau, D. [7] hibrit donatılı betonarme kirişlerde lifli polimer/çelik donatı oranının eğilme davranışı üzerine etkilerini sonlu eleman yöntemi ile incelemişlerdir. Oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modelleri ile; denge altı ve denge üstü lifli polimer/çelik donatı oranının davranış üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, denge üstü ve denge altı donatı oranları için öneride bulunulmuştur.

Fahmy, Mohamed F. M., Abd-ElShafy, Zainab E., Wu, Zhishen [8] etriyeleri lifli polimer-çelik ve sadece çelikten oluşan betonarme kirişlerin kesme davranışını incelemişlerdir. Hibrit donatılardırma ile üretilen kirişlerin, sadece çelik etriyeli kirişlere göre kesme dayanımı ve deformasyon yapma özelliklerinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür.

Araba, A. M., Ashour, A. F. [9] GFRP, çelik ve GFRP-çelik donatılı süreklili kirişlerin davranışını incelemişlerdir. Çalışmada çelik ve hibrit donatılı kirişlerde kırılmanın sünek bir şekilde gerçekleştiği gözlenmiş, yeterli süneklik ve rijitliği sağlamada GFRP-çelik donatı oranının önemli bir unsur olduğu belirtilmiştir.

Xingyu, G., Yiqing, D., Jiwang, J. [10] çalışmalarında sadece GFRP donatılı ve farklı oranlarda GFRP ve çelik donatı kullanarak ürettikleri kirişlerin eğilme davranışını araştırmışlardır. Yapılan deneylerde GFRP ve çelik donatılı kirişlerde betondaki en büyük çatlak genişliğinin aynı yük seviyesinde GFRP donatılı elemanlara göre % 50 nin üzerinde azaldığı görülmüştür.

Xiangjie, R., Chunhua, L., Ke, X. [11] çelik donatılı ve çelik – GFRP donatılı betonarme kirişlerin davranışını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Servis yükleri altında aynı donatı oranına sahip hibrit donatılı kirişlerde eğilme taşıma gücü kapasitesinin çelik donatılı kirişlerle hemen hemen aynı olduğu belirtilmiş, bu kirişlerde çatlak gelişimi ve deplasmanın ise çelik donatılı kirişlere göre daha hızlı gerçekleştiği ifade edilmiştir.

Maranan, G.B., Manalo, A.C. , Benmokrane, B., Karunasena, W., Mendis, P., Nguyen, T.Q. [12] hibrit donatılı normal betonarme ve geopolimer beton (geopolymer concrete) kirişlerin davranışını incelemişlerdir. Geopolimer kirişlerde eğilme moment kapasitelerinin, normal betonarme kirişlere göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Abdelkarima, O. I., Ahmeda, E. A., Mohameda, H. M., Benmokrane, B. [13] çalışmaları kapsamında hasarlı GFRP donatılı normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişleri incelemişlerdir. Çalışma kapsamında FRP donatılı kirişler için, kiriş eğrilmesini temel alan yeni bir süneklik indeksi önerilmiştir. Bu yaklaşımla yüksek dayanımlı kirişlerin süneklik indisi normal dayanımlı kirişlere göre daha yüksek çıkmıştır.

Ge, W., Song, W., Ashour, A. F., Lu, W., Cao, D. [14] aynı geometri ve donatılardırma özelliklerine sahip betonarme ve tasarlanmış çimentolu kompozit kirişlerin eğilme davranışını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Donatılardırmanın hibrit olarak gerçekleştirildiği çalışmada tasarlanmış çimentolu kompozit kirişlerin moment kapasiteleri, deplasman ve çatlak genişlikleri için basitleştirilmiş formüller önerilmiştir.

Büyükkaragöz, A., Kalkan İ., Lee J. H. [15] çalışmalarında aramid lifli polimer donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışını analitik ve nümerik olarak incelemişlerdir. Analizlerde beton ve donatı için farklı elemanlar içeren ayrılmış sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kirişlerin yük-deplasman ve servis yükü-deplasman ilişkilerini tahmin etmek amacıyla iki farklı etkili atalet momenti ele alınmıştır. AFRP donatılı kirişlerin sonlu eleman analizinden elde edilen servis yükü-deplasman değerlerinin, etkili atalet momenti ifadelerinden elde edilenlerle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Nümerik analizlerin FRP donatılı kirişlerde kabuk betonunun ezilmesinden kaynaklanan ani rijitlik azalmasına bağlı deplasman tahminlerinde güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalar incelendiğinde hibrit donatılı kirişlerin eğilme davranışına yönelik çalışmaların güncelliğini koruduğu ve lifli polimer/çelik

donatı oranının davranış üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Bu nedenle bu çalışma kapsamında da lifli polimer/çelik donatı oranı birbirinden farklı hibrit donatılı kirişlerin eğilme davranışı teorik olarak ve sonlu eleman yöntemi kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürde yer alan çalışmaların çoğunda lifli polimer donatı olarak GFRP kullanıldığı için bu çalışmada da lifli polimer donatı olarak GFRP kullanılması uygun görülmüştür.

2. METOD (METHOD)

2.1. Kirişlerin Tasarım Özellikleri (Design Properties of Beams)

Çalışma kapsamında 250 mm genişliğinde ve 350 mm yüksekliğinde 3200 mm uzunluğunda özdeş geometri ve beton basınç dayanımına sahip sekiz adet kirişin eğilme davranışı incelenmiştir.

Kirişlerde basınç donatısı olarak 2 adet 10 mm.'lik çelik donatı kullanılmış, etriye olarak ise 8 mm. lik donatı 100

donatılandırma ile geometrik özellikleri Şekil 1'de verilmiştir.

Çelik ve GFRP donatıların mekanik özellikleri de Çizelge 1'de sunulmuştur.

Kirişlerin dönüştürülmüş donatı oranları (ρ_{eff}) ve hibrit donatı için dengeli donatı oranları ($\rho_{b,hibrit}$) Çizelge 2'deki gibi dikkate alınmıştır. Bu çizelgeye göre elemanlar iki gruba ayrılmıştır. Birinci gruptaki kiriş elemanları denge altı olacak şekilde (Grup A), ikinci gruptaki (Grup B) kiriş elemanları ise dengeli ve denge üstü donatı oranına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Her iki grupta da kullanılan cam elyaf donatı (GFRP) çapı 12.7 mm olup, çelik donatı çapı farklılık göstermektedir. Kirişler GFRP ve çelik donatı sayısına, kullanılan çelik donatının çapına göre isimlendirilmiştir. Örnek olarak; G2S3.d12 elemanın çekme bölgesinde 2 GFRP, 3 çelik donatı vardır ve kullanılan çelik donatının çapı 12 mm'dir. Çizelgede ayrıca GFRP donatı alanının çelik donatı alanına oranı (A_f/A_s) da sunulmuştur.

Çalışmada hibrit donatılı kirişler basit mesnetli olarak

Çizelge 1. Çelik ve GFRP donatıların mekanik özellikleri (Mechanical properties of steel and GFRP reinforcements)

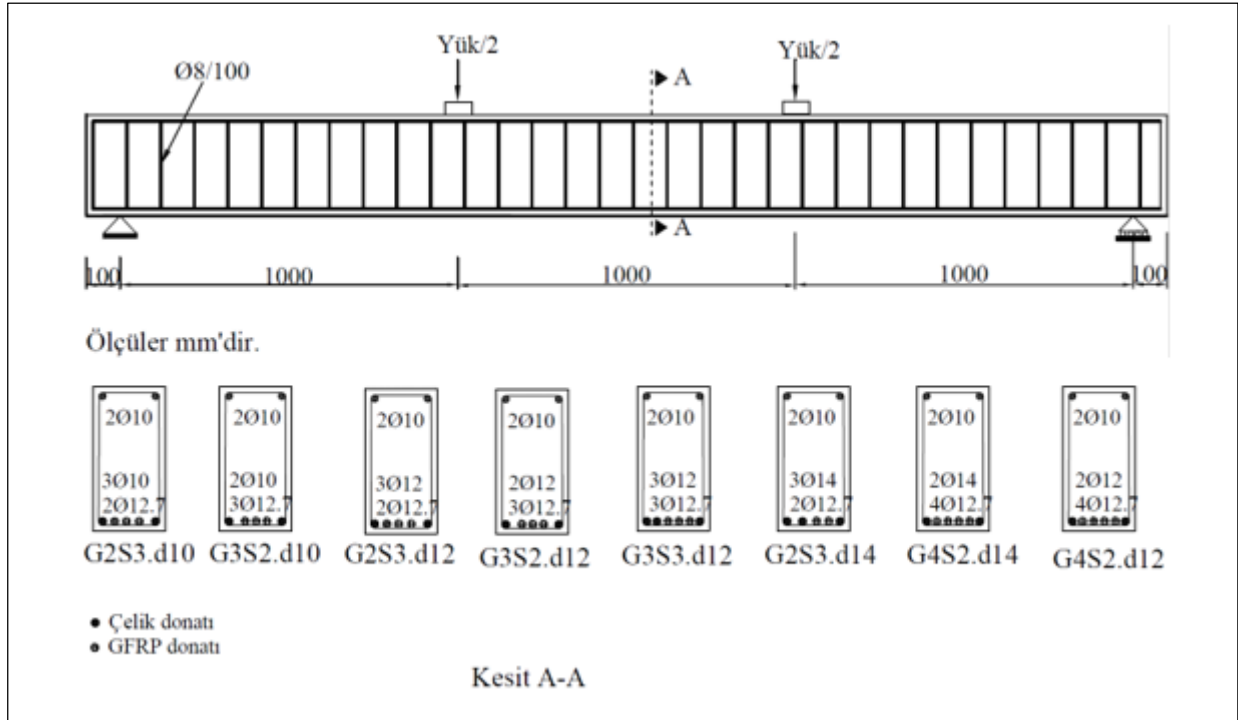
	Akma Dayanımı (f_y)(MPa)	Kopma Dayanımı (f_{fu}) (MPa)	Elastisite Modülü (E) (MPa)	Poisson Oranı (ν)
Çelik	480	-	200000	0.3
GFRP	-	450	35000	0.2

mm. aralıklarla yerleştirilmiştir. Pas payının 20 mm. kabul edildiği kirişlerde beton basınç dayanımı ise 30 MPa olarak belirlenmiştir. Kirişlerin yükleme durumu ve

modellenmiş, monotonik yük etkisi altında analizleri yapılmıştır.

Çizelge 2. Çelik ve GFRP donatıların mekanik özellikleri (Mechanical properties of steel and GFRP reinforcements)

Grup	Eleman	Çelik Donatı çapı (ϕ_s) (mm)	A_f/A_s	GFRP Donatı Oranı (ρ_f (%))	Çelik Donatı Oranı (ρ_s (%))	ρ_{eff} (%)	$\rho_{b,hibrit}$ (%)
A	G2S3.d12	12	0.75	0.29	0.39	0.62	0.74
	G2S3.d10	10	1.07	0.29	0.27	0.52	0.74
	G3S2.d12	12	1.68	0.43	0.26	0.65	0.74
	G3S2.d10	10	2.42	0.43	0.18	0.59	0.74
B	G2S3.d14	14	0.55	0.29	0.53	0.74	0.74
	G3S3.d12	12	1.12	0.43	0.39	0.76	0.74
	G4S2.d14	14	1.65	0.58	0.35	0.87	0.74
	G4S2.d12	12	2.24	0.58	0.26	0.80	0.74



Şekil 1. Kiriş elemanları yükleme durumu, donatı ve geometrik özellikleri (Loading system, reinforcement and geometrical properties of beam specimens)

2.2. Sonlu Eleman Modeli (Finite Element Model)

Kirişlerin üç boyutlu sonlu eleman modelleri Ansys v14.0 [16] paket programı ile oluşturulmuştur. Kiriş elemanları oluşturulurken beton, çelik ve GFRP donatı ayrı usulde modellenmiştir. Ayrıca mesnet ve yükleme plakaları için de ayrı elemanlar kullanılmıştır. Çalışma kapsamında teorik çalışma ve sonlu eleman yöntemlerinin her ikisinde de beton ve çelik ile GFRP donatıları arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmiştir.

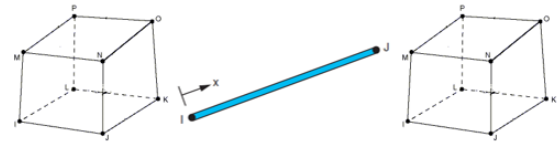
2.3. Eleman Tipleri (Element Types)

Kirişlerin modellenmesinde beton için Solid65 elemanı, çelik ve GFRP donatılar için Link180 elemanı, mesnet ve yükleme plakaları için ise Solid185 elemanı kullanılmıştır (Şekil 2).

Solid65 elemanı her düğüm noktasında üç ortogonal doğrultuda öteleme serbestliğine sahip sekiz düğüm noktalı bir elemandır.

Elemanın en önemli özelliklerinden biri ise doğrusal olmayan malzeme davranışına sahip olmasıdır.

Çelik ve GFRP donatıların modellenmesinde kullanılan Link180 elemanı ise her düğüm noktasında üç ortogonal yönde öteleme serbestliğine sahip iki düğüm noktalı bir elemandır. Solid185 elemanı ise üç boyutlu katıların modellenmesinde kullanılan, her düğüm noktasında üç serbestliğe sahip toplamda sekiz düğüm noktalı bir elemandır [16].



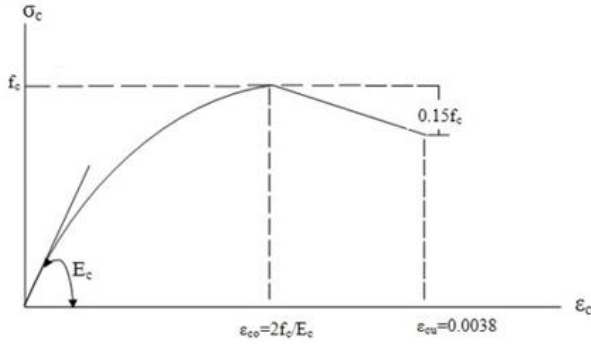
Şekil 2. Sonlu eleman modellerinde kullanılan eleman tipleri (Element types used in finite element models)

2.4. Malzeme Modelleri (Material Models)

Beton, çelik ve GFRP donatı için sonlu elemanlar yöntemi ve analitik çalışmanın her ikisinde de kullanılan malzeme modelleri aşağıda özetlenmiştir.

2.4.1. Beton malzeme modeli (Concrete material model)

Birden çok malzemenin belirli ölçülerde bir araya gelmesi ile oluşan beton, basınç ve çekme gerilmeleri etkisinde farklı davranış özelliklerine sahip bir malzemedir. Basınç gerilmeleri altında, belirli bir bölgede doğrusal elastik özelliğe sahip betonda, bu bölgenin aşılması ile davranış farklılaşmaktadır. Çalışma kapsamında betonun basınç etkisi altında gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri için Hognestad [17] tarafından önerilen bağıntılar kullanılmıştır. Hognestad tarafından önerilen beton modelinde gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri, birim şekil değiştirmelerin en büyük basınç gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirmeden küçük ve eşit olması durumunda parabolik, bu değerden sonra ise doğrusal olarak değişmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Hognestad beton modeli (Hognestad concrete model)

Hognestad beton modelinde artan parabolik ve azalan doğrusal kısımlarda oluşacak gerilmelerin hesabı ise Eşitlik 1 ve 2 ile ifade edilmiştir.

$$\sigma_c = f_c \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad \epsilon_c \leq \epsilon_{co} \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_c \left[1 - 0,15 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_c - \epsilon_{co}} \right) \right] \quad \epsilon_{co} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \quad (2)$$

Bu denklemlerde f_c en büyük basınç dayanımını, ϵ_{co} en büyük basınç dayanımına karşı gelen birim kısalmayı, ϵ_{cu} betonadaki en büyük birim kısalmayı ifade etmekte olup 0.0038 değerine eşittir. ϵ_{co} ise Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_{co} = \frac{2f_c}{E_c} \quad (3)$$

Burada E_c betonun elastisite modülü olup Eşitlik 4’te verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$E_c = 12680 + 460f_c \quad (4)$$

Ansys paket programında betonun üç eksenli gerilme altındaki davranışı, William ve Varneke [18] tarafından önerilen kırılma modeli ile tanımlanmaktadır.

2.4.2. Çelik ve GFRP malzeme modelleri (Steel and GFRP material models)

Çelik donatının gerilme birim deformasyon davranışı iki kısımda ele alınmaktadır;

$$f_s = E_s \epsilon_s, \quad \epsilon_s < \epsilon_{sy} \quad (5)$$

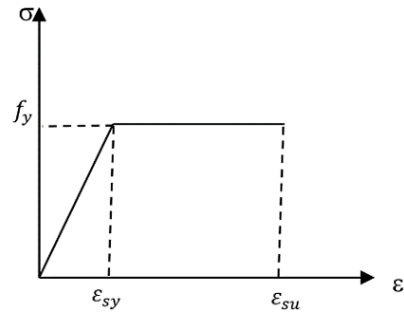
$$f_s = f_y, \quad \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s < \epsilon_{su} \quad (6)$$

Eşitlik 5 ve 6’da f_s çekme gerilmesini, E_s çelik elastisite modülünü, ϵ_s çelikteki birim şekil değiştirmeyi, ϵ_{sy} çeliğin akma anındaki birim şekil değiştirmesini, f_y çeliğin akma dayanımını, ϵ_{su} çeliğin kopma birim uzamasını göstermektedir (Şekil 4).

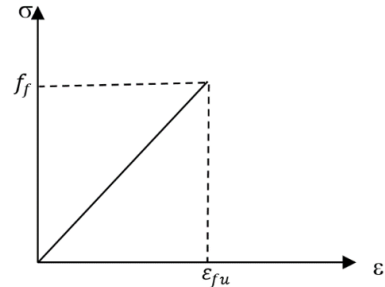
GFRP donatı ise kopma anına kadar doğrusal davranmaktadır (Şekil 5); GFRP donatıda oluşacak gerilmeler de Eşitlik 7 ile hesaplanmaktadır.

$$f_f = E_f \epsilon_f \quad \epsilon_f \leq \epsilon_{fu} \quad (7)$$

Burada f_f GFRP donatıda oluşan gerilmeyi, E_f GFRP elastisite modülünü, ϵ_f GFRP birim şekil değiştirmesini, ϵ_{fu} kopma birim şekil değiştirmesini göstermektedir.

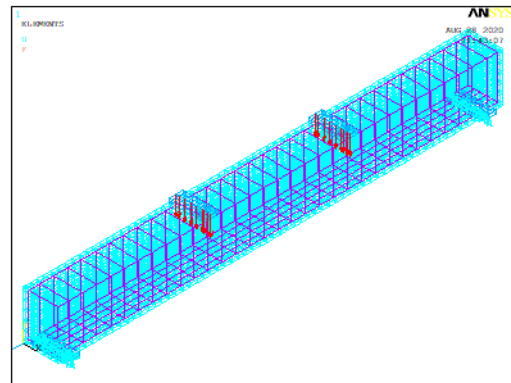


Şekil 4. Çelik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (Stress-strain curve of steel)



Şekil 5. GFRP gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (Stress-strain curve of GFRP)

Sonlu eleman analizleri doğrusal olmayan usulde gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen yük- yer değiştirme eğrileri analitik çalışmadan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kiriş sonlu eleman modellerinden biri Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 6. Kiriş sonlu eleman modeli (finite element model of the beam)

2.5. Analitik Çalışma (Analytical Work)

Betonarme kirişlerde sünek davranış için sınırlı durum, dengeli donatı oranına göre belirlenir. Dengeli donatı oranı, eğilme altındaki betonarme bir kirişin taşıma gücüne, çekme donatısının akması ve en dış basınç lifindeki betonun aynı anda ezilmesi ile ulaşılmasını sağlayan donatı oranıdır. Betonarme kirişlerde dengeli donatı oranı (ρ_{sb}) TS500(2000)'e göre [19] Eşitlik 8 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_{sb} = \frac{A_{sb}}{bwd} = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_{yd}} \frac{E_s \epsilon_{cu}}{f_{yd} + E_s \epsilon_{cu}} \quad (8)$$

Sünek davranış için, çelik donatılı kirişlerin denge altı donatı oranına göre tasarlanması, FRP donatılı kirişlerin ise denge üstü donatı oranına göre tasarlanması önerilmektedir (ACI 440.1R-15). FRP donatılı kirişlerde dengeli donatı oranı basınç bölgesindeki beton en büyük birim kısalmasına ulaştığında, FRP donatının kopma birim uzamasına eriştiği an için belirlenir. FRP donatının gerilme birim şekil değiştirme eğrisi doğrusal olduğu için yani malzeme akmadan kopma gerçekleşeceği için göçme ani olacaktır. FRP donatılı kirişlerde dengeli donatı oranı (ρ_{fb}) ise ACI 440.1R-15'a göre [20] Eşitlik 9 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_{cd}}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (9)$$

Literatürde hibrit kirişlerde dengeli ve efektif donatı oranlarının belirlenmesi için birçok denklem kullanılmaktadır. Bu çalışmada hibrit donatılı kirişlerde GFRP ve çelik donatının akma/kopma dayanımları kullanılarak (Eşitlik 10) dönüştürülmüş donatı oranı hesaplanmıştır.

$$\rho_{eff} = \rho_f + \rho_s \frac{f_y}{f_{fu}} \quad (10)$$

2.5.2. Taşıma gücü hesabı (Calculation of bearing capacity)

Hibrit kirişlerin taşıma gücü hesabı için yapılan kabuller betonarme kirişlerin taşıma gücü hesaplarındakine benzer şekilde olup aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- 1- Beton, FRP ve çelik donatı için malzeme modelleri kabul edilmektedir.
- 2- Beton ve donatı arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmektedir.
- 3- Aynı seviyedeki FRP ve çelik donatıların birim deformasyonlarının aynı olduğu kabul edilmektedir.

- 4- Kesitte çatlama meydana geldikten sonra betonun çekme dayanımı ihmal edilmektedir.

Yukarıdaki kabuller dikkate alınarak kiriş elemanlarının teorik moment eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Kullanılan yöntemde basınç bölgesindeki beton şeritlere ayrılmıştır ve Hognestad beton modeli (Şekil 3) kullanılarak her bir şeridin ağırlık merkezine karşılık gelen birim şekil değiştirme ve gerilmeler hesaplanmıştır. Çelik ve GFRP donatı için ise Şekil 4 ve 5'te sunulan gerilme birim şekil değiştirme modelleri kullanılmıştır.

Yöntem adımları aşağıdaki gibidir;

- Basınç bölgesindeki beton hacim şeritlere bölünmüştür.
- Basınç bölgesinde en dış lifteki beton için birim kısalma değeri seçilmiştir.
- Tarafsız eksenin derinliği için bir kabul yapılmıştır ve yatay kuvvet dengesinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir.
- Yatay kuvvet dengesi sağlandıktan sonra basınç ve çekme bölgesindeki donatı seviyelerindeki birim boy değişimleri ve kuvvetler hesaplanmıştır.
- Moment ve eğrilik hesaplanmıştır.
- Beton birim kısalması için yeni bir değer seçilerek 2-5 adımlar tekrarlanmıştır.

Her bir momente karşılık gelen yük değeri Eşitlik 11 ile hesaplanmıştır. Denklemde "a" mesnet ile uygulanan yük arasındaki uzaklığı göstermektedir.

$$P = \frac{2M}{a} \quad (11)$$

Eğilme rijitliği ve yük değeri hesaplandıktan sonra her bir yük seviyesine karşılık gelen deplasman değeri Eşitlik 12 ile hesaplanmıştır.

$$\delta = \int_0^{L/2} \frac{M}{EI} x dx \quad (12)$$

3. BULGULAR (RESULTS)

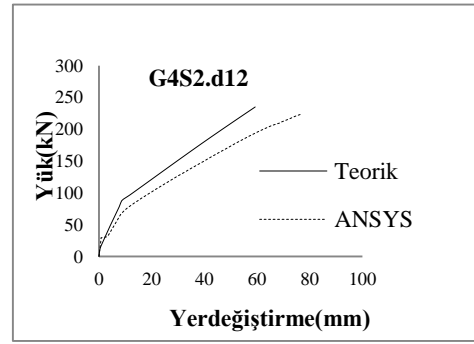
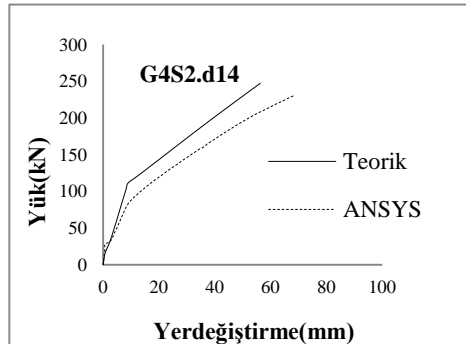
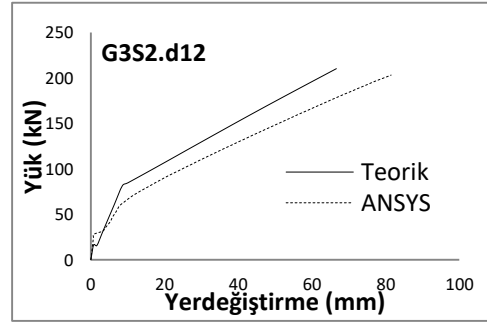
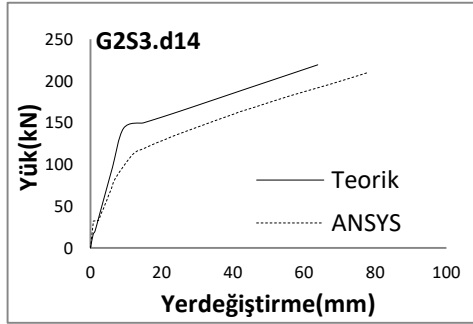
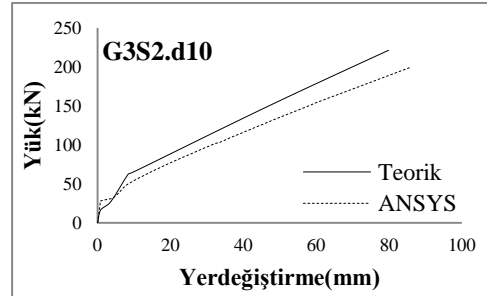
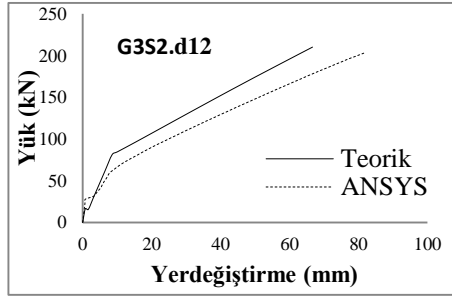
Kirişlerinin teorik ve sonlu eleman yönteminden elde edilen yük taşıma kapasiteleri (P) ve orta nokta deplasmanları (δ) karşılaştırmalı olarak Çizelge 3'te verilmiştir. Teorik ve sonlu eleman analizi ile elde edilen taşıma güçleri karşılaştırıldığında sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Orta nokta deplasmanları incelendiğinde ise sonuçların %73 ile %98 oranlarında uyumluluk gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 3. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of the analysis results)

Grup	Eleman No	A_f/A_s	P_{teorik} (kN)	P_{ansys} (kN)	P_{teorik}/P_{ansys}	δ_{teorik} (mm)	δ_{ansys} (mm)	$\delta_{teorik}/\delta_{ansys}$
A	G2S3.d12	0.75	197.7	196	1	70.9	85	0.83
	G2S3.d10	1.07	181	164.5	1.1	77.4	78.9	0.98
	G3S2.d12	1.68	210.1	203	1.03	66.3	81.5	0.81
	G3S2.d10	2.42	200.1	199.5	1	70	86	0.81
B	G2S3.d14	0.55	219	210	1.04	63.9	78	0.82
	G3S3.d12	1.12	227.4	226.8	1	61.4	84.5	0.73
	G4S2.d14	1.65	247.2	231	1.07	56.4	68.5	0.82
	G4S2.d12	2.24	235.2	224	1.05	59.3	76.9	0.77

Moment eğrilik ilişkisinden ve sonlu eleman modellerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri her

iki grup kiriş için karşılaştırmalı olarak Şekil 7’de verilmiştir.

**Şekil 7.** Yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması (Comparisons of load-deflection curves)

Yük-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde de hem analitik hem de sonlu eleman analizlerinde doğrusal bölgede eğrilerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Çalışma kapsamında ayrıca kirişlerin süneklik düzeyi de incelenmiştir. Süneklik yapı elemanının taşıma kapasitesinde herhangi bir azalma olmaksızın deformasyon yapabilme özelliğidir. Betonarme kirişlerin sünekliği en büyük yüke karşılık gelen yer değiştirmenin akma anındaki yer değiştirmeye oranı alınarak hesaplanmaktadır. FRP donatılı ya da hibrit donatılı kirişlerde ise bu yaklaşım kullanılamaz. Çünkü FRP donatı akma olmaksızın kopmaktadır. El Refai v.d. [3] çalışmalarında hibrit donatılı kirişler için yeni bir şekil değiştirme indisi formülü (DF_{mod}) önermişlerdir. Şekil değiştirme indisi, hibrit kirişlerin sünekliklerini yorumlamakta kullanılan bir parametre olup, nihai moment taşıma kapasitesi (M_u) ve bu andaki eğriliğin (φ_u), çelik donatının aktığı ana karşılık gelen moment (M_y) ve eğriliğe (φ_y) oranı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 13).

$$DF_{mod} = \frac{M_u \varphi_u}{M_y \varphi_y} \quad (13)$$

Çalışma kapsamında da Eşitlik 13 kullanılarak kirişlerin şekil değiştirme indisleri teorik olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4).

Denge altı donatı oranına göre tasarlanmış A grubu kirişlerin sonlu elemanlar yönteminden elde edilen yük-

yer değiştirme grafikleri (Şekil 7) ile şekil değiştirme indisleri incelendiğinde (Çizelge 4), GFRP donatı alanı oranının artması ile yük taşıma kapasitesinin %4, şekil değiştirme indeksinin ise %37 oranında arttığı görülmektedir (G2S3.d12 ve G3S2.d12).

Denge altı tasarlanan kirişlerde lifli polimer/çelik donatı (A_f/A_s) oranındaki %48'lik artış yük taşıma kapasitesinin %15 artmasına neden olmuştur (G2S3.d10 ve G3S2.d12). Ancak çelik donatı oranının azalması şekil değiştirme indeksini önemli oranda arttırmıştır. Aynı GFRP donatı alanı oranına sahip G2S3.d12 ve G2S3.d10 kirişlerinde A_f/A_s oranındaki %44'lük artış yük taşıma kapasitesini %10 azaltırken, orta nokta deplasmanını %4 oranında arttırmıştır.

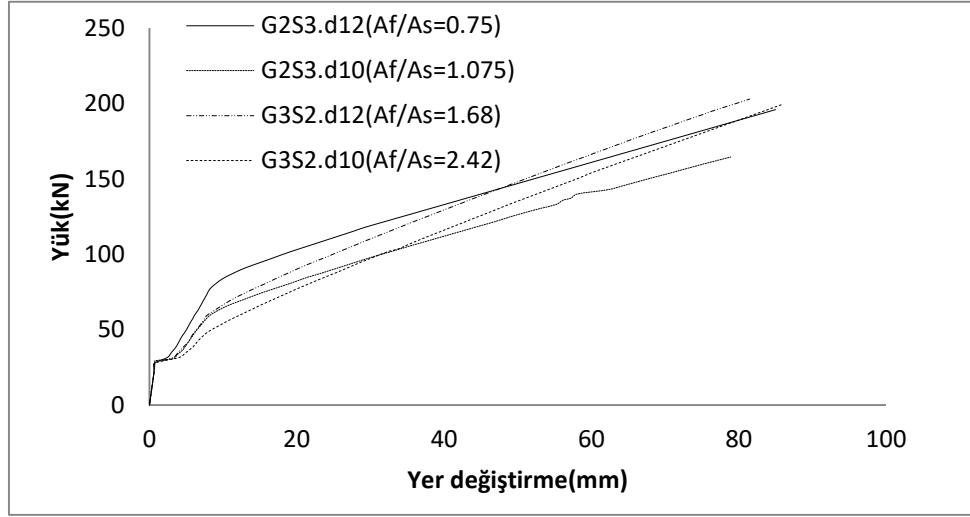
Dengeli ve denge üstü donatı oranına göre tasarlanmış B grubu kirişlerin sonlu elemanlar yönteminden elde edilen yük -yer değiştirme grafikleri (Şekil 7) ve şekil değiştirme indisleri (DF) (Çizelge 4) incelendiğinde, bu gruptaki kirişlerde de çelik donatı oranı azaldıkça şekil değiştirme indeksinin arttığı belirlenmiştir. GFRP donatı alanı arttığında yük taşıma kapasitesinin %10, şekil değiştirme indeksinin ise %34 oranında arttığı görülmektedir (G2S3.d14 ve G4S2.d14). Denge üstü donatılı olarak tasarlanan kirişlerde A_f/A_s oranındaki değişim yük taşıma kapasitesinde önemli değişikliğe neden olmamıştır. Aynı GFRP donatı alanına sahip G4S2.d14 ve G4S2.d12 kirişlerinde, A_f/A_s oranındaki %36'lık artış yük taşıma kapasitesini %3 azaltırken, orta nokta deplasmanını %12 oranında arttırmıştır.

Çizelge 4. Kiriş moment ve eğrilik değerleri (Moment-curvature values of beams)

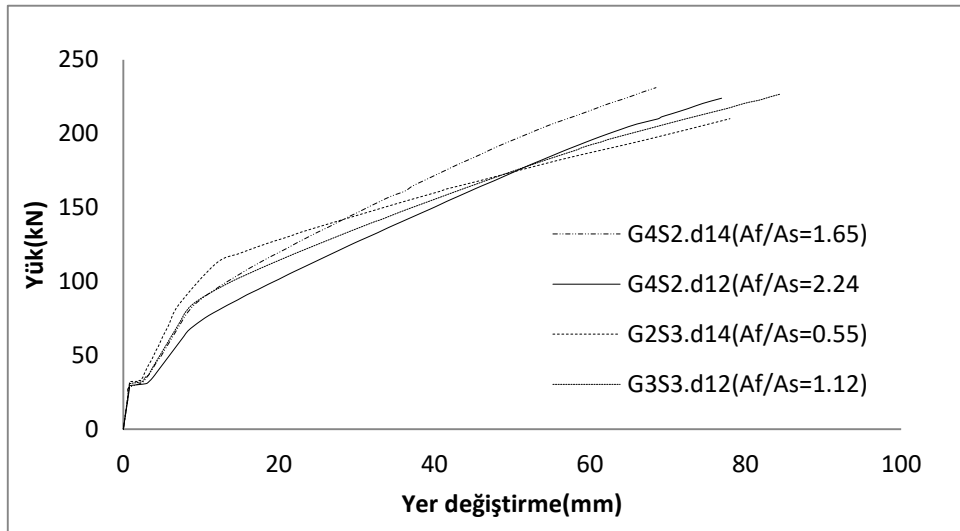
Grup	Eleman	Af/As	M_u (kNm)	φ_u (10^{-5} 1/mm)	M_y (kNm)	φ_y (10^{-5} 1/mm)	DF_{mod}
A	G2S3.d12	0.75	103.8	66.3	56.3	8.3	14.7
	G2S3.d10	1.07	95	72.5	40.8	8.0	21.1
	G3S2.d12	1.68	110.3	62.4	42.7	8.0	20.1
	G3S2.d10	2.42	105.1	65.5	32.3	7.8	27.3
B	G2S3.d14	0.55	115	59.8	75.1	8.7	10.5
	G3S3.d12	1.12	119.4	57.4	59.8	8.4	13.6
	G4S2.d14	1.65	129.8	52.8	58.4	8.3	14.1
	G4S2.d12	2.24	123.5	55.5	46.1	8.1	18.4

Şekil 8’de ise kirişlerin karşılaştırılması, GFRP donatı alanları aynı olanlar arasında yapılmıştır. GFRP donatı alanının aynı olduğu G2S3.d12- G2S3.d10 ve G3S2.d12- G3S2.d10 kirişlerinde A_f/A_s oranı arttıkça rijitliğin azaldığı görülmektedir.

Benzer durumun dengeli ve denge üstü donatı oranına göre tasarlanan B grubu kirişlerde de mevcut olduğu görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 8. A grubu kirişlerin yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of load-deflection curves of group A beams)



Şekil 9. B grubu kirişlerin yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of load-deflection curves of group B beams)

4. SONUÇ ve TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada hibrit kirişlerin (GFRP ve çelik) eğilme davranışları teorik ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sonuçlar yük-yer değiştirme eğrileri, yük taşıma kapasiteleri ve şekil değiştirme indeksleri kullanılarak yorumlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

Denge üstü tasarlanan kirişlerin yük taşıma kapasiteleri denge altı tasarlanan kirişlere oranla daha büyüktür ancak şekil değiştirme indeksleri daha küçüktür.

Her iki grup kirişte de FRP donatının çelik donatıya oranı arttıkça (FRP donatı alanı arttıkça veya çelik donatı alanı azaldıkça) şekil değiştirme indeksi genel olarak artmaktadır.

Her iki grup kirişte de A_f/A_s oranındaki artış rijitliği azaltmaktadır.

Aynı GFRP donatı alanına sahip kirişlerde kesit içinde çelik donatı alanı azaldıkça kiriş orta nokta deplasmanı artmıştır. Azalan çelik donatı alanına bağlı olarak kirişin eğilme rijitliği azalmış böylece orta deplasmanında artış elde edilmiştir.

Denge altı ve denge üstü donatılı kirişlerde akma anındaki eğrilik değerleri genel olarak A_f/A_s oranları arttıkça azalmıştır.

Çalışmada FRP donatı olarak Cam Elyaf Polimer Lifli donatı (GFRP) kullanılmıştır. Bundan sonra yapılacak analitik ve nümerik çalışmalarda farklı FRP malzemeler incelenebilir. Beton dayanımı betonarme elemanların davranışını etkileyen bir diğer unsurdur. Bu nedenle yapılacak çalışmalarda farklı beton sınıfları ele alınarak analizler yapılabilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ele alınan malzeme özellikleri, miktarları ve eleman boyutları ile sınırlıdır. Daha genel sonuçlara ulaşmak için ilave numuneler ele alınabilir.

KISALTMALAR

FRP: Fiber Reinforced Polymer

CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer

GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer

AFRP: Aramid Fiber Reinforced Polymer

BFRP: Bazalt Fiber Reinforced Polymer

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Nalan KAYA: Sonlu eleman modellerini oluşturmuş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Eda AVANOĞLU: Analizleri gerçekleştirmiş ve sonuçları değerlendirmiştir.

Şule ER: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Yağmur KOPRAMAN: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Alper BÜYÜKKARAGÖZ: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Lau, D., Pam, H. J., "Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams". *Engineering Structures*, 32; 3857-3865, (2010).
- [2] Yinghao, L., Yong, Y., "Arrangement of hybrid rebars on flexural behavior of HSC beams". *Composites: Part B*, 45, 22-31, (2013).
- [3] El Refai, A., Abed, F., Al-Rahmani, A., "Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars". *Construction and Building Materials*, 96; 518-529, (2015).
- [4] Kara, İ. F., Ashour, A. F., Köroğlu, M. A., "Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams". *Composite Structures*, 129, 111-121. (2015).
- [5] Pang, L., Qu, W., Zhu, P., Xu, J., "Design Propositions for Hybrid FRP-Steel Reinforced Concrete Beams." *Journal of Composites for Construction*, 20(4), (2016).
- [6] Bencardino, F., Condello, A., Ombres, L., "Numerical and analytical modeling of concrete beams with steel reinforcements". *Composites Structures*, 140; 53-65, (2016).
- [7] Qin, R., Zhou, A., Lau, D., "Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams". *Composites Part B*, 108, 200-209, (2017).
- [8] Fahmy, Mohamed F. M.; Abd-ElShafy, Zainab E.; Wu, Zhishen., "Experimental and numerical evaluation of the shear behavior of reinforced concrete T-beams with hybrid steel-FRP stirrups". *Journal of Composites For Construction*, 21(4), 04017007, (2017).
- [9] Araba, A. M., Ashour, A. F., "Flexural performance of hybrid GFRP-Steel reinforced concrete continuous beams". *Composites Part B*, 154: 321–336, (2018).
- [10] Xingyu, G., Yiqing, D., Jiwang, J., "Flexural behavior investigation of steel-GFRP hybrid-reinforced concrete beams based on experimental and numerical methods". *Engineering Structures*, 206, 110117, (2020).
- [11] Xiangjie, R., Chunhua, L., Ke, X., "Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars." *Composite Structures*, 235, 111772, (2020).
- [12] Maranan, G.B., Manalo, A.C., Benmokrane, B., Karunasena, W., Mendis, P., Nguyen, T. Q., "Flexural behavior of geopolymer-concrete beams longitudinally reinforced with GFRP and steel hybrid reinforcements". *Engineering Structures*, 182: 141–152, (2019).

- [13] Abdelkarima, O. I., Ahmeda, E. A., Mohameda, H. M., Benmokrane, B., “Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars”. *Engineering Structures*, 186: 282-296, (2019).
- [14] Ge, W., Song, W., Ashour, A. F., Lu, W., Cao, D., “Flexural performance of FRP/steel hybrid reinforced engineered cementitious composite beams”. *Journal of Building Engineering*, 31: 101329, (2020).
- [15] Buyukkaragoz A., Kalkan İ, Lee, J. H., “A numerical study of the flexural behavior of concrete beams reinforced with afrp bars”. *Strength of Materials*, 45: 716-729, (2013).
- [16] “ANSYS Mechanical APDL 14 Theory Guide”, Ansys Inc., (2015).
- [17] Hognestad, E., “A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members.” University of Illinois Bulletin. Vol. 49, no. 22., (1951).
- [18] William, K. J., Warnke, E. D., “Constitutive model for the triaxial behavior of concrete”. *International Association for Bridge and Structural Engineers Proceedings*, Cilt 19, 174-203. (1975).
- [19] TS-500, “Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları”, (2000).
- [20] ACI 440-R15, “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber- Reinforced Polymer (FRP) Bars”. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. (2015).