

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ STANDARD KÜRLÜ HARÇLARIN STATİK VE DİNAMİK YÜKLEME ALTINDAKİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(AN INVESTIGATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF
STANDARD CURED ALKALI ACTIVATED MORTARS UNDER STATIC
AND DYNAMIC LOADINGS)

Mert Yücel YARDIMCI¹, Serdar AYDIN²

ÖZ

Bu çalışmada, alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların ana hammaddesi olan yüksek fırın cürufu (YFC) yerine uçucu kül (UK), metakaolin (MK) ve silis dumanı (SD) ikamesinin ve aktivatörün Ms oranının ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) alkalilerle aktive edilmiş standart kürlü harçların (AAH), basınç dayanımları, statik ve düşük hızlı darbe yüklemeleri altındaki eğilme performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, YFC yerine MK ikamesinin mekanik özellikleri olumsuz yönde, SD ikamesinin ise olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Ms oranındaki artış, MK ikamesi ile üretilen harçların mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Darbe yükleri altında, standart su kürüne maruz AAH'lerin eğilme dayanımı ve kırılma enerjisinin statik yüklemedekine kıyasla sırasıyla 2,54 – 4,89 ve 14,20 – 26,93 kat daha yüksek olduğunu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, Düşük hızlı darbe, Düktilite indeksi.

ABSTRACT

In this study, the effects of partial replacement of ground granulated blast furnace slag (YFC) with fly ash (FA), metakaolin (MK) and silica fume (SD) and the silicate modulus of the activator solution on the compressive strength and flexural performance under static and impact loading conditions have been investigated. The reaction forces were recorded by an data acquisition system which is Test results showed that the MK incorporation influenced the mechanical properties negatively while the SD incorporation affected positively. Increasing the Ms ratio of the activator significantly improved the mechanical properties of MK incorporated mixtures. It has been shown that the flexural strength and fracture energy of standard water cured alkali activated mortars under impact loading were 2.54 – 4.89 and 14.20 – 26.93 times more than that of static loading conditions, respectively.

Keywords: Alkali activated cement, low-velocity impact, Ductility index.

1. GİRİŞ

¹ myyardimci@gmail.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İZMİR, serdar.aydin@deu.edu.tr

Alkalilerle aktive edilmiş (AA) bağlayıcılar, atık malzemeler olan uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) gibi amorf karakterli malzemelerin bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilmesiyle üretilmektedir. Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, YFC’nin reaksiyonu sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır. Camsı YFC’nin alkali aktivasyonu ile ilgili çalışmalar eski Sovyetler Birliği, İskandinavya ve Doğu Avrupa ülkelerinde oldukça uzun bir geçmişe sahiptir. İskandinav ülkelerindeki “Trief cements” ile “F-cements” ve “Pyrament” ticari ismiyle satılan; alkalilerle aktive edilmiş katkılı çimentolar AA bağlayıcıların yeni nesil örneklerdir [1]. Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcıların kullanımı, yüksek mekanik performans, düşük enerji giderleri, düşük kirletici gaz emisyonları (CO₂, SO₂, NO_x vb.) ve doğal kaynaklar yerine bazı endüstriyel atıkların yüksek miktarda kullanımı ile çevrenin daha az tahribi gibi sürdürülebilir avantajlar sunmaktadır [2]. Ayrıca, atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama problemleri de azalmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek dayanım [3,4], daha düşük hidrasyon ısı [5], agresif kimyasallara [6,7] ve donma-çözülme etkilerine [8] karşı daha iyi dayanıklılık, daha güçlü agrega-matris aderansı [9] gibi birçok önemli teknik avantaja sahiptir. Bununla birlikte, sayılan olumlu özelliklerin elde edilmesi, uygun bir aktivatör çözeltisinin kullanımına bağlıdır ve seçilen aktivatör çözeltisi kullanılan bağlayıcı tipine uygun değil ise hızlı priz [10], yüksek büzülme değerleri [11,12] ve çiçeklenme [4] gibi birtakım sorunlarla karşılaşılabilir.

YFC’nin su ile reaksiyonu çok yavaş olmakla birlikte, alkali aktivatörden gelen hidroksil iyonlarının (OH⁻) YFC’deki yapının çözünmesini sağlayarak hidrasyon hızını arttırdığı bilinmektedir. Hidrolitik iyonlar NaOH, KOH ve Na₂SiO₃ gibi güçlü alkalilerden ortaya çıkabilmektedir [13]. YFC’nin camsı faz miktarı, kimyasal ve mineralojik kompozisyonu, kullanılan aktivatörün tipi ve konsantrasyonu gibi çok sayıda faktör aktivasyonu etkilemektedir [14]. YFC esaslı AA hamurlarının mikroyapısının gelişimi büyük ölçüde, YFC’nin anyonları ile alkali aktivatördeki katyonların birleşiminden etkilenmektedir. YFC’deki silikat anyonları ile alkalın aktivatördeki katyonlar arasındaki iyon değişiminin oluşturduğu kimyasal reaksiyon, silika jeli oluşturur. Bu silika jeli, YFC’deki kalsiyum iyonlarıyla daha ileri reaksiyon sonucunda, silika bakımından zengin C-S-H jeline dönüşebilir. Bazı araştırmacılar, Na₂O-CaO-SiO₂-H₂O (N-C-S-H) varlığı ile ilgili bir kanıt olmasa da, AA-YFC’deki Na⁺ iyonlarının suda çok düşük çözünürlüğünden ötürü, katı bir N-C-S-H çözeltisinin oluşumunu kabul etmektedir. YFC esaslı AA hamurlarında C-S-H jelinin oluşumu ve UK esaslı AA hamurlarında polimerizasyonun oluşumu için aktivasyon mekanizması, genellikle toplam bağlayıcıdaki molar Si/Al oranı, kaynak malzeme ve alkalın aktivatörün düzenlenmesi ve alkalın aktivatör konsantrasyonundan etkilenmektedir. Ayrıca, kaynak malzemedeki Ca⁺² iyonunun miktarı, C-S-H jelinin oluşumu üzerinde etkilidir. Bu nedenle, AA bağlayıcıların mekanik dayanımı, alkali aktivatördeki SiO₂/Na₂O oranına, kaynak malzemedeki SiO₂/Al₂O₃ oranına ve Ca⁺² içeriğine bağlıdır [15].

YFC ve UK dışında metakaolin (MK), kırmızı çamur, stilbit vb. malzemeler AA’da ana bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Aktivatör olarak ise, potasyum hidroksit, sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat gibi alkaliler kullanılabilir. Bununla birlikte, dayanım özellikleri bakımından en iyi sonuçlar cam suyu çözeltisi (sıvı sodyum silikat) ile aktive edilmiş YFC karışımlardan elde edilmektedir [16]. Örneğin, Çin’de cam suyu ile aktive edilmiş YFC betonlarında, herhangi bir ısıtma işlemi veya özel katkı kullanmaksızın 60 ile 150 MPa arasında basınç dayanımı elde edilmiştir [3]. Aydın [17]

tarafından yapılan çalışmalarda ise, Portland çimentosu kullanılmadan YFC ve SD'nin aktivasyonu ile buhar kürü uygulanarak 220 MPa basınç dayanımına sahip Reaktif Pudra Betonlarının üretimi gerçekleştirilmiştir.

Yapı malzemeleri servis ömürleri boyunca çeşitli nedenlerle darbe yüklerine maruz kalabilmektedir. Bu yüklemeler, yapı elemanlarına çeşitli cisimlerin genellikle kazara çarpması ile (araç çarpmaları, hızlı hareket eden hava taşıtlarının çarpmaları, askeri yapılardaki çarpma olayları, endüstriyel yapılardaki zeminlerde ağır parça düşmeleri sonucu hasarlar gibi) oluşmaktadır. Ayrıca, mermi gibi rijit veya yarı-rijit cisimlerin yüksek hızda çarpmalarından oluşan darbe tesirleri de darbeye maruz kalma nedenleri arasında bulunmaktadır. Yapı elemanlarının ani gelişen darbe yüklemelerine karşı performansları darbe yükünün hızına bağlı olduğu kadar darbeye maruz elemanın yapıldığı malzemenin karakteristik özelliklerine de büyük oranda bağlıdır [18]. Çimentolu kompozitlerin darbe yükleri altındaki performansları çok yüksek, yüksek ve düşük hızlı darbe düzenekleri ile incelenmektedir. Çok yüksek hızlı darbe testlerinde 300 m/s civarındaki çarpma hızları, yüksek hızlı darbe testlerinde ise 50 – 100 m/s hızında bir çarpma etkisi oluşturabilecek darbe düzenekleri kullanılmaktadır [19, 20]. Bu testler genellikle donatılı plak örnekler üzerinde yapılmakta olup, mermi formundaki cisimlerin genellikle gaz tabancası veya topu ile hedefe atılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Öte yandan düşük hızlı darbe testlerinde ihtiyaç duyulan çarpma hızları belirli bir ağırlıktaki rijit bir cismin (örneğin bir çelik parça) genellikle serbest düşme veya çift kolonlu bir düşürme mekanizması kullanılarak serbest düşmeye yakın koşullarda kontrollü düşürülmesi ile sağlanmaktadır. Bu şekildeki ağırlık düşürme sistemlerinin önemli bir avantajı, belirli bir yükseklikten düşürülen büyük kütleli cisimleri göreceli olarak daha düşük ve istenilen hızda kontrollü olarak düşürmeye olanak tanımasıdır. Diğer bir ifade ile yüksek enerji seviyelerinde ancak daha düşük hızlarda darbe testleri yapılabilmektedir. Bu tip testlerde hızlar genellikle bir kaç m/s civarında oluşmaktadır [18]. Literatürde düşük hızlı darbe test sistemi daha çok tercih edilen bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun önemli bir diğer nedeni de sistemde düşük hızların oluşmasından dolayı yük ve deplasman gibi önemli parametrelerin ölçme işlemlerinin de çok hızlı gerçekleşen darbe testlerine göre göreceli olarak kolaylaşmasıdır.

Yük ve deplasman gibi değerlerin zamana bağlı değişiminin kaydedilmesi darbe etkisine maruz çimentolu kompozitlerin davranışlarının açıklanması açısından çok önemlidir. Ani gelişen darbe olaylarına maruz kalacak çimentolu kompozitlerin mühendislik tasarımı açısından daha kritik hali, eğilme etkisi oluşturan darbe yüklemeleridir. Bu nedenle, darbe etkisine maruz çimentolu kompozitler için eğilme örnekleri üzerinde oluşan darbe yükü – kiriş deplasmanı ilişkilerinin elde edilebildiği test yöntemleri önerilmektedir [21, 22]. Bu testlerde basit mesnetli kiriş örnekler üzerine belirli bir yükseklikten rijit bir parça kiriş orta noktasına düşürülmekte, bir kaç milisaniye içerisinde ortaya çıkan kuvvetler ve ivmeler ile kiriş orta nokta deplasmanlarının zamanla değişimi hızlı data toplama sistemleri ile kaydedilmektedir [23, 24].

Uçlarından basit mesnetlenmiş kiriş formundaki eğilme örneğine belirli bir yükseklikten düşerek çarpan cisim ile örnek arasında oluşan ve zamana bağlı değişen temas kuvvetleri (darbe yükünün), kiriş üzerine etkileyen ve kiriş örneğin deplasmanına ve kırılmasına neden olan kuvvet olmayıp, bu kuvvetin yalnızca küçük bir kısmı kirişin deplasmanına ve hasarına sebep olur. Kiriş üzerine etkileyen bu net kuvvet, mesnet reaksiyonlarının toplamına eşit olmaktadır [25]. Dolayısıyla bu tip testlerde sadece düşen cisim ile kiriş örnek arasında oluşan darbe yükünün ölçümü yeterli olmamaktadır. Bunun yanında kirişte asıl deformasyona neden olan ve darbe yükünden daha az seviyelerde oluşan kiriş yükünün (mesnet

reaksiyonlarının toplamı) de sağlıklı bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Tek serbestlik dereceli bir sistem olarak kabul edilebilecek bu eğilme düzeneklerinde, kirişin sönüm etkileri ihmal edilecek olursa, dinamik denge denklemi Eşitlik 1'deki gibidir.

$$M \cdot \ddot{u}(t) + P_b(t) = P_{ext}(t) \quad (1)$$

Bu eşitlikte M kirişin kütesini, P_{ext} kiriş üzerine belirli bir yükseklikten düşen ağırlık nedeniyle oluşan dış yükü, P_b kiriş üzerinde oluşan gerçek darbe eğilme yükünü ve darbe etkisiyle oluşan kiriş orta nokta deplasmanının (u) ikinci türevinden oluşan \ddot{u} ise kiriş orta noktası ivmesini göstermektedir. Dolayısıyla eşitliği $M \cdot \ddot{u}(t)$ kısmı dinamik atalet kuvveti olmaktadır (P_i). Buna göre; böylesi bir düzenekte kiriş üzerinde darbe etkisi nedeniyle oluşan gerçek eğilme yükü (P_b) Eşitlik 2'deki gibidir.

$$P_b = P_{ext} - P_i \quad (2)$$

Eğilme örneği tek bir darbe etkisiyle iki parçaya ayrılırsa, eğilme yükü – deplasman eğrisinin altında kalan alan olarak göz önüne alınabilecek kiriş tarafından sönümlenen enerji, kiriş üzerine düşen cismin düşüşü sırasında harcanan toplam enerjiden daima küçük olacaktır. Düşen cisimde meydana gelen toplam enerji kaybı ile ikiye ayrılan parçalarda harcanan enerji arasındaki fark kirişin atalet enerjisinin toplamı ve kırılan kiriş parçalarının kinetik enerjilerinin toplamı olmaktadır. Öte yandan, eğer kiriş eleman tek bir darbe etkisi ile iki parçaya ayrılmazsa (tipik olarak lif donatılı kompozitlerde olduğu gibi) kiriş örnek tarafından harcanan eğilme enerjisi (kiriş yükü – deplasman eğrisinin altında kalan alan) kiriş üzerine düşen cismin düşüşü sırasında kirişe aktarılan enerjiye çok yakın olmalıdır. Başka bir ifade ile gerçek kiriş yükü – deplasman eğrisi altında kalan alan ile dış yük – deplasman eğrisi altında kalan alan birbirine çok yakın olmaktadır. Bu durumun temel nedeni atalet ve kinetik enerjilerin kirişe aktarılmasıdır. Her iki durumda da mesnet reaksiyonlarının toplamının kiriş üzerinde darbe tesiri ile oluşan gerçek kiriş yüküne eşit olduğu belirtilmekte ve kullanılmaktadır [22 - 25].

Alkalilerle aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özellikleri ile ilgili olarak son yıllarda önemli sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, darbe etkilerine karşı dayanıklılığı yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışmada, Aydın [17] tarafından yapılan çalışmalarda alkalilerle aktive edilmiş harçların kuruma büzülmesini azalttığı belirlenen uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin kullanımının alkalilerle aktive edilmiş standart kürlü harç karışımların statik yüklemeye altındaki basınç dayanımı ile statik ve düşük hızlı darbe yüklemeye altındaki eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve süneklilikleri araştırılmıştır. YFC yerine %30 UK, %15 MK ve %15 SD ikamesi yapılmış olup, ikame oranları Aydın [17] tarafından yapılan önçalışmalar neticesinde belirlenmiştir.

2. KULLANILAN MALZEMELER VE DENEYSEL YÖNTEM

2.1. Kullanılan malzemelerin özellikleri ve karışımlar

Çalışmada kullanılan bağlayıcılar, endüstriyel atık ve yan ürünler olan YFC, UK ve SD ile kaolin grubu killerin kalsinasyonu ile elde edilen MK'dır. Kullanılan yüksek fırın cürufu KARÇİMSA firmasından temin edilmiş olup, 45 µm elekten geçen malzeme miktarı %90'dır. Hidrolik modül $[(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2]$ değeri 1,39; baziklik indeksi $[Kb=(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)]$ ise 0,91'dir. Kullanılan UK, F sınıfı bir kül olup Tunçbilek termik santralinden elde edilmiştir. MK ve SD ise ticari olarak pazarlanan ürünler olup BASF

firmasından temin edilmiştir. Kullanılan bağlayıcıların kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

	YFC	UK	SD	MK
SiO ₂ (%)	38,38	56,55	92,25	52,47
Al ₂ O ₃ (%)	9,63	18,01	0,88	42,21
Fe ₂ O ₃ (%)	0,96	10,16	1,98	0,34
CaO (%)	35,77	4,17	0,51	0,3
MgO (%)	8,10	5,11	0,96	0,26
K ₂ O (%)	0,99	1,54	0,12	0,9
Na ₂ O (%)	0,23	0,07	0,45	0,1
SO ₃ (%)	0,18	0,39	0,33	-
TiO ₂ (%)	0,23	-	-	0,72
MnO (%)	-	-	-	0,01
Kızdırma kaybı (%)	0,88	0,96	1,81	-
Serbest CaO (%)	-	-	-	-
Fiziksel Özellikler				
Özgül Ağırlık	2,88	2,16	2,20	2,50
Özgül yüzey, m ² /kg	413	250	-	1,3 µm (Ort. tane boyutu)

Kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) ve cam suyu Merck firmasınca üretilen ticari ürünlerdir. Sodyum hidroksit %97 saflıkta olup, granül halde temin edilmiştir. Cam suyunun (sıvı sodyum silikat) ortalama kimyasal kompozisyonu %8 Na₂O, %27 SiO₂ ve %65 H₂O’dan oluşmaktadır. Malzemelerin kimyasal kompozisyonu üretici firma katalogundan temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılan agrega, maksimum tane çapı 4 mm, kuru özgül ağırlığı 2,57 ve su emme kapasitesi % 1,43 olan kireçtaşı kökenli kırma kumdur.

Harç karışımlarının agrega / bağlayıcı oranı ağırlıkça 2,75 olarak sabit tutulmuştur. Karışımların su miktarı deneme-yanılma yöntemi ile yayılma değeri 120 ± 3 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Öncelikle homojen bir kuru karışım elde etmek amacıyla, agrega ve

bağlayıcılar Hobart mikserde 1 dakika kuru olarak karıştırılmıştır. Malzemelerin aktivasyonu için iki farklı çözelti ayrı ayrı kullanılmıştır. Çözeltilerin Na₂O içeriği kullanılan bağlayıcının %6'sı kadar olup Ms oranları (SiO₂/Na₂O) ise 0,8 ve 1,2'dir. Çözelti ilavesinin ardından 1,5 dakika düşük devirde ve 1,5 dakika yüksek devirde karıştırma yapılarak karışımlar hazırlanmıştır. Harç karışımlarının işlenebilirliği ASTM C348 "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars" standardında belirtildiği gibi 25 kez yayılma tablasında düşürülerek belirlenmiştir. Ardından, 40x40x160 mm boyutlu prizmatik kalıplara iki tabaka halinde her tabaka 1 dakika sarsma tablasında sarsılarak ve aynı zamanda 25 tokmak darbesi ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Örnekler kalıptan çıkarılıncaya kadar neme doymun ortamda yaklaşık 25 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan örneklere 27 gün boyunca standart su kürü uygulanmıştır. Çalışmada sunulan tüm mekanik deney sonuçları 28 günlük örneklerden elde edilen değerlerdir. Hazırlanan karışımların aktivatör tipi, bağlayıcı kompozisyonu, su/bağlayıcı oranı ve elde edilen yayılma çapları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Hazırlanan karışımların su/bağlayıcı (S/B) oranı ve yayılma çapı değerleri.

AKTİVATÖR	BAĞLAYICI KOMPOZİSYONU	YAYILMA (mm)	SU/BAĞLAYICI ORANI
%6 Na ₂ O Ms=0,8	%100 YFC	123	0,38
	%70 YFC+%30 UK	119	0,37
	%85 YFC+%15 MK	117	0,39
	%85 YFC+%15 SD	124	0,25
%6 Na ₂ O Ms=1,2	%100 YFC	122	0,38
	%70 YFC+%30 UK	119	0,37
	%85 YFC+%15 MK	118	0,39
	%85 YFC+%15 SD	123	0,25

2.2. Test yöntemleri

Çalışmada üretilen 40 x 40 x 160 mm boyutlu prizmatik örneklerin orta noktasından 6 mm derinliğinde çentik açılmış ve üç noktalı yükleme formunda gerçekleştirilen statik ve düşük hızlı darbe yüklemeleri altında yük – sehim eğrileri elde edilmiştir. Şekil 1'de çentik açılmış bir örnek görülmektedir.

Statik eğilme deneyinde kapalı çevrimli üniversal yükleme cihazı kullanılmıştır. Örnekler, deformasyon kontrollü olarak tek noktadan yüklenmiş olup mesnet açıklığı 130 mm'dir.



Şekil 1. Çentik açılmış bir örnek

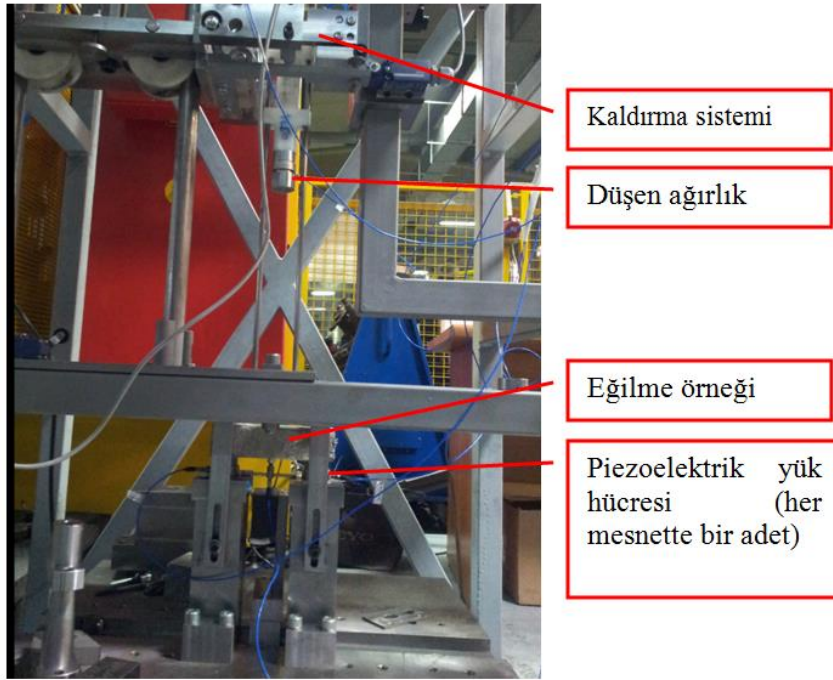
Deney sırasında ani enerji boşalmasının önlenmesi ve tüm kırılma süreci boyunca numune kırılıp iki parçaya bölününceye kadar, yük-sehim eğrilerinin kaydedilebilmesi için prese geri beslemeli olarak, numunelerin orta nokta sehimlerini ölçen Heidenhein marka 1 µm ölçüm hassasiyetinde optik encoder verileri kullanılmıştır. Deney bu şekilde kapalı çevrimli olarak tüm seriler için numune tamamen kırılıp yük taşıyamaz hale gelene kadar 0,01 mm/dak hızında yapılmıştır. 5 Hz frekansında çalışan veri toplama kartına alınan verilerden yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Her karışım için test edilen 3 numuneden ortalamaya en yakın olanı ilgili bölümde sunulmuştur.

Düşük hızlı darbe testleri, silindir formundaki rijit bir cismin istenilen yüksekliğe otomatik olarak kaldırılıp, bu yükseklikten otomatik olarak düşürülmesi ile oluşturulan darbe olayı sırasında darbeye maruz örnek üzerinde oluşan temas kuvvetleri, mesnet reaksiyonları ve orta nokta deplasmanının eş zamanlı kaydına olanak veren düzeneklere sahip bir darbe cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan darbe cihazının genel görüntüsü Şekil 2’de görülmektedir. Darbe sisteminin elektronik aksamı, darbe sistemlerinde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan piezoelektrik yük hücreleri, ivme ölçerler, temassız deplasman ölçer ve bunların datalarını bilgisayar sisteminde PCI veri yolu ile bağlı bulunan data toplama kartına almakta kullanılan ara elektronik düzenekleri içermektedir. Sistemde 8 kanallı, kanal başına 500 kHz/sn hızında veri toplayabilen hızlı bir data toplama kartı kullanılmıştır. Kullanılan data toplama kartına sensörlerden gelen sinyaller öncelikle sinyal düzenleyiciye alınmış, sinyal düzenleyiciden geçen sinyaller konnektör bloğu üzerinden bilgisayara PCI porttan bağlı bulunan data toplama kartına alınmıştır. Deneylerde tüm sensörler analog kanallardan 200 kHz frekansında toplanmıştır. Lazer sensörün dataları ise, data toplama kartının analog kanalına lazer sensörün kendi işlem ünitesinden hızlı bir şekilde geçtikten sonra aktarılmaktadır.

Gerek statik üç noktalı yükleme deneyinde, gerekse düşük hızlı darbe etkisi altında üç noktalı eğilme deneyinde çentikli kiriş örneklerin yük-orta nokta deplasmanı eğrileri numune iki parçaya bölünüp yük taşıyamaz hale gelene kadar elde edilebildiğinden, serilerin statik ve dinamik yükleme altındaki kırılma enerjileri Eşitlik 3’e göre [26, 27] hesaplanmıştır.

$$Gf = \frac{W_0 + m.g.\delta_0}{A_{net}} \quad (3)$$

Bu eşitlikte; W_0 eğilme deneyinde yük sıfıra inene kadar yük – sehim eğrisi altında kalan alan, m kirisin mesnetleri arasında kalan kısmının ağırlığı, g yerçekimi ivmesi ve A_{net} ise prizmatik eğilme örneğinde çentik açıldıktan sonraki net en kesit alanıdır. Kırılma enerjisinin birimi N/m veya Joule/m²’dir.



Şekil 2. Düşük hızlı darbe sistemi genel görünüşü

Kırılma enerjisi, malzemelerin kırılma süreci ile ilgili önemli bilgiler veren bir kırılma parametresidir. Ancak, Eşitlik 3'deki RILEM 50-FMC'ye [27] göre belirlenen kırılma enerjisi, örnek boyutlarına da bağlı bir parametredir [28]. Bu nedenle bir malzeme sabiti olarak kabul edilmeyip bazı durumlarda örneğin sünekliği hakkında fikir vermeyebilir. Bu nedenle Chiaia vd. [29] tarafından "düktilite indeksi" adı verilen bir parametre önerilmiştir. Düktilite indeksi (D_i) hesaplanan kırılma enerjisinin, eğilme deneyinde elde edilen maksimum eğilme yüküne (P_u) bölünmesiyle elde edilmektedir. Öte yandan, eğilme deneyindeki maksimum yük de boyuta bağlı bir parametre olduğundan P_u yerine nominal gerilme değeri (σ_n) kullanılarak düktilite indeksi şu şekilde tanımlanmıştır.

$$D_\sigma = \frac{G_f}{\sigma_n} \quad (4)$$

Bu ifadeye $\sigma_n = c_n \cdot \frac{P_u}{b \cdot d}$ dir. c_n , değeri 1 olan bir katsayı, b ve d ise eğilme örneğinin yükseklik ve genişliğidir. Serilen süneklikleri Eşitlik 4'de gösterilen ifade ile değerlendirilmiştir.

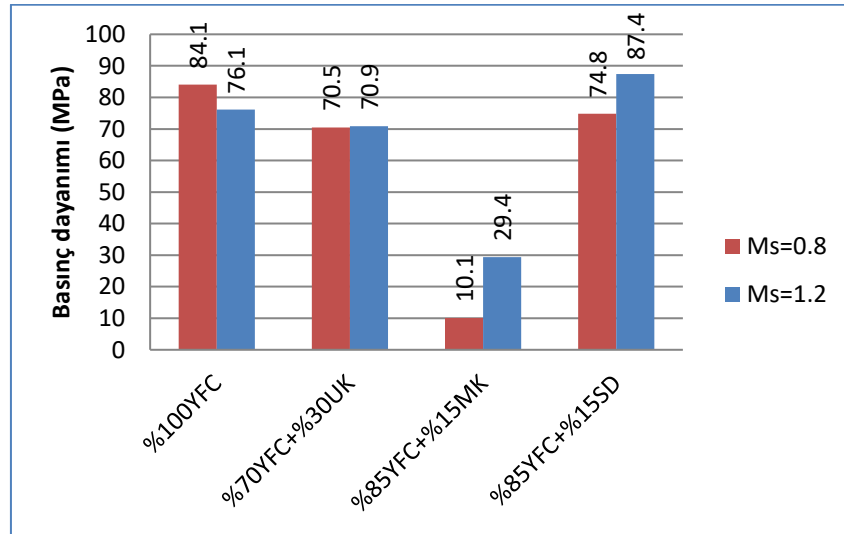
Serilerin basınç dayanımları, statik yükleme altında gerçekleştirilen eğilme deneyinden geriye kalan parçalar üzerinde yapılan tek eksenli basınç testi ile belirlenmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar bu kısımda sunulmuştur.

3.1. Basınç dayanımı

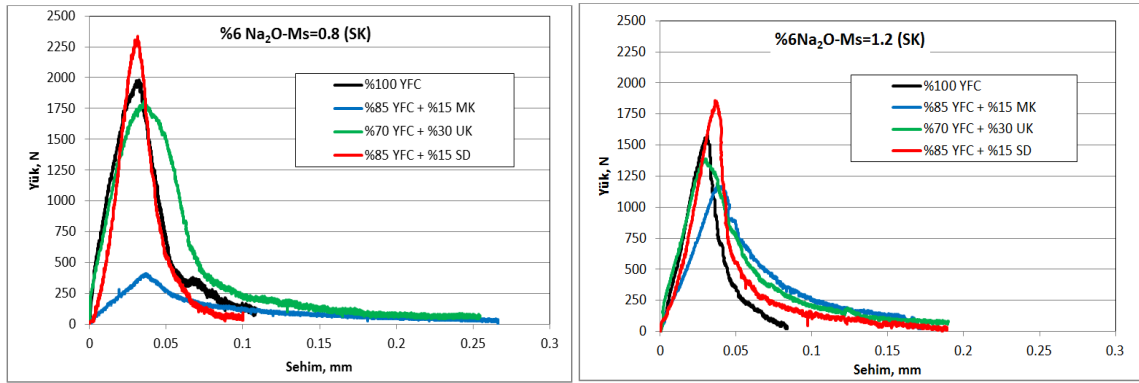
Çalışma kapsamında üretilen standart su kürü görmüş AAH'lerin basınç dayanımı seviyeleri Şekil 3'de görülmektedir. Aktivatör çözeltisinin ve kullanılan mineral katkı türünün standart kür görmüş AAH'lerin basınç dayanımı üzerine önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bağlayıcının tamamen YFC'den oluşması durumunda (%100YFC) aktivatörün Ms oranındaki artışla basınç dayanımı yaklaşık %10 oranında azalmaktadır. Ancak YFC'nin %30 oranında UK ile yer değiştirmesi durumunda (%70YFC+%30UK) AAH'nin basınç dayanımının Ms oranındaki artıştan etkilenmediği görülmektedir. %15'lik MK ve SD ikameleri durumunda (%85YFC+%15MK ve %85YFC+%15SD) AAH'in basınç dayanımının aktivatörün Ms oranındaki artıştan olumlu yönde etkilendiği ortaya çıkarılmıştır. Basınç dayanımı açısından ilginç bir sonuç %15'lik MK ikamesinde elde edilmiştir. %85YFC+%15MK içeren karışımın basınç dayanımı Ms oranı 0,8 olduğunda %100YFC içeren karışıma göre %88 daha düşüktür. Aktivatörün Ms oranı 1,2'ye çıkarıldığında %100 YFC'ye göre basınç dayanımı kaybı %61'e düşmüştür. Bu durum MK içeren karışımların cüruh içerenlere göre daha fazla aktivatör konsantrasyonuna gerek duyması ile açıklanabilir. Elde edilen sonuçlardan, standart su kürü durumunda, aktivatörün Ms oranının AAH kompozitlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin kullanılan bağlayıcı türüne göre değişken olduğu, aktivatörün Ms oranının MK ve SD ikame edilmiş karışımların basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Tüm seriler içerisinde en yüksek basınç dayanımına sahip serinin Ms oranı 1,2 olan %85YFC+%15SD serisi olduğu, en düşük basınç dayanımına sahip serinin ise Ms oranı 0,8 olan %85YFC+%15MK serisi olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Standart su kürü durumunda AAH'lerin basınç dayanımına bağlayıcı tipi ve aktivatörün Ms oranının etkileri

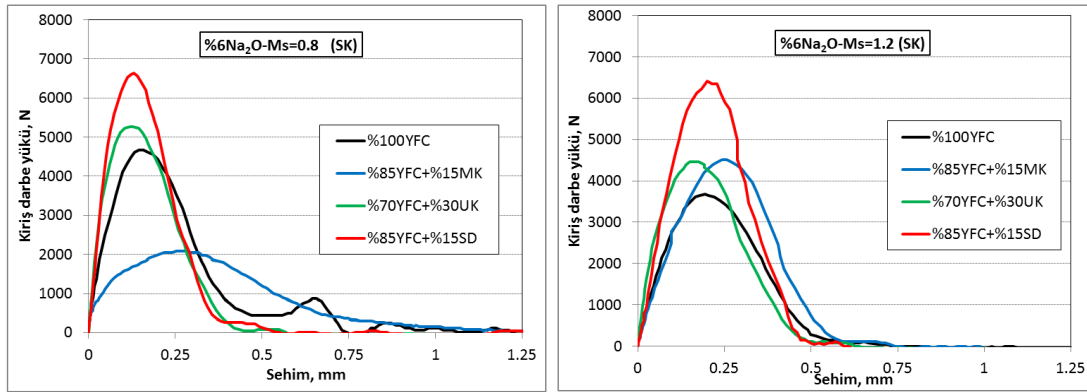
2.2 Serilerin statik ve düşük hızlı darbe yüklemeleri altındaki eğilme performansı

Çalışma kapsamında üretilen AAH'lerden statik ve düşük hızlı darbe yüklemelerinde elde edilen yük-sehim eğrileri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 4. Standart su kürü görmüş AAH'lerin statik yüklemeye durumunda elde edilen yük-sehim eğrileri.

Şekil 4'den görüldüğü gibi, çentikli AAH eğilme örneklerinin yük-sehim eğrilerinin maksimum yükten sonraki alçalan kısmı kapalı çevrimli üç-noktalı statik eğilme deneyi ile başarılı bir şekilde elde edilebilmiştir. Yine aynı şekilde, Şekil 5'den görüldüğü gibi, ortasından çentikli AAH eğilme örneklerinin darbe yüklemesi durumunda da yük-sehim eğrisinin maksimum yükten sonraki azalan kısmı kullanılan çok hızlı data toplama sistemi ile başarılı bir şekilde kaydedilebilmiştir. Her iki yüklemeye durumunda da örneklerin yük-sehim eğrileri numune kırıp iki parçaya ayrılıp yük sıfıra inene kadar elde edilebildiğinden kırılma parametreleri Eşitlik 3'e göre hesaplanarak takip eden kısımlarda sunulmuştur.



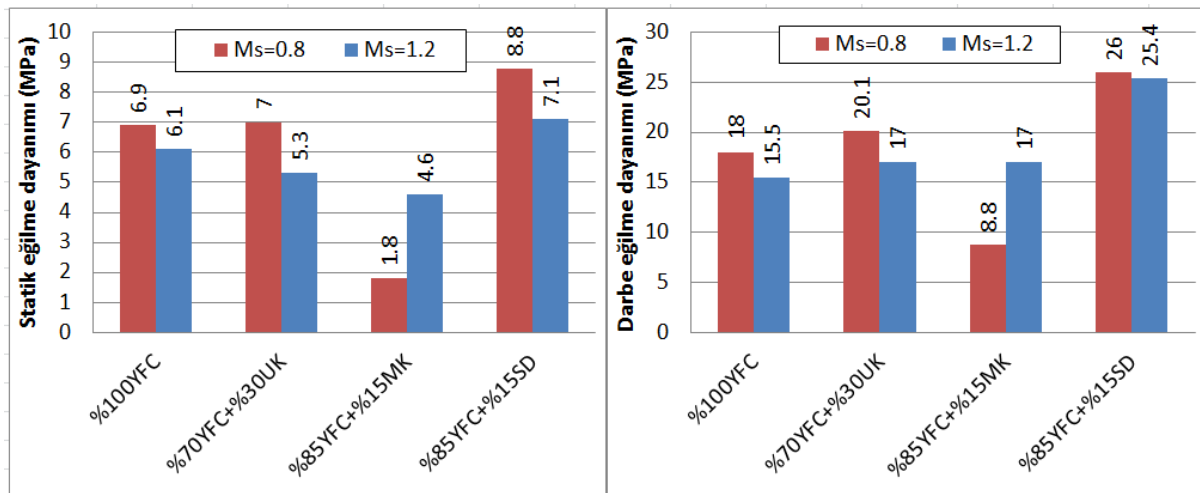
Şekil 5. Standart su kürü görmüş AAH'lerin darbe yüklemesi durumunda elde edilen yük-sehim eğrileri.

Statik yüklemeye durumunda (Şekil 4) serilerin yük-sehim eğrisinin çıkış kısmının %15 MK ikamesi ile üretilen AAH'lar dışında benzer olduğu gözlenmektedir. YFC yerine %15 MK ikamesi ile üretilen AAH'larda maksimum eğilme yükü Ms oranının 0,8 olması halinde diğer bağlayıcı kombinasyonlarından belirgin şekilde düşüktür. Ayrıca bu Ms oranında, %15 MK ikamesi ile üretilen AAH'ın yük-sehim eğrisinin alçalan kısmının eğimi diğer karışımlara kıyasla düşüktür. %100 YFC bağlayıcılı AAH'lar ve YFC yerine %15 SD ikamesi ile üretilen AAH'larda ise eğrinin alçalan kısmı oldukça diktir. Genellikle diğer serilere kıyasla daha düşük eğilme dayanımına sahip olan %15 MK ikamesi ile üretilen AAH'ın maksimum yüke karşılık gelen orta nokta deplasmanının bir miktar daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Ayrıca bu seride elde edilen maksimum sehim de bir miktar daha yüksektir. Bu durum, düşük

dayanımlı olan ve muhtemelen daha boşluklu yapıya sahip bu serilerde çatlak yolunun dolaylı olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Darbe yüklemesi durumunda (Şekil 5), yük-sehim eğrisi karakteri açısından statik yüklenme ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak darbe yüklemesine maruz bırakılan serilerde eğilme dayanımı daha düşük olduğunda yük-sehim eğrisinin çıkış eğiminin de bir miktar daha az olduğu gözlenmektedir.

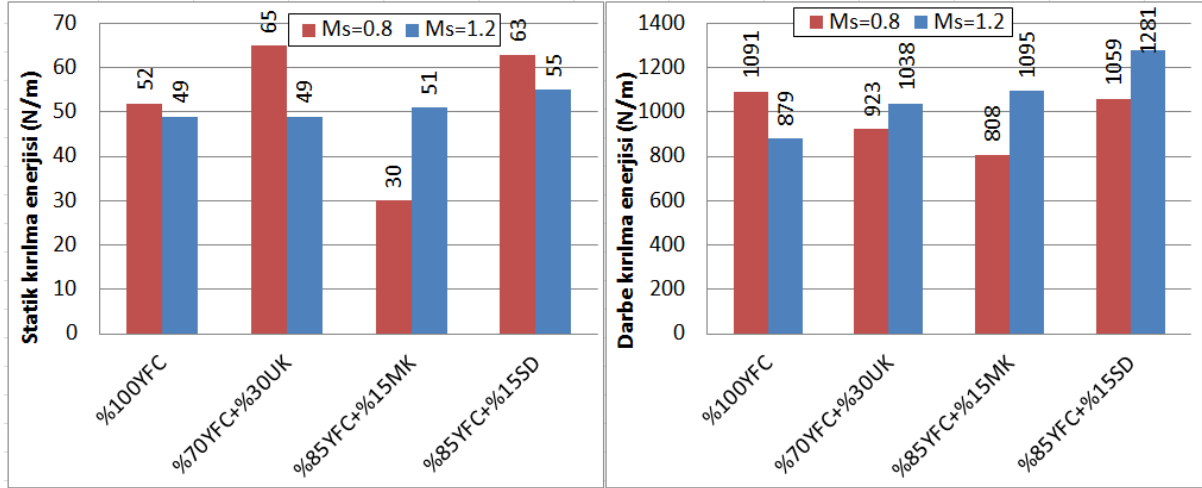
Eğilme dayanımı: Karışımların statik ve darbe yüklemeleri durumlarında elde edilen yük-sehim eğrilerinden hesaplanan eğilme dayanımları Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'dan görüldüğü gibi, her bağlayıcı kompozisyonu ve Ms oranında AAH'lerin darbe yüklemesindeki eğilme dayanımları statik yüklemesindeki eğilme dayanımlarından çok belirgin bir şekilde daha yüksek olarak elde edilmiştir. Standart kür görmüş AAH'lerde aktivatörün Ms oranının 0,8'den 1,2'ye çıkarılması, MK ikame edilmiş seri hariç, hem statik hem de darbe eğilme dayanımında değişen oranlarda düşüşlerle sonuçlanmıştır. MK ikame edilmiş serilerde ise Ms oranının 0,8'den 1,2'ye çıkarılmasıyla her iki yüklenme durumunda da daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir. Tüm seriler ve yüklenme koşulları göz önüne alındığında; en yüksek eğilme dayanımlarının YFC yerine %15SD ikame edilmiş serilerden elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6. Standart su kürü görmüş AAH'lerin statik ve darbe yüklemesi durumunda eğilme dayanımları.

Kırılma enerjisi: Karışımların statik ve darbe yüklemeleri durumlarında elde edilen yük-sehim eğrileri kullanılarak Eşitlik 3'e göre hesaplanan kırılma enerjileri Şekil 7'de sunulmuştur. Eğilme dayanımında olduğu gibi darbe yüklemesinden elde edilen kırılma enerjileri statik yüklemeden elde edilen kırılma enerjilerinden çok belirgin bir şekilde daha yüksektir. Statik yüklenme durumunda, aktivatör çözeltisinin Ms oranının 0,8 olması halinde en düşük kırılma enerjisi %15 MK ikamesinin yapıldığı seride elde edilmiştir. Bu seride elde edilen kırılma enerjisi %100 YFC içeren karışımın kırılma enerjisine göre yaklaşık %42 daha düşüktür. Bu Ms oranında statik yüklemeye elde edilen en yüksek kırılma enerjisi ise %30 UK ikamesi yapılan seride elde edilmiştir. Bu seriyi %15 SD ikame edilmiş karışım izlemektedir. Aktivatör çözeltisinin Ms oranının 0,8'den 1,2'ye artırılması %15'lik MK ikamesi haricindeki tüm serilerde değişen oranlarda kırılma enerjisinde azalma ile sonuçlanmıştır. Ms oranındaki artış, diğer serilere göre kırılma enerjisi oldukça düşük olan MK karışımının statik yüklenme altındaki kırılma enerjisini yaklaşık %70 arttırmıştır.

Kullanılan aktivatör çözeltisinin M_s oranının AAH karışımların darbe yüklemesi altındaki kırılma enerjileri üzerindeki etkisinin, statik yüklemeye altındaki kırılma enerjilerinden daha farklı olduğu görülmüştür. %100 YFC karışımında, statik yüklemeye altındaki kırılma enerjisinde olduğu gibi, M_s oranında artışla kırılma enerjisi azalma göstermiştir. Ancak UK ve SD ikame edilmiş serilerin darbe yüklemesi altındaki kırılma enerjilerinin M_s oranı arttıkça artış gösterdiği Şekil 7'den görülmektedir.



Şekil 7. Standart su kürü görmüş AAH'lerin statik ve darbe yüklemesi durumunda kırılma enerjileri.

Dinamik artış faktörü: Çalışma kapsamında üretilen AAH'lerin dinamik artış faktörleri Çizelge 3'de sunulmuştur.

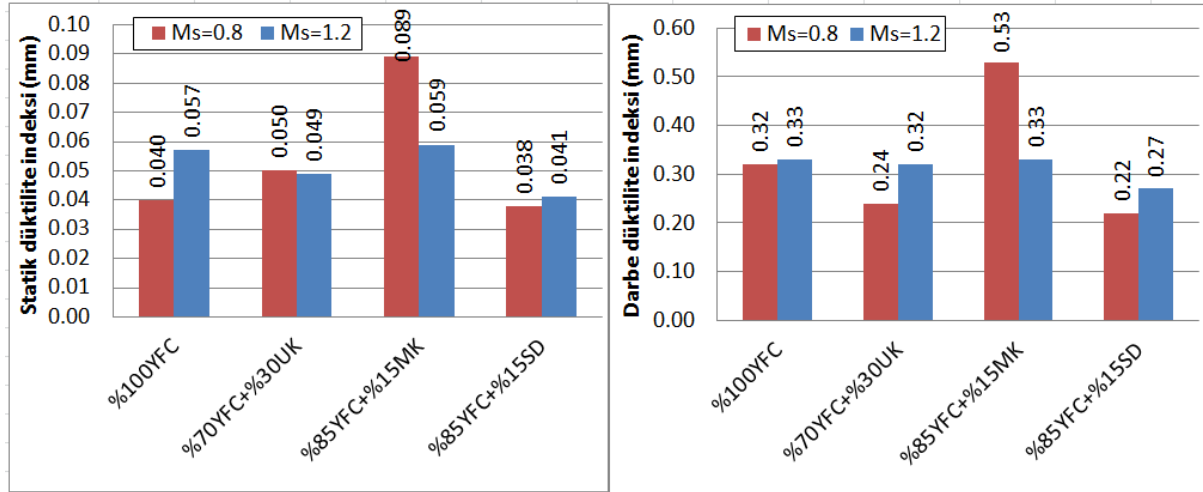
Çizelge 3. Standart su kürü görmüş AAH'lerin eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi için dinamik artış faktörleri.

		%100YFC	%70YFC+%30UK	%85YFC+%15MK	%85YFC+%15SD
$M_s=0,8$	Eğilme dayanımı	2,61	2,87	4,89	2,95
	Kırılma enerjisi	20,98	14,20	26,93	16,81
$M_s=1,2$	Eğilme dayanımı	2,54	3,21	3,70	3,58
	Kırılma enerjisi	17,94	21,18	21,47	23,29

Dinamik artış faktörü ilgili mekanik özellik için dinamik yüklemeye koşullarında elde edilen değerin statik yüklemeye koşullarında elde edilen değere bölünmesi ile elde edilen boyutsuz bir parametredir. Dinamik artış faktörü, bir mekanik özelliğin daha yaygın olan statik yüklemeye

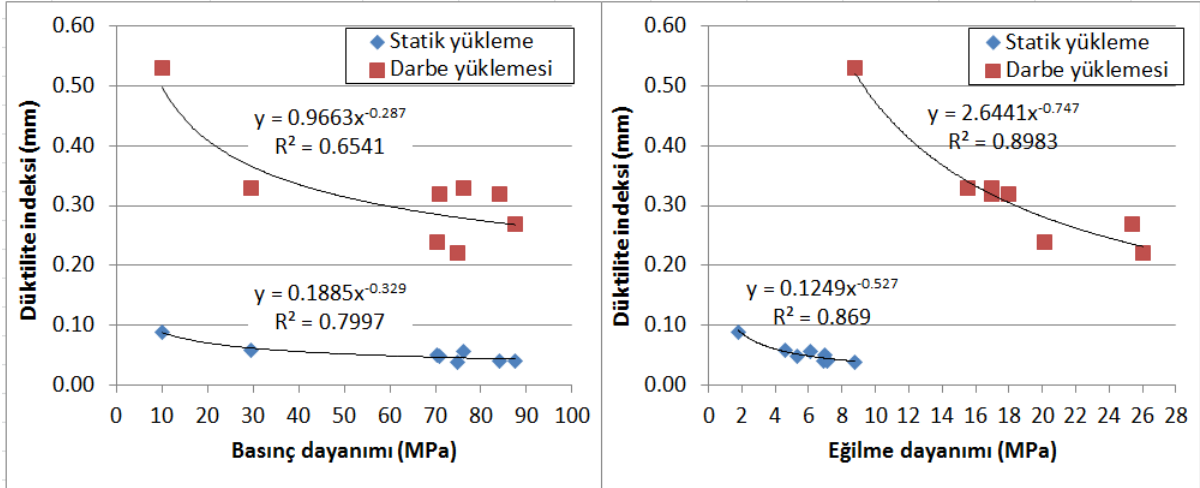
koşullarında değeri biliniyorsa darbe yüklemesi koşullarında alabileceği değer hakkında fikir veren bir mühendislik parametresidir. Çizelge 3'den görüldüğü gibi değişik bağlayıcı kompozisyonları ve aktivatör çözeltisi M_s oranlarına sahip, 28 gün standart su kürü görmüş AAH'lerin dinamik artış faktörleri eğilme dayanımı için 2,54 ile 4,89 arasında ve kırılma enerjisi için ise 14,20 ile 26,93 arasında değişmektedir. Bu değerler değişik su/bağlayıcı oranlarına sahip standart su kürü görmüş Portland çimentolu karışımlar için literatürde verilen değerlere yakındır [22, 30-37]. Kırılma enerjisi için elde edilen dinamik artış faktörü değerleri eğilme dayanımı için elde edilenlerden, yine Portland çimentolu karışımlar için mevcut literatürden belirtildiği gibi, belirgin derecede daha yüksektir.

Düktilite indeksi: Çalışmada üretilen serilerin sünekliğinin bir ölçüsü olan düktilite indeksleri Şekil 8'de sunulmuştur. Düktilite indeksi arttıkça, sünekliğinin arttığı kabul edilmektedir [29].



Şekil 8. Standart su kürü görmüş AAH'lerin statik ve darbe yüklemesi altında düktilite indeksleri.

Şekil 8'den görüldüğü gibi aktivatör çözeltisinin M_s oranı 0,8 olan serilerde, tüm bağlayıcı kompozisyonları içerisinde en yüksek düktilite indeksine (sünekliğe) sahip karışım hem statik hem de darbe yüklemesi durumlarında %15 oranında MK ikame edilmiş seridir. Diğer tüm serilerde karışımın M_s oranındaki artışla düktilite indeksinde değişen oranlarda hafif artışlar elde edilmişken, MK serisinde kullanılan aktivatörün M_s oranındaki artışla kompozitin belirgin bir şekilde gevrekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumun, kullanılan aktivatörün M_s oranının 0,8'den 1,2'ye çıkarılmasıyla MK serisinde elde edilen daha yoğun ve çatlaksız iç yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Genel bir eğilim olarak; AAH'lerde kullanılan aktivatörün M_s oranının bağlayıcı türüne uygun seçilmesi ile daha yoğun ve çatlaksız bir iç yapı elde edildiği, iç yapıdaki bu gelişmeye bağlı olarak AAH'in mekanik özelliklerinin iyileştiği ancak kompozitin daha gevrek davrandığı ortaya çıkarılmıştır. Şekil 9'da çalışma kapsamında üretilen, değişik bağlayıcı kompozisyonları ve aktivatör M_s oranına sahip AAH'lerin düktilite indekslerinin kompozitin basınç dayanımı ve eğilme dayanımına göre değişimi statik ve darbe yüklemesi durumlarına göre sunulmuştur.



Şekil 9. Standart su kürü görmüş AAH'lerin statik ve darbe yüklemeleri altında düktilite indekslerinin basınç ve eğilme dayanımı ile değişimi.

Şekil 9 üzerinde dayanım ve düktilite indeksi arasındaki ilişki ve regresyon katsayısı verilmiştir. Görüldüğü gibi, AAH'nin basınç ve eğilme dayanımı arttıkça hem statik yüklemelerde hem de darbe yüklemesinde düktilite indeksi belirgin bir şekilde azalmaktadır. Diğer bir ifade ile mineral katkı ikamesi ve uygun Ms oranının kullanımı ile basınç ve eğilme dayanımı arttıkça kompozit daha gevrek davranmaktadır. Düktilite indeksinin kompozitin eğilme dayanımına bağımlılığı, basınç dayanımına bağımlılığından daha fazla olduğu görülmektedir.

3. SONUÇLAR

Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

- Standart su kürü durumunda, aktivatörün Ms oranının AAH kompozitlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi kullanılan bağlayıcı türüne göre değişkendir. Ms oranının 0,8'den 1,2'ye çıkarılmasından basınç dayanımı açısından en olumlu etkilenen karışımlar YFC'ye %15 oranında MK ve SD ikame edilmiş karışımlardır. AAH'lerde belirli bir bağlayıcı türü için yüksek basınç dayanımı elde edilen aktivatör çözeltilisinin Ms oranının diğer bir bağlayıcı kompozisyonu için uygun olmayabileceği ortaya çıkmaktadır.
- Standart kür görmüş AAH'lerde aktivatörün Ms oranının 0,8'den 1,2'ye çıkarılması, MK ikame edilmiş seri hariç, hem statik hem de darbe eğilme dayanımında değişen oranlarda düşümlere neden olmaktadır. MK ikame edilmiş serilerde ise Ms oranının 0,8'den 1,2'ye çıkarılmasıyla her iki yüklemelerde de daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmektedir. Bu durum düşük silikat modülüne sahip aktivatör çözeltilerinin metakaolini aktive etmek için yetersiz kaldığını göstermektedir. Tüm seriler ve yüklemeye koşulları göz önüne alındığında; en yüksek eğilme dayanımlarının YFC yerine %15SD ikame edilmiş serilerden elde edilmiştir.
- Aktivatör çözeltilisinin Ms oranının 0,8'den 1,2'ye artırılması %15'lik MK ikamesi haricindeki tüm serilerde değişen oranlarda kırılma enerjisinde azalma ile sonuçlanmıştır. Ms oranındaki artış, diğer serilere göre kırılma enerjisi oldukça düşük

olan MK karışımının statik yükleme altındaki kırılma enerjisini yaklaşık %70 arttırmıştır.

- AAH'lerde kullanılan aktivatörün Ms oranının bağlayıcı türüne uygun seçilmesi ile daha yoğun ve çatlaksız bir iç yapı elde edildiği, iç yapıdaki bu gelişmeye bağlı olarak AAH'in mekanik özelliklerinin iyileştiği ancak kompozitin çatlak yolunun daha dolaysız hale geldiği, dolayısıyla kompozitin daha gevrek davrandığı ortaya çıkarılmıştır.
- AAH'lerin darbe yüklemesinden elde edilen mekanik özellikleri (eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve duktilite indeksi) statik yüklemeye çok belirgin bir şekilde daha yüksektir. Değişik bağlayıcı kompozisyonları ve aktivatör çözeltisi Ms oranlarına sahip, 28 gün standart su kürü görmüş AAH'lerin dinamik artış faktörlerinin eğilme dayanımı için 2.54 – 4.89 arasında ve kırılma enerjisi için ise 14.20 – 26.93 arasında değiştiği, bu değerlerin değişik su/bağlayıcı oranlarına sahip standart su kürü görmüş Portland çimentolu karışımlar için literatürde verilen değerlere yakın olduğu ortaya çıkarılmıştır.
- AAH kompozitlerin statik yükleme ve darbe yüklemesi altındaki sünekliğinin AAH'nin basınç dayanımına bağımlılığının eğilme dayanımına bağımlılığına göre daha az olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu durum çimentolu kompozitlerin eğilme dayanımının matrisin boşluk yapısına basınç dayanımına kıyasla daha bağımlı olduğu yönündeki literatür bilgisini AAH'ler açısından da doğrulamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiş olup (Proje no: 112M262) yazarlar sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar. Ayrıca yazarlar örnek hazırlanması sürecindeki yardımlarından dolayı İnş.Y. Müh. Murat TUYAN'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- [1] Roy DM. Alkali-activated cements: Opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 29, 1999, No. 2, s. 249-254.
- [2] Palomo A, Grutzeck MW, Blanco MT. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future, *Cement and Concrete Composites*, Cilt. 29, 1999, Sayı: 8, s. 1323-9.
- [3] Bakharev T, Sanjayan JG, Cheng YB. Alkali activation of Australian slag cements, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 29, 1999, s. 113-120.
- [4] Fernandez-Jimenez A, Palomo JG, Puertas F. Alkali-activated slag mortars-Mechanical strength behavior, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 29, 1999, s.1313-1321.
- [5] Shi C, Krivenko PV, Roy D. Alkali-Activated Cements and Concretes. 2006, USA and Canada: Taylor and Francis.
- [6] Bakharev T, Sanjayan JG, Cheng YB. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, Cilt.32, 2002, s. 211-216.
- [7] Bakharev T, Sanjayan JG, Cheng YB. Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 33, 2003, s. 1607-1611.
- [8] Puertas F, Amat T, Fernandez-Jimenez A, Vazquez T. Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres, *Cement and Concrete Research*, Cil.33, 2003, s. 2031-2036.

- [9] Shi C, Xie P. Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 28, 1998, s. 887-896.
- [10] Zivica, V. Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures, *Construction and Building Materials*, Cilt. 21, 2007, s. 1463-9.
- [11] Collins FG, Sanjayan JG. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 29, 1999, s. 455-458.
- [12] Atış CD, Bilim C, Çelik Ö, Karahan O. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar, *Construction and Building Materials*, Cilt. 23, 2009, s. 548-555.
- [13] Zivica V. Effectiveness of new silica fume alkali activator, *Cement and Concrete Composites*, Cilt. 28, 2006, Sayı. 1, s. 21-25.
- [14] Ramachandran VS. (Ed.) Concrete Admixtures Handbook (2nd ed.), 1995, Noyes publications.
- [15] Yang KH, Song JK, Ashour AF, Lee ET. Properties of cementless mortars activated by sodium silicate", *Construction and Building Materials*, Cilt. 22, 2007, Sayı. 9, s. 1981-1989.
- [16] Pacheco-Torgal F, Castro-Gomes J, Jalali S. Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture, *Construction and Building Materials*, Cilt. 22, 2008, Sayı. 7, s. 1315-1322.
- [17] Aydın S. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın çürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010, Doktora tezi.
- [18] Ong KCG, Basheerkhan M, Paramasivam P. Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact, *Cement & Concrete Composites*, Cilt. 21, 1999, s. 391-401.
- [19] Almansa EM, Canovas MF. Behaviour of normal and steel fiber-reinforced concrete under impact of small projectiles, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 29, 1999, s. 1807-1814.
- [20] Luo X, Sun W, Chan SYN. Characteristics of high-performance steel fiber-reinforced concrete subject to high velocity impact, *Cement and Concrete Research*, 30, 2000, s. 907-914.
- [21] Bantia N, Mindess S, Bentur A, Pigeon M. Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine, *Experimental Mechanics*, Cilt. 29, 1988, Sayı. 1, s. 63-69.
- [22] Wang N, Mindess S, Ko K. Fibre reinforced concrete beams under impact loading, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 26, 1996, Sayı. 3, s. 363-376.
- [23] Zhang XX, Ruiz G, Yu RC. A new drop weight impact machine for studying fracture process in structural concrete, *Anales de Mecanica de la Fractura* Cilt. 25, 2008, Sayı.2, s. 655-659.
- [24] Dancygier A, Katz A, Yardımcı MY, Yankelevsky D. *On the behavior of high ductility concrete under low impact*, Proceedings of Seventh International Symposium on Impact Engineering (ISIE 2010), Chmielewski, R & Kruszka, L editors, s. 197-203, 2010, Warsaw, Poland.
- [25] Bantia N, Mani M. Toughness indices of steel fiber reinforced concrete at subzero temperatures, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 23, 1993, s. 863-873.
- [26] Hillerborg, A. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy of concrete, *Materials and Structures*, Cilt. 18, Sayı. 106, 1985, s. 291-296.
- [27] RILEM Technical Committee 50-FMC. Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched beams, *Materials and Structures*, 18, (106), 1985, s. 287-291.
- [28] Beygi MHA, Kazemi MT, Nikbin IM, Amiri JV. The effect of water to cement ratio on

- fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete, *Materials and Design*, Cilt. 50, 2013, s. 267-276.
- [29] Chiaia B, Van Mier JGM, Vervuurt A. Crack growth mechanisms in four different concretes: microscopic observations and fractal analysis", *Cement and Concrete Research*, Cilt. 28, Sayı. 1, 1998, s. 103-114.
- [30] Mindess S, Banthia N, Yan C. Fracture toughness of concrete under impact loading, *Cement and Concrete Research*, Cilt. 17, Sayı 2, 1987, s. 231-241.
- [31] Bindiganavile V, Banthia N, Aarup B. Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite, *ACI Materials Journal*, Cilt. 99, Sayı 6, 2002, s. 543-548.
- [32] Zhang XX, Ruiz G, Yu RC, Tarifa M. Fracture behavior of high-strength concrete at a wide range of loading rates, *Int. J. Impact. Eng.*, Cilt. 36 Sayı 10-11, 2009, s. 1204-1209.
- [33] Chakradhara RM, Bhattacharyya SK, Barai SV. Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load, *Construction and Building Materials*, Cilt. 25, Sayı 1, 2011, s. 69-80.
- [34] Dancygier A, Katz A, Yardımcı MY, and Yankelevsky DZ. Behavior of high ductility cement composite beams under low impact, *International Journal of Protective Structures*, Cilt. 3 Sayı 2, 2012, s. 177-191.
- [35] Malvar LJ, and Ross CA. Review of strain rate effects for concrete in tension, *ACI Materials Journal*, Cilt. 95, 1998, s. 735-739.
- [36] CEB (Comité Euro-International du Béton). Concrete structures under impact and impulsive loading, CEB Bulletin 187, Lausanne, 1988.
- [37] Cadoni E. Fracture behavior of concrete at high strain rate. In: *Proceedings of VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-8)*, J.G.M. Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, R.C. Yu and X.X. Zhang (Eds), University of Castilla La-Mancha, Toledo, Spain, 2013.

ÖZGEÇMİŞ / CV

Mert Yücel YARDIMCI; Dr.

1997 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Yüksek lisans ve doktora derecelerini 2001 ve 2008 yıllarında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nden aldı. Dokuz Eylül Üniversitesi'nde araştırma görevlisi, Bülent Ecevit Üniversitesi'nde öğretim üyesi olarak çalıştı. İsrail Teknoloji Enstitüsü'nde doktora sonrası araştırmacı ve Aachen Üniversitesinde konuk araştırmacı olarak bulundu. 2012 - 2016 yılları arasında Gediz Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmıştır. Temel çalışma alanları: Lif donatılı kendiliğinden yerleşen kompozitler, yüksek ve ultra yüksek mukavemetli çimentolu kompozitler ve tekstil lifli çimentolu kompozitlerdir.

He graduated from Civil Engineering Department of Fırat University and got B.S. degree in 1997. He received his M.Sc. and Ph.D. degrees from The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylul University in 2001 and 2008, respectively. He worked as research assistant in Dokuz Eylul University and as an assistant professor in Bülent Ecevit University. He was a Post.Doc. in Israel Institute of Technology, TECHNION and a guest researcher in RWTH Aachen University. He worked as assistant professor in Civil Engineering Department of Gediz University between 2012 - 2016. His major areas of interests are: Fibre reinforced cementitious composites, high and ultra high strength cementitious composites and textile reinforced composites.

Serdar AYDIN; Doç.Dr. (Associate Professor)

2001 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu.

Yüksek lisans ve doktora derecelerini 2004 ve 2010 yıllarında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nden aldı. 2001 - 2014 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 2014 yılından beri aynı bölümde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Temel çalışma alanları: yüksek sıcaklığa dirençli çimentolu kompozitler, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı çimentolu kompozitler, lif donatılı kompozitler ve alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılardır.

He graduated from Civil Engineering Department of Dokuz Eylül University and got B.S. degree in 2001. He received his M.Sc. and Ph.D. degrees from The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University in 2001 and 2010, respectively. He worked as research assistant in Civil Engineering Department of Dokuz Eylül University between 2001 – 2014. He has been working as an associate professor in the same department since 2014. His main research areas are: High temperature resistant cementitious composites, high and ultra high strength cementitious composites, fiber reinforced concrete and alkali activated cements.