

İri Agrega Kullanılarak Üretilen Yüksek Performanslı Hibrit Lif Katkılı Betonlarda Kesme Açıklığı-Faydalı Yükseklik Oranının Kırılma Modülü Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

Nurullah ÖKSÜZER^{1*} , Özgür ANIL² , Alper ALDEMİR³ ,
Mustafa ŞAHMARAN³ 

¹Bayburt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

Kesme
Açıklığı/Faydalı
Yükseklik,
Büyük Ölçek,
Kaba Agregalar,
Nano Malzemeler

Özet

Hibrit lif katkı yüksek performanslı betonların laboratuvar ortamında küçük boyutlardaki çalışmalar oldukça yaygındır. Fakat maliyet ve üretim zorluğu gibi sebeplerden dolayı bu özel betonlarla ilgili büyük ölçekli çalışmalar yapmak oldukça zordur. Özellikle farklı kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a/d) oranlarında bu betonlarla ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu betonların yapısal olarak kullanılabilmesi için öncelikli olarak maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada özel betonların maliyetinin azaltılması amacıyla kaba agrega (D_{max} 11,2 mm) kullanılmıştır. Ayrıca iki farklı oranda uçucu kül (0,20-0,70), iki farklı agrega oranı (1,0-2,0) ve farklı uzunluklara sahip 3 farklı lif türü [Çelik, Naylon ve (Polivinil Alkol) PVA] de çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Karışımlar içerisinde seçilen bir seri üzerine iki farklı nano malzeme eklenerek performans değerlendirmesine katılmıştır. Günümüzde yaygın olarak yapısal üretimlerde kullanılan donatı ile güçlendirilmiş beton karışımı da karşılaştırma yapılabilmesi adına çalışma kapsamında üretilmiştir. Karışımlardan 100x150x1000 mm boyutlarında kirişler üretilerek dört farklı a/d (0,67, 1,11, 2,22 ve 2,96) oranında dört noktali eğilme yüklemesi uygulanmıştır. 28 gün sonunda deneylerden elde edilen kirişlerin yük-deplasman eğrileri ve kırılma şekilleri incelenerek değerlendirilmiştir.

Investigation of Shear Span to Depth Ratios and Failure Modes on High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concretes by Using Coarse Aggregate

Keywords:

Shear Span to Depth
Ratio,
Large Scale,
Coarse Aggregates,
Nano Materials

Abstract

Small scale studies in the laboratories of high performance concretes with hybrid fiber additives are quite common. However, large-scale studies on these special concretes are very difficult to do research due to reasons such as cost and production difficulty. Studies on these concretes with different shear span/effective depth (a / d) ratios have not yet become widespread. In order to be used structurally for these concretes, the cost reduction should be considered as a priority. In this study, coarse aggregate (D_{max} 11.2mm) is used in order to reduce the cost of these special concretes. In addition, two different ratios of fly ash (0.20-0.70), two different ratios of aggregate (1.0-2.0) and 3 different fiber types (Steel, Nylon and PVA) with different lengths were also evaluated within the scope of the study. Two different nano materials were added to a series selected among the mixtures and participated in the performance evaluation. The reinforced concrete mixture, which is widely used in structural productions today, was produced within the scope of the study in order to make a comparison. Beams of 100x150x1000 mm were produced from the mixtures and four-point bending loadings were applied at four different a/d (0.67, 1.11, 2.22 and 2.96) ratios. At the end of 28 days, the load-displacement curves and fracture patterns of the beams obtained from the experiments were examined and evaluated.

1 GİRİŞ

Geleneksel betonun gevrek davranışıyla ilgili çalışmalar son yüzyıl içerisinde oldukça yaygınlaşmıştır [1]. Gevrek davranışın ortadan kaldırılması için genel olarak lif katkıları ve puzolan katkısı kullanılmaktadır. Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve volkanik kökenli tüfler en yaygın kullanılan puzolan katkılarıdır [2]–[4]. Lif takviyeli betonlar daha dayanıklı ve daha sünek bir davranış sergilemesi sebebiyle gelecekte de yaygın şekilde kullanılacak bir malzeme olarak tercih edilmektedir [5]. Lif katkıli kompozitler içerisinde son yıllarda araştırmacılar tarafından araştırılan ve daha iyi performans sergileyen; Yüksek performanslı lif takviyeli çimentolu kompozitler (YPLTÇK) olduğu bilinmektedir. Bu YPLTÇK'lerin standart lifli kompozitlere kıyasen çoklu çatlak oluşturarak, şekil değiştirme sertleşmesi göstermesi en belirgin özelliğidir [6]. Yüksek performanslı bu kompozitlerin yüksek süneklik ve tokluğa sahip olmalarından dolayı geleneksel beton yerine kullanılacak bir alternatif haline gelmiştir [7].

Alternatif olarak kullanılacak nitelikte olan lifli betonun, laboratuvar ortamında yaygın olarak çalışılmaktadır [6]. Son yıllarda bu betonlarla ilgili yapısal boyutlardaki çalışmalarda oldukça artmıştır [8, 9]. Artan yapısal boyuttaki çalışmalarla birlikte, bu özel betonların gerçek yapılarda kullanılması için ilk adımlar atılmıştır. Yapılarda kullanılacak olan bu yapı malzemesinin farklı yükler altında hasar görme olasılığı da ortaya çıkmaktadır. Yapı malzemesi üzerinde deprem yükleri, çevresel etkiler gibi farklı yüklerden dolayı hasarlar oluşabilmektedir. Yapılara farklı noktalardan gelebilecek olan yüklerin deneysel olarak incelenmesi, farklı a/d oranlarında yapılan yüklemeler ile öngörülelebilmektedir. Farklı a/d oranlarında yapılan yüklemeler ile farklı çatlak şekilleri oluşabilmekte ve farklı kırılmalar görülebilmektedir [9, 10].

Çalışma kapsamında 16 farklı karışım için 64 adet büyük ölçekli kiriş numuneleri üretilmiştir. Her bir karışımın mekanik davranışının tanımlanabilmesi için 14 farklı küp numunesi hazırlanmıştır. 2 farklı uçucu kül oranı, 2 farklı agrega oranı ve 3 farklı uzunluklara sahip lif türü kullanılarak üretilen numuneler 28 gün sonunda farklı a/d oranlarında dört noktali eğilme yüklemesi altında kırılmıştır. Her bir karışımdan 3'er adet üretilen küp numuneleri ise 28 gün sonunda basınç dayanımı testine tabii tutularak sonuçları kaydedilmiştir. Kırılan kiriş numunelerinin yük ve orta nokta deformasyon performansları değerlendirilmiştir. Kiriş numunelerinin yapısal parametreleri oluşturularak çalışma içerisinde değerlendirilmiştir.

2 MATERYAL VE METOD

2.1 Materyal

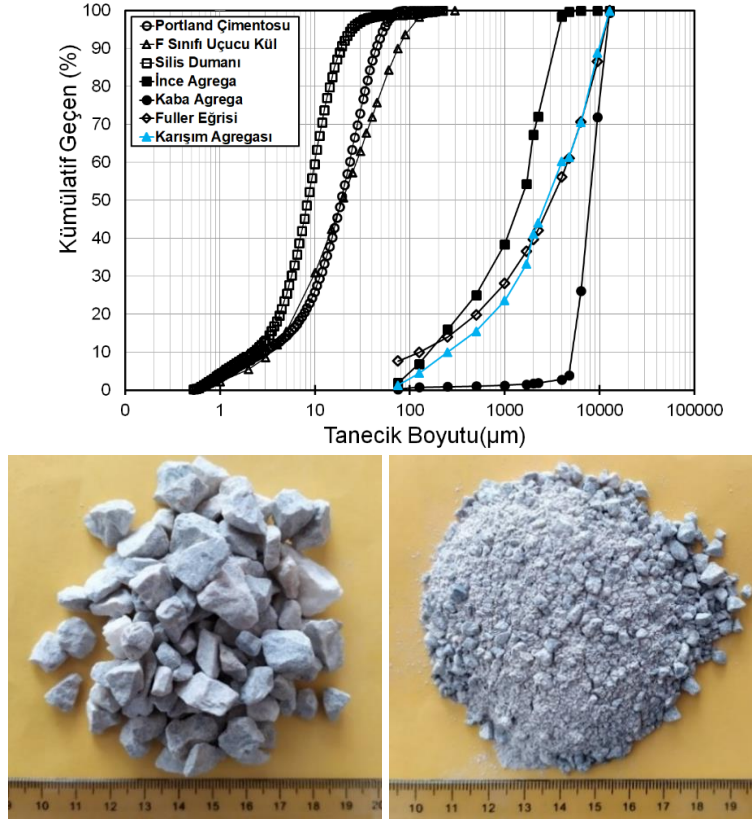
Bu çalışma içerisinde 14 farklı yüksek performanslı lif takviyeli çimentolu kompozitler (YPLTÇK) karışımı üretilmiştir. Karışım içerisinde çimento olarak CEM I 42,5R Portland Çimentosu (PC), F sınıfı uçucu kül (UK) ve Silis dumanı (SD) kullanılmıştır. UK/Bağlayıcı malzeme (PC+UK+SD) oranları 0,20 ve 0,70 olan iki farklı karışım kullanılmıştır. Karışım içerisindeki SD miktarı çimento ağırlığının %7'si olarak sabit tutulmuştur. Karışımlar içerisinde nano malzemelerin etkisini incelemek için iki farklı nano malzeme (Nano Alümin (NA) ve Nano Silis (NS)) kullanılmıştır. Nano malzeme miktarları çimento ağırlığının %2'si oranında karışımlara eklenmiştir. Karışım esnasında kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Karışım malzemelerinin kimyasal özellikleri

Kimyasal İçerik	PC	UK	SD	NA	NS
CaO (%)	61,40	9,78	0,62	0,00	0,00
SiO ₂ (%)	20,77	57,01	91,96	0,10	99,00
Al ₂ O ₃ (%)	5,55	20,97	1,20	98,50	0,38
Fe ₂ O ₃ (%)	3,35	4,15	0,84	0,43	0,02
MgO (%)	2,49	1,76	1,02	0,54	0,21
SO ₃ (%)	3,30	0,32	0,22	0,06	0,21
K ₂ O (%)	0,77	1,53	1,16	0,00	0,00
Na ₂ O (%)	0,19	2,23	0,67	0,04	0,09
Kızdırma Kaybı (%)	2,20	1,25	1,86	0,35	9,20

Bağlayıcı malzemelere ek olarak karışımlar içerisinde ince ve kaba agregalar da kullanılmıştır. Karışımlar içerisinde kullanılan agregalar kırma kireç taşıdır. Kaba agregalar için D_{max} 11,2 mm olarak seçilirken, ince agregalar için incelik modülü 3,54 olarak belirlenmiştir. Agrega olarak Fuller eğrisine yakın şekilde oluşturulan %57 ince agrega, %43 kaba agrega oranları kullanılmıştır. Sürekli bir agrega gradasyonu oluşturmak için 0,45

derece fuller parabol grafiği kullanılmıştır. Bu sayede maksimum agrega hacmi, minimum segregasyon ve ideal işlenebilirlik kuralları içerisinde kalınması sağlanmıştır. Karışımlarda kaba agrega kullanılmasının amacı öncelikle maliyeti azaltmaktır. Kaba agrega kullanarak daha büyük ölçekli dökümler yapılabilecek, bu sayede geliştirilen karışımlar yapısal bir beton olarak kullanılabilir. Ayrıca yapılan daha önceki çalışmalardan da bilinmektedir ki, agrega çapı arttıkça şekil değiştirme sertleşmesi görülmesi artmaktadır [11]. Aynı zamanda diğer çalışmalar göstermiştir ki agrega boyutu arttıkça kendiliğinden iyileşme kapasitesi de artmıştır [12]. Karışımlar içerisinde kullanılan bağlayıcı malzemeler ve agrega gradasyonunu gösteren eğri Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Karışım gradasyonu, ince ve kaba agrega görüntüsü

Çalışma içerisinde en önemli değişkenlerden bir tanesi de toplam agrega /bağlayıcı miktarının değişkenliğidir. Bu kapsamda karışımlar içerisinde agrega miktarının etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için iki farklı oranda agrega (1,0 – 2,0) kullanılmıştır. Karışımların ideal işlenebilirlik ve kıvamda elde edilebilmesi için içilebilir şebeke suyu ve polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı (YOSA) kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı miktarı karışımlar içerisinde çimento veya agreganın bir yüzdesi olarak eklenmemiş olup, ideal işlenebilirlik elde edildiği miktar kadar eklenmiştir. Bu işlenebilirlik slump testi ile ölçülmüş olup, bütün karışımlarda ideal işlenebilirlik elde edilmiştir.

Karışımlarda lif türünün ve lif boyunun da etkisinin anlaşılabilmesi için 3 farklı lif tipi kullanılmıştır. Çelik (S), Naylon (N) and Polivinil alkol (PVA, kodlama içerisinde (P)) lifleri toplam hacmin %2’i oranında farklı karışımlar içerisinde kullanılmıştır. Hibrid lif şeklinde karıştırılan lifler %1’er oranda ayrı ayrı katılarak karşılaştırmaları yapılmıştır. Her ne kadar PVA lifleri daha iyi sonuçlar verse de bu deneylerde yapısal büyüklükte üretimler hedeflendiğinden maliyet/performans değerinin daha düşük değerlere indirgenmesi için deneylerde naylon katkı liflerinin etkileri de incelenmiştir[13, 14]. Deneyler sırasında kullanılan liflerin fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

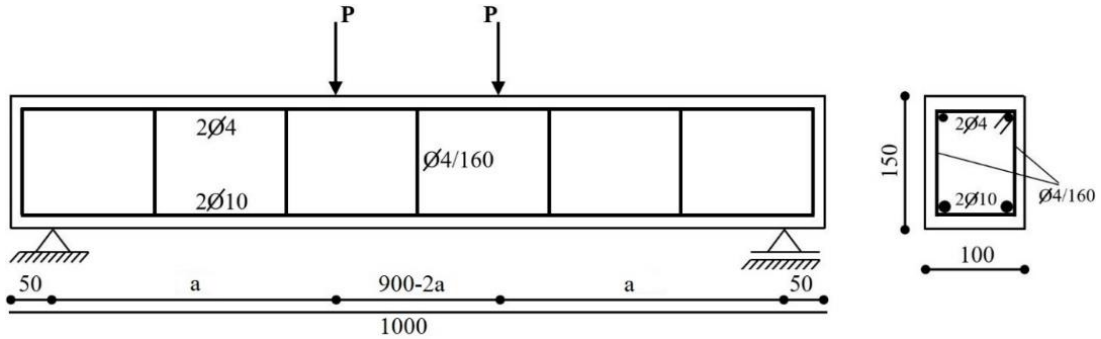
Tablo 2. Lif türleri ve özellikleri

Lif Türü	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
Polivinil alkol	6	0,20	1000	29	1,30
Naylon Mono	19	0,05	966	25	1,14
Çelik Lif	30	0,75	1100	200	7,80

Nano malzemeler beton karışımların içerisinde durabilite ve mekanik dayanımları iyileştirmek için son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatür kısmında belirtilen çalışmalar ve yazarların deneysel tecrübelerinden yola çıkarak %2 oranında nano malzeme kullanılmasının uygun bir seçenek olduğu düşünülmüştür. Bu çalışma kapsamında da Nano Silis (NS) ve Nano Alümin (NA) katkıları karışımlar içerisinde seçilen bir karışıma eklenmiştir. Bu eklenme oranı literatürde de ideal oran olarak kabul edilen toplam bağlayıcı miktarının %2'si oranında seçilmiştir.

2.2 Method

Çalışma sırasında kullanılan deney elemanlarının üretiminde kullanılan malzeme miktarlarını içeren veriler Tablo 3'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Tablo 3'den de anlaşılacağı gibi numunelerin içeriklerinin kolayca anlaşılabilmesi için bir notasyon kullanılmıştır. Bu notasyon içerisinde malzemenin türü ve hangi oranda kullanıldığı belirtilmiştir. Şöyle ki örnek olarak NS2_P1S1N0_0.70_1.0 karışımında, NS sembolü karışımda nanosilis kullanıldığını, P1 sembolü %1 oranında polivinilalkol lifi (P), S1 sembolü %1 oranında çelik (S) ve N0 sembolü ise karışımda naylon-mono lifi (N) yer almadığını ifade etmektedir. Aynen bunun gibi karışım isimlendirmesinde son bölümde yer alan rakamlar, 0.70 ile UK/PC oranı, 1.0 ile Agrega/Bağlayıcı oranı belirtilmiştir. Karışımların hazırlanması için 250 L kapasiteli mikser kullanılmıştır. Mikser lifli karışımların daha homojen karıştırılabilmesi için modifiye edilmiştir. Karışımlar 3 farklı aşamada tamamlanmıştır. Birinci aşamada kuru karışım olarak adlandırılan, kaba agrega ve ince agrega mikser içerisinde 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra karışımın üzerine kuru şekilde olan Portland Çimentosu ve Uçucu kül eklenerek 5 dakika daha kuru şekilde karıştırılmıştır. Başka bir kabın içerisinde su, silis dumanı ve akışkanlaştırıcı karıştırılarak kuru karışımın üzerine eklenmiştir. Karışım homojen duruma gelinceye kadar yaklaşık 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra karışımın üzerine sırasıyla çelik lif ve sentetik lifler ayrı ayrı eklenerek 3'er dakika boyunca daha karıştırılmıştır. Nano malzeme içeren karışımlarda, nano malzemelerin homojen olarak dağıtılabilmesi için sıvı karışımın içerisinde çözülmüştür. Sıvı karışımın içerisine 15 dakika boyunca nano malzeme yavaşça eklenerek mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Liflerle güçlendirilmiş numunelerle karşılaştırmak amacıyla referans karışıma ek olarak çelik donatılarla güçlendirilmiş olarak da hazırlanmıştır. Hazırlanan çelik donatılı numunelerin donatı detayları Şekil 2'de gösterilmiştir. Donatılandırılmış numunelerin lifli numuneler ile davranış karşılaştırılması hedeflenen bu çalışmada, boyuna donatının etkisinin karşılaştırmanın daha belirgin olması adına sıklaştırma bölgelerinde etriye sıklaştırması uygulanmamıştır.



Şekil 2. Çelik donatı içeren kiriş numunelerin donatı detayı (bütün ölçüler mm'dir.)

Karışımlar hazırlandıktan basınç dayanımı için 100x100x100 mm küp kalıplarına ve 100x150x1000 mm büyük ölçekli kiriş kalıplarına dökülmüştür. Kalıplara döküldükten sonra 1 gün boyunca kalıplar içerisinde ıslak bir bezle sarılı şekilde 50±5% nem ve 23±2 °C de bekletilmiştir. Numuneler kalıplarından söküldükten sonra 27 gün boyunca 23±2 °C ve 95±5% nemli ortamında saklanmıştır. Kür süresi sonunda numuneler dört noktalı eğilme testi ile yük-deformasyon eğrilerine ulaşılmıştır. Eğilme deneyleri için yük-deformasyon eğrileri Şekil 3'de verilmiştir.

Deneyler esnasında 100x150x1000 mm boyutlarındaki kirişlerden 64 adet üretilmiştir. Her bir kiriş farklı kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranlarında eğilme testine tabi tutulmuştur. Büyük ölçek kirişler 0,67, 1,11, 2,22 ve 2,96 olmak üzere 4 farklı kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranlarında eğilme yüklemesi uygulanmıştır. Çatlak oluşturulması için 300 kN kapasiteli, 0,1 Newton hassasiyetli, yük ve deplasman kontrollü eğilme ve çekme cihazı kullanılmıştır.

Tablo 3. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları ve 28 gün sonundaki basınç dayanımları

No	Mix. ID	Bağlayıcı Malzemeler (kg/m ³)			Agrega (kg/m ³)		Su (kg/m ³)	YOSA (kg/m ³)	Lif (kg/m ³)			Nano (kg/m ³)		Basınç Dayanımı (MPa)
		PC	UK	SD	İnce	Kaba			P	S	N	Alümin	Silis	
1	POS0N0_0.20_1.0	690	138	48	495	380	351	-	-	-	-	-	-	51,43
2	POS0N0_0.70_1.0	481	337	34	483	372	341	-	-	-	-	-	-	39,55
3	POS1N0_0.20_1.0	683	137	48	490	376	347	0,9	-	78	-	-	-	46,59
4	POS1N0_0.70_1.0	477	334	33	477	367	338	0,9	-	78	-	-	-	40,05
5	POS1N1_0.20_1.0	675	135	47	486	374	343	1	-	78	11,4	-	-	40,41
6	POS1N1_0.70_1.0	472	330	33	472	363	334	0,74	-	78	11,4	-	-	37,07
7	POS1N1_0.20_2.0	505	101	35	726	559	257	1,62	-	78	11,4	-	-	54,5
8	POS1N1_0.70_2.0	356	249	25	711	547	252	1,56	-	78	11,4	-	-	41,9
9	P1S1N0_0.20_1.0	675	135	47	486	374	343	0,9	13	78	-	-	-	48,15
10	P1S1N0_0.70_1.0	472	330	33	472	363	334	0,5	13	78	-	-	-	39,69
11	P1S1N0_0.20_2.0	505	101	35	726	559	257	1,75	13	78	-	-	-	46,8
12	P1S1N0_0.70_2.0	356	249	25	711	547	252	1,56	13	78	-	-	-	38,78
13	D1POS0N0_0.20_1.0	690	138	48	495	380	351	-	-	-	-	-	-	-
14	D1POS0N0_0.70_1.0	481	337	34	483	372	341	-	-	-	-	-	-	-
15	NS2_P1S1N0_0.70_1.0	472	330	33	472	363	334	3,2	13	78	-	16,7	-	36,85
16	NA2_P1S1N0_0.70_1.0	472	330	33	472	363	334	0,7	13	78	-	-	16,7	41,74

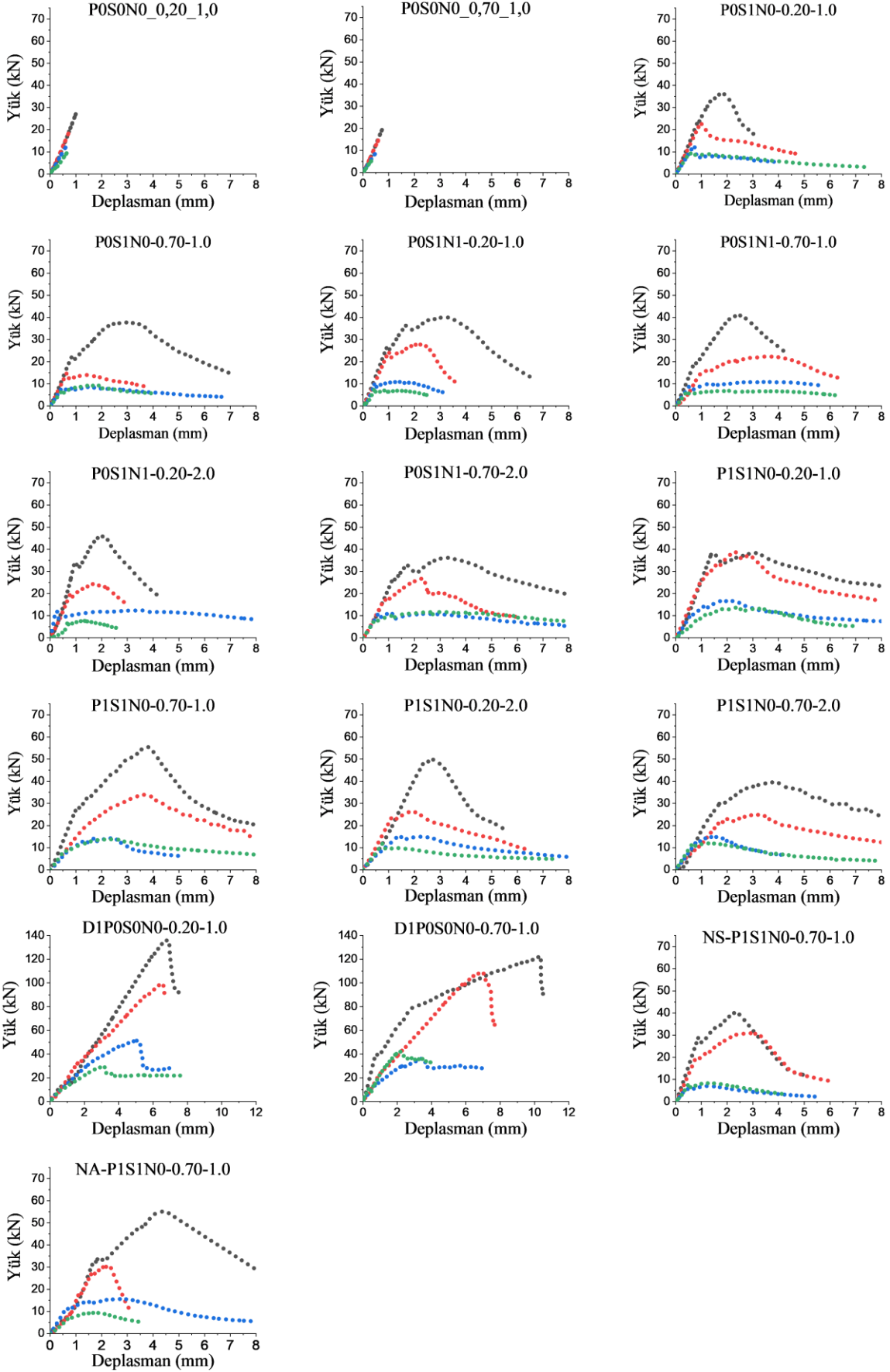
3 BULGULAR

Bu çalışmada Hibrit liflerle üretilmiş yüksek performanslı betonların kaba agregalarla büyük ölçekli olarak üretilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın genel amacı, hibrit lif takviyeli yüksek performanslı betonların büyük ölçekli numunelerde üretilebilirliğini araştırmak olmasının yanında üretilen numunelerin genel yapısı hakkında bilgi sahibi olunabilmesi için basınç dayanımı testine tabii tutulmuştur. Basınç dayanım test sonuçları Tablo 3’de gösterilmiştir. Farklı kesme açıklığına (4 farklı kesme açıklığı) sahip kirişlerin yük-deplasman eğrileri Şekil 3’de sunulmuştur. Ayrıca kiriş numunelerin yük-deplasman eğrilerinden faydalanılarak, akma kapasitesi, nihai yük taşıma kapasitesi, ötelenme oranı, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi sonuçları da Tablo 4 ve Tablo 5’de sunulmuştur. Numunelerin ötelenme oranları kırılma noktasında kaydedilen deplasman değerinin akma noktasında kaydedilen deplasman değerine oranlanmasıyla elde edilmiştir. Akma noktası olarak kabul edilen nokta, yük-deplasman eğrisinin yatay olarak hareket etmeye başladığı nokta kabul belirlenmiştir. Kirişlerin kırılma noktası ise maksimum yükün %85’ine düştüğü nokta olarak kabul edilmiştir. Enerji yutma kapasitesi ise kırılma noktasına kadar olan yük-deplasman grafiğinin altında kalan alan olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3 incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı sonuçlarına POS1N1_0.20_2.0 kodlu serilerde 54,5 MPa olarak elde edildiği görülmektedir. En düşük basınç dayanımı sonuçları ise NS2_P1S1N0_0.70_1.0 kodlu Nano silis içeren malzemelerde 36,85 MPa görülmektedir. Referans numunelere lif eklenmesiyle birlikte basınç dayanımlarında genel olarak azalmalar görülmüştür. Fakat en düşük basınç dayanımı elde edilen numunelerde dahi yapısal beton olarak kullanılabilir dayanımlarının (30 MPa) üzerinde olduğu görülmektedir. Referans numunelere %1 oranında çelik lif eklenmesiyle birlikte uçucu kül miktarı düşük olan numunelerde azalmalar görülürken, uçucu kül miktarı yüksek olan numunelerde sabit kalmıştır. Referans numunelerinin üzerine S ve N lifleri beraber eklenmesiyle birlikte uçucu kül miktarı düşük olan numunelerde %20 oranlarında azalmalar görülürken, uçucu kül miktarı yüksek olan numunelerde bu oran %6 oranlarında azalmıştır. Aynı şekilde referans numunelere S ve P lifleri birlikte eklenmesiyle birlikte uçucu kül miktarı düşük olan numunelerde %6 oranlarında azalma görülürken, uçucu kül miktarı daha yüksek olan numunelerde kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Lif katkısıyla birlikte uçucu kül miktarı daha düşük olan numuneler, yüksek olan numunelere kıyasen dayanımlarında daha büyük değişimler gözlemlenmiştir. Agreganın hacminin artmasıyla birlikte Naylon lif katkılı numunelerde basınç dayanımları olumlu yönde etkilenirken, PVA lifli numunelerin basınç dayanımları bu durumdan olumsuz etkilenmiştir. Bu etkinin iki lif arasındaki boy farkından oluştuğu, lif uzunluğu arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmüştür[15, 16].

Büyük ölçekli kırışların akma kapasiteleri incelendiğinde, referans numuneler lif ve donatı takviyesi içermediğinden akma davranışı sergilemeden gevrek kırılma görülmüştür. En yüksek akma noktası yük taşıma kapasitesi ve orta açıklık yer değiştirmelerine P1S1N0_0.20_2.0 kodlu (11. örnek) numunelerde 47,88 kN ve 2,34 mm olarak kaydedilmiştir. Bu değer referans numunesinin kırılma noktasına göre %77,07 oranında bir artış olarak gözlemlenmiştir. Akma kapasitesine ulaşan çelik lif katkıları numunelerde (3 ve 4. örnek) akma davranışı gözlemlendikten sonra sünek bir davranış sergileyerek yük taşıma kapasitelerine ulaşılmıştır. 3 numaralı çelik lif katkıları serilerde, 0,67 a/d oranına göre 2,96 a/d oranına kadar akma kapasiteleri sırasıyla %0,43, %43,07 ve %56,28 oranlarında azalmıştır. Bu oranlar 4 numaralı çelik lif katkıları numunelerde ise sırasıyla %34,38, %67,90 ve %69,86 oranlarında azalmıştır. Çelik lif katkıları numunelere (3. örnek) Naylon lif eklenmesiyle birlikte (5. örnek) akma noktasındaki taşıma gücü değerleri 0,67 ve 1,11 a/d oranlarında sırasıyla %16,4 ve %6,09 oranlarında artmıştır. Aynı numunelerde akma noktasındaki taşıma kapasiteleri 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında sırasıyla %24,75 ve %20,82 oranlarında azalmıştır. Bu davranışa nispeten, 4 ve 6 numaralı karışımlarda davranışın tam ters şekilde sergilenmiştir. Naylon lif katılmasıyla (6. örnek) 0,67 ve 1,11 a/d oranlarında sırasıyla %16,67 ve %4,09 oranında azalmalar görülmüştür. 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında ise sırasıyla %22,68 ve %0,08 oranında bir artış belirlenmiştir. Naylon lif eklenmesiyle birlikte numunelerin farklı yük noktalarında farklı davranışlar sergilediği belirlenmiştir. Daha düşük uçucu kül oranına sahip numunelerde Naylon lif katılmasıyla kesme kırılması davranışının hâkim olduğu oranlarda akma noktasındaki taşıma gücü artarken, eğilme-kesme davranışı sergilenen daha yüksek a/d oranlarında akma noktasındaki taşıma gücünün azaldığı belirlenmiştir. Uçucu kül miktarının düşük olduğu PVA lif katkıları (9. ve 10. örnek) numunelerde de Naylon lifli numunelerle benzer bir davranış elde edilmiştir. UK oranının düşük olduğu (9. örnek) numunelerde 0,67 ve 1,11 a/d oranında yapılan deneylerde akma noktasındaki taşıma gücü referans numunelere kıyasen sırasıyla %65,96 ve %14,22 oranlarında arttığı belirlenmiştir. 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında ise sırasıyla %13,31 ve %15,35 oranlarında azaldığı görülmüştür. Uçucu kül miktarının daha fazla olduğu (10. örnek) 0,67, 1,11, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında sırasıyla %16,75, %34,93, %81,84 ve %18,09 oranlarında artışlar gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre uçucu kül miktarı düşük karışımlarda ve kesme kırılmasının hâkim olduğu a/d oranlarında çelik lif üzerine sentetik lif eklenmesi akma noktasındaki taşıma gücü kapasitesini olumlu yönde etkilediği sonucuna varılabilir.

Akma noktasındaki taşıma gücü ardından yapısal üretimlerde önemli bir parametre olan nihai taşıma gücü meydana gelmektedir. YPLTÇK karışımlarında en yüksek taşıma gücü kapasitesine donatıyla güçlendirilmiş numunelerde daha düşük UK oranında elde edilmiştir. D1P0S0N0_0.20_1.0 kodlu (13. örnek) numunenin nihai taşıma gücü kapasitesi 136,29 kN olarak ölçülmüş olup referans numunesine göre (1. örnek) yaklaşık 5 kat daha büyük bir taşıma kapasitesi elde edilmiştir. Referans numunelerle lif katkıları numuneler kıyaslandığında düşük a/d oranlarında (0,67 ve 1,11) hem naylon lif katkıları hem de PVA lif katkıları numunelerde daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan agreganın hacminin artmasıyla 0,67 a/d oranında, düşük FA oranına sahip numunelerde, Naylon ve PVA lif katkıları numunelerde sırasıyla %14,35 ve %30,52 oranlarında artmalar gözlemlenmiştir. Benzer numunelerin yüksek UK oranına sahip karışımlarında ise sırasıyla %11,75 ve %28,75 oranlarında azalmalar belirlenmiştir. Agreganın artmasıyla düşük UK içerikli en büyük a/d oranı 2,96 oranında Naylon ve PVA lif katkıları numuneler sırasıyla %3,41 ve %11,44 oranında nihai yük taşıma kapasiteleri artmıştır. Aynı a/d oranında yüksek UK içerikli numunelerde ise Naylon lifli numunelerin yük taşıma kapasitesi %69,08 artarken, PVA lifli numunelerin %13,37 oranında azalmıştır. Nano malzeme katkıları numunelerde ise (15 ve 16. örnekler) referans numunelerine (10. örnek) göre nihai yük taşıma kapasitelerinde genel olarak azalmalar görülmüştür. Sonuç olarak, büyük ölçekli numunelerde agreganın artması bazı numunelerin taşıma kapasitesini artırırken, bazı numunelerde azalmalara sebebiyet vermiştir. Daha düşük a/d oranlarında naylon lif katkısı ve PVA lif katkısı taşıma kapasitesini artırdığı görülmüştür. A/d oranının artmasıyla birlikte naylon lif katkıları numunelerin taşıma kapasiteleri düşerken, PVA lif katkıları numunelerde referans numuneye göre artış devam etmiştir. Nano malzemelerin eklenmesiyle birlikte genel olarak nihai yük taşıma kapasitelerinde azalmalar görülmüştür.



Şekil 3. Eğilme yüklemesi altındaki kiriş numunelerinin yük-deplasman grafikleri (a/d oranları için Gri:0,67, Kırmızı: 1,11, Mavi:2,22, Yeşil:2,96)

Tablo 4.Kirişlerin akma noktası ve maksimum taşıma noktasındaki sonuçlar

No	Karışım ID	a/d	Akma Noktası						Maksimum Yük Noktası								
			Yük (kN)			Deplasman (mm)			Yük (kN)			Deplasman (mm)					
			0,67	1,11	2,22	2,96	0,67	1,11	2,22	2,96	0,67	1,11	2,22	2,96			
1	POS0N0_0.20_1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	19,86	13,26	9,99	1,00	0,78	0,67	0,69	
2	POS0N0_0.70_1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	15,00	8,47	6,23	0,77	0,62	0,46	0,39	
3	POS1N0_0.20_1.0	23,03	23,03	13,11	10,07	0,84	0,97	0,72	0,57	36,14	23,03	13,11	10,07	1,77	0,97	0,72	0,57
4	POS1N0_0.70_1.0	22,97	15,07	7,37	6,92	0,88	0,66	0,42	0,47	37,69	15,07	8,67	9,27	2,95	0,66	0,80	1,78
5	POS1N1_0.20_1.0	26,81	24,54	9,87	7,97	0,95	1,00	0,88	1,13	40,04	27,83	10,94	7,97	3,24	2,13	2,79	1,13
6	POS1N1_0.70_1.0	19,14	14,45	9,05	6,93	0,71	0,96	0,56	0,47	41,02	22,40	10,87	6,93	2,42	3,57	3,47	0,47
7	POS1N1_0.20_2.0	33,17	20,36	12,04	7,70	1,87	0,82	0,06	1,78	45,78	24,30	12,04	7,70	4,26	1,64	0,06	1,78
8	POS1N1_0.70_2.0	27,28	17,32	10,59	8,62	1,19	0,85	0,58	0,51	36,20	26,93	11,81	11,71	3,23	2,36	1,11	3,06
9	P1S1N0_0.20_1.0	38,22	26,42	11,37	8,52	1,40	1,01	0,63	0,84	38,39	38,71	16,92	13,71	3,05	2,33	1,84	2,30
10	P1S1N0_0.70_1.0	26,82	20,34	13,41	8,17	0,99	1,44	1,35	0,54	55,58	33,95	14,28	13,81	3,78	3,62	1,73	2,51
11	P1S1N0_0.20_2.0	47,88	23,61	16,02	12,14	2,34	1,12	1,43	0,79	50,11	26,35	16,02	12,14	2,66	1,91	1,43	0,79
12	P1S1N0_0.70_2.0	30,63	22,03	12,81	11,39	1,92	1,75	0,82	0,63	39,60	24,87	15,08	11,96	4,21	3,09	1,55	1,28
13	D1POS0N0_0.20_1.0	13,28	29,35	32,15	9,70	0,60	1,45	2,30	0,62	136,29	99,84	51,67	29,89	6,86	6,54	5,11	3,11
14	D1POS0N0_0.70_1.0	39,86	26,96	15,43	12,71	0,53	1,18	0,80	1,24	122,86	108,73	37,04	42,25	10,37	6,82	3,54	6,66
15	NS2_P1S1N0_0.70_1.0	28,98	19,77	5,56	8,13	0,88	0,80	0,41	0,52	40,11	30,91	7,05	8,35	2,31	2,93	1,23	1,22
16	NA2_P1S1N0_0.70_1.0	31,04	16,83	11,07	6,98	1,63	3,21	0,61	1,04	55,19	30,78	15,65	9,42	4,25	6,83	2,83	2,09

Tablo 5. Kirişlerin yapısal parametreleri

No	Karışım ID	Kırılma Noktası (mm)				Ötelenme Oranı				Rijitlik (kN/mm)				Enerji Yutma Kapasitesi (kN.mm)			
		0,67	1,11	2,22	2,96	0,67	1,11	2,22	2,96	0,67	1,11	2,22	2,96	0,67	1,11	2,22	2,96
1	POS0N0_0.20_1.0	1,00	0,78	0,67	0,69	-	-	-	-	27,09	25,59	19,90	14,58	12,55	7,56	4,42	3,22
2	POS0N0_0.70_1.0	0,77	0,62	0,46	0,39	-	-	-	-	25,96	24,32	18,25	15,82	7,39	4,64	1,96	1,33
3	POS1N0_0.20_1.0	2,55	1,40	0,83	1,55	3,05	1,45	1,15	2,74	27,54	23,95	18,23	17,76	62,36	19,62	5,72	11,34
4	POS1N0_0.70_1.0	4,03	1,96	2,78	2,15	4,56	2,96	6,55	4,54	26,03	22,82	17,37	14,62	113,98	22,36	19,85	15,61
5	POS1N1_0.20_1.0	4,16	2,72	4,56	4,09	4,39	2,73	5,16	3,62	28,35	24,62	11,17	7,06	127,99	55,78	40,72	23,42
6	POS1N1_0.70_1.0	3,17	4,90	5,65	5,21	4,47	5,10	10,04	11,14	27,01	15,04	16,07	14,82	88,35	85,26	54,03	32,04
7	POS1N1_0.20_2.0	5,04	2,41	3,19	4,68	2,69	2,94	5,23	2,62	17,72	24,88	19,73	4,31	153,76	43,57	36,06	24,59
8	POS1N1_0.70_2.0	4,76	2,48	3,60	5,79	3,99	2,94	6,23	11,46	22,88	20,47	18,30	17,07	132,16	43,93	34,23	58,73
9	P1S1N0_0.20_1.0	4,33	3,29	2,72	3,95	3,10	3,25	4,28	4,71	27,35	26,17	17,91	10,17	129,35	91,35	34,58	41,03
10	P1S1N0_0.70_1.0	4,53	4,50	2,76	3,22	4,56	3,13	2,04	6,02	27,00	14,13	9,92	15,25	168,98	104,53	29,14	35,06
11	P1S1N0_0.20_2.0	3,49	2,57	2,87	0,87	1,49	2,29	2,00	1,11	20,48	21,04	11,19	15,43	105,09	48,43	32,88	5,69
12	P1S1N0_0.70_2.0	5,73	4,01	2,10	2,42	2,98	2,29	2,57	3,85	15,92	12,57	15,70	18,09	160,04	71,19	23,09	23,75
13	D1POS0N0_0.20_1.0	7,03	6,65	5,30	3,24	11,82	4,59	2,31	5,24	22,31	20,26	14,00	15,67	484,49	364,60	170,09	57,96
14	D1POS0N0_0.70_1.0	10,38	7,45	3,70	8,89	19,53	6,33	4,65	7,19	74,98	22,90	19,35	10,28	926,27	475,12	87,04	244,76
15	NS2_P1S1N0_0.70_1.0	2,75	3,55	2,02	2,14	3,11	4,45	4,99	4,10	32,75	24,78	13,72	15,60	77,05	82,29	11,49	14,46
16	NA2_P1S1N0_0.70_1.0	7,31	7,57	3,88	2,79	4,47	2,36	6,32	2,68	18,99	5,24	18,03	6,71	269,77	133,13	49,86	17,57

Bir diğer malzeme özelliği enerji yutma kapasitesi olarak Tablo 5’de bütün numuneler için hesaplanmıştır. Tablo 5’den de anlaşılacağı gibi lif ve donatı katkısıyla birlikte bütün numunelerde bu değerde artış gözlemlenmiştir. En yüksek enerji yutma kapasitesi değerlerine D1POS0N0_0.70_1.0 kodlu (14. Örnek) numunelerin 0,67 a/d oranlarında ulaşılmıştır. Bu değer referans numunesinden yaklaşık 80 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Referans numunelerine (1 ve 2. örnekler) SD eklenmesiyle 0.67 a/d oranında sırasıyla 5 ve 15 kat artış gözlemlenmiştir. 1,11 a/d oranında ise 1. ve 2. örnekler sırasıyla yaklaşık 2,5 ve 5 kat artmıştır. Benzer şekilde 2,22 ve 2,96 oranlarında da artışlar gözlemlenmiştir. Karışımlar üzerine naylon lif eklenmesiyle enerji yutma kapasitesinin de artışlar gözlemlenmiştir. Çelik lif katkılı düşük UK içerikli numunelere göre (3. Örnek) naylon katkılı numunelerin (5. Örnek) 0,67 a/d oranında %105,26 enerji yutma kapasitesi artmıştır. Benzer şekilde 1,11, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında sırasıyla %184,3 %611,8 %106,56 oranlarında artışlar belirlenmiştir. Yüksek UK içerikli numunelerde naylon lif katkısıyla birlikte (6. Örnek) referans numunesine (4. Örnek) 0,67 a/d oranında %22,5 düşüş görülürken, 1,11, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında sırasıyla %281,4, %172,2 ve %105,23 oranlarında artışlar belirlenmiştir. Düşük FA içerikli karışımlarda Naylon lif yerine aynı oranda PVA lif katılmasıyla birlikte referans numunelere kıyasla 0,67 a/d oranından 2,96 a/d oranına kadar sırasıyla %107,44, %365,64, %504,5 ve %261,83 oranlarında artışlar görülmüştür. Yüksek UK içerikli numunelerde de sırasıyla %48,26, %367,59, %46,8 ve %124,6 oranlarında artış belirlenmiştir. Lif katkısının artmasıyla hemen hemen bütün a/d oranlarında birlikte genel olarak enerji yutma kapasitesi de artmıştır. Lif katkısı kirişlerin yük altında daha sünek bir davranış sergilemesiyle birlikte enerji yutma kapasitesi değerlerinde artışlara sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Karışım içerisinde agrega hacminin artmasıyla birlikte PVA lif katkılı numunelerin tamamında, Naylon lif katkılı numunelerin ise birçoğunda enerji yutma kapasitesi azaldığı belirlenmiştir. Kirişler üzerinde agrega hacminin artmasıyla birlikte daha gevrek bir davranış görülmüş ve bu sebeple enerji yutma kapasitesi değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Bu çalışmadaki bir diğer önemli parametre ise nano malzemelerin eklenmesidir. Nano silisin eklenmesi bütün a/d oranları üzerinde enerji yutma kapasitesi düşüşlerini ortaya çıkarmıştır. Nano alümin ise genel olarak olumlu etkilemiştir. Nano alümin katkılı numunelerde (16. örnek) referans numunesine (10. örnek) 0,67, 1,11 ve 2,22 a/d oranlarında sırasıyla %59,64, %27,36 ve %71,1 oranlarında artış belirlenmiştir. 2,96 a/d oranında ise %49,89 oranında bir azalma belirlenmiştir. Bu incelemeler neticesinde nano silisin kesme veya kesmeli eğilme davranışı üzerinde olumlu bir etkisine rastlanmamıştır. Nano alümin ise kesme davranışının daha etkin olduğu a/d oranlarında enerji yutma kapasitesi olumlu yönde etkilerken, eğilme davranışına daha yakın olan a/d oranında olumlu bir etkisi görülmemiştir.

Referans numuneleri (1 ve 2. örnekler) lif ve donatı içermediğinden çatlak gelişimi görüntülenmeden doğrudan kırılmıştır. Referans numunelere çelik lif eklenmesinin ardından numunelerde sünek bir kırılma görülmüştür. Çelik lif katkılı numunelerde a/d değeri küçüldükçe çatlak mesnet noktasına daha yakın bölgelerde elde edilmiştir. Çelik lif katkılı numunelerde her ne kadar mesnetlere yakın çatlaklar oluşsa da kırılmalar eğilme kırılmasından kaynaklanmıştır. Mesnetten yük noktasına doğru kesme çatlağı oluşmamıştır. Sentetik lifler eklendikten sonra da eğilme çatlaklarının oluşmaya devam ettiği belirlenmiştir. Çelik lif katkılı kirişlerin çatlaklarına kıyasen Sentetik lif eklenmesinin ardından oluşan çatlak genişliklerinin daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Sentetik liflerin daha sünek bir kırılmaya yardımcı olduğu belirlenmiştir. Genel olarak ilk çatlağın oluştuğu noktalar yüklenme noktası çevresinde oluşmuştur. Nano alümin katkılı numunelerde kırılma şekli diğer numunelerden daha sünek bir durumda gerçekleşmiştir. Öyle ki 0,67 a/d oranındaki yüklenme durumunda bile kırılma orta noktada meydana gelmiştir. (Şekil 3) Literatürde bulunan verilerle aynı şekilde donatıyla güçlendirilmiş (13 ve 14. örnek) kirişlerde 0,67, 1,11 ve 2,22 a/d oranlarında doğrudan kesme kırılması görülmüştür. Donatılı numunelerin 2,96 a/d oranına sahip kirişlerinde kesme kırılması etkin olarak görülürken, eğilme çatlakları da belirlenmiştir. Sonuç olarak donatı ile güçlendirilmiş olan numunelerde kesme 0,67-2,96 a/d oranlarında kesme kırılmasından dolayı göçme görülürken, lif katkılı numunelerde göçmelerin tamamı eğilme kırılmasından oluşmuştur. Donatılı numunelere kıyasla lif katkısı daha sünek bir davranış sergilemesine yardımcı olmuştur.

4 SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında Hibrit lif takviyeli yüksek performanslı betonların farklı kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranları altındaki performansları incelenmiştir. Bu kapsamda 2 farklı FA oranı, 2 farklı agrega hacmi ve farklı uzunluklara sahip 2 farklı lif türlerinden karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca büyük ölçekli numuneler üzerinde etkisi incelenmek üzere iki farklı nano malzemesi de karışımlardan bir tanesine eklenerek 28 gün sonunda performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Liflerin kendi arasında karşılaştırılmasının yanı sıra yaygın olarak kullanılmakta olan donatı ile güçlendirilmiş betonlarla da karşılaştırılması için donatılı karışımlarda tasarlanmıştır. Kaba agrega kullanılarak yüksek performanslı hibrit lif takviyeli betonların büyük ölçekli numune olarak üretilebilirliği ve farklı yüklenme noktaları altındaki performansları araştırılmıştır.

Yük taşıma kapasitesi ve performans açısından en iyi numuneler donatı ile güçlendirilmiş kirişler de ölçülmüştür. Fakat donatılı kirişlerin kesme kırılması oluşturması olumsuz bir etken olarak düşünüldüğünde genel olarak en iyi

performansların PVA lifli karışımlarda olduğu gözlemlenmiştir. Enerji yutma kapasitesi değerlerinde en yüksek performans Nano alümin içerikli 16 nolu karışımda elde edilmiştir. Ötelenme oranlarında ise yine en yüksek oran 2,96 a/d oranında POS1N1_0.70_2.0 kodlu 8 nolu karışımda görülebilmektedir.

A/d oranlarının kirişler üzerindeki etkisi incelendiğinde donatı ile güçlendirilmiş numunelerde genel olarak kırılmaların kesme kırılması şeklinde olduğu ve literatür ile benzer şekilde bir davranış sergilediği görülmüştür. Lif katkılı numunelerde ise tamamen kesme davranışının etkin olduğu durumda dahi (0,67) kırılma şekilleri eğilme kırılması olarak belirlenmiştir. Lif katkılı numunelerin tamamında, bütün a/d oranlarında kesme kırılması oluşmamış olup, bütün göçmeler eğilme kırılması şeklinde oluşmuştur.

Karışımlar içerisinde uçucu kül miktarının genel olarak sünek davranışı olumlu yönde etkilerken, yük taşıma kapasitelerinde azalmalara sebebiyet vermiştir. Agrega hacminin artması yük taşıma kapasitesinde UK oranı düşük numunelere olumlu katkı sağlarken, UK oranı yüksek kirişlerde bu etki olumsuz yönde olmuştur. Agrega hacminin artması enerji yutma kapasitelerinde düşümlere sebebiyet vermiştir. Nano silis içerikli karışımlarda hemen hemen bütün mekanik özelliklerde azalmalar görülürken, Nano alümin içerikli karışımlar da ise artışlar görülmüştür.

Genel olarak kaba agrega kullanılarak kaba agrega kullanılarak oluşturulan Hibrit liflerle güçlendirilmiş yüksek performanslı betonların büyük ölçekli üretimleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, kaba agrega kullanımı ile daha az maliyetli üretimler yapmak mümkündür. Çalışma içerisindeki bütün numuneler yapısal olarak kullanılabilir beton özelliklerini sağladığı görülmüştür. Standart donatı ile güçlendirilmiş betonlara kıyasen lifli betonların daha sünek kırılmalar gösterdiği bu çalışma ile de desteklenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmanın Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FBA-2018-15404) kapsamında desteklenmesinden dolayı teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] J. Li, C. Wu, and Z.-X. Liu, "Comparative evaluation of steel wire mesh, steel fibre and high performance polyethylene fibre reinforced concrete slabs in blast tests," *Thin-Walled Struct.*, vol. 126, pp. 117–126, May 2018, doi: 10.1016/j.tws.2017.05.023.
- [2] M. Taş, D. Fidan, and F. Yılmaz, "Uçucu Kül ve Bayburt Taşı ile Zemin Stabilizasyonu," *Bayburt Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, vol. 1, no. 1, pp. 8–14, 2018.
- [3] A. Harison, V. Srivastava, and A. Herbert, "Effect of Fly Ash on Compressive Strength of Portland Pozzolona Cement Concrete," *J. Acad. Ind. Res.*, vol. 2, no. 8, pp. 476–479, 2014.
- [4] P. B. and H. Najm, "High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Mixture Proportions with High Fiber Volume Fractions," *ACI Mater. J.*, vol. 101, no. 4, doi: 10.14359/13361.
- [5] C. E. Bakis, L. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. F. Davalos, and J. Lesko, "FRP composites in construction - State of the art review," *ASCE Compos Constr J*, vol. 6, pp. 78–87, 2002.
- [6] Q. S. Banyhussan, G. Yıldırım, E. Bayraktar, S. Demirhan, and M. Şahmaran, "Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: The effect of aggregate content," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 41–52, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.020.
- [7] G. J. Parra-Montesinos, "High-performance fiber-reinforced cement composites: An alternative for seismic design of structures," *ACI Struct. J.*, vol. 102, no. 5, pp. 668–675, 2005, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-25444507733&partnerID=40&md5=903f2e11b4af542acdeb29edeb462500>.
- [8] C. M. Dry, "Repair and prevention of damage due to transverse shrinkage cracks in bridge decks," in *Smart Structures and Materials 1999: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, May 1999, vol. 3671, pp. 253–256, doi: 10.1117/12.348675.
- [9] S. B. Keskin *et al.*, "Self-healing capability of large-scale engineered cementitious composites beams," *Compos. Part B Eng.*, vol. 101, pp. 1–13, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.06.073.
- [10] I. Sanal, "Effect of shear span-to-depth ratio on mechanical performance and cracking behavior of high strength steel fiber-reinforced concrete beams without conventional reinforcement," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 27, no. 21, pp. 1849–1864, Nov. 2020, doi: 10.1080/15376494.2018.1527963.

- [11] R. Hay and C. Ostertag, "Development and Application of High Performance Green Hybrid Fiber-Reinforced Concrete (HP-G-HyFRC) for Sustainable and Energy-Efficient Buildings," *Key Eng. Mater.*, vol. 629–630, pp. 299–305, Oct. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.299.
- [12] M. de Rooji, K. Van Tittelboom, N. De Belie, and E. Schlangen, *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*, vol. 11. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- [13] G. Yıldırım, F. E. Khiavi, Ö. Anıl, O. Şahin, M. Şahmaran, and R. T. Erdem, "Performance of engineered cementitious composites under drop-weight impact: Effect of different mixture parameters," *Struct. Concr.*, p. suco.201900125, Oct. 2019, doi: 10.1002/suco.201900125.
- [14] J. Qiu, H. S. Tan, and E.-H. Yang, "Coupled effects of crack width, slag content, and conditioning alkalinity on autogenous healing of engineered cementitious composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 73, pp. 203–212, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.07.013.
- [15] Z. Ahmad, S. Iis, Z. Halim, and N. Sarifuddin, "EFFECT OF FIBER LENGTH VARIATIONS ON PROPERTIES OF COIR FIBER REINFORCED CEMENT-ALBUMEN COMPOSITE (CFRCC)," *IJUM Eng. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 63–76, May 2011, doi: 10.31436/iiumej.v12i1.116.
- [16] K.-C. Kim, I.-H. Yang, and C. Joh, "Effects of Single and Hybrid Steel Fiber Lengths and Fiber Contents on the Mechanical Properties of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2018, pp. 1–14, 2018, doi: 10.1155/2018/7826156.