

*Research Article*

## **Soğuk Bağlama Yöntemi ile Elde Edilen Yapay Agregalar ile Taşıyıcı Hafif Beton Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**

Erkan KANTAR<sup>1\*</sup> ve Hakan KOMAN<sup>2</sup>

*Geliş / Received: 03/08/2021*

*Revize / Revised: 07/09/2021*

*Kabul / Accepted: 23/09/2021*

### **ÖZET**

Bu çalışmada, %10 uçucu kül, %50 yüksek fırın cürufu, %40 standart portland çimentosu ve sayılan bu katı maddelerin ağırlıkça %37'si kadar NaOH'lı su kullanılarak (aktivatör olarak), soğuk bağlama yöntemiyle prizmatik agregalar yapılmış ve özgül ağırlığı ile su emme oranları incelenmiştir. Daha sonra bu yapay agregalar kullanılarak, 0,4 su/çimento oranına sahip, silis dumanı içeren taşıyıcı hafif beton dizaynı yapılmış ve 3 seri beton yapılmıştır. İlk seri 520 kg/m<sup>3</sup> çimento içeriğine sahipken, diğer serilerde çimento ağırlıkça %42 oranında uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufuyla yer değiştirilmiştir. 3. seri betonda diğer 2 seriden farklı olarak strux 90/40 fiber donatı kullanılarak etkileri incelenmiştir. Sertleşmiş betonlara 7 ve 28 günlerde basınç ve 28. günde eğilme deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak görülmüştür ki, bu yeni agregayla 1900-2000kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu 28 ila 32 Mpa basınç dayanımlı taşıyıcı hafif beton yapılması mümkündür ve kalsiyum içeren uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun çimento yerine kullanılması dayanımı düşürmemektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** - Uçucu Kül, Silis Dumanı, Taşıyıcı Hafif Beton, Yüksek Fırın Cürufu, Yapay Agregası, Strux 90/40 Fiber Donatı.

<sup>1</sup>Civil Engineering, Faculty of Engineering, Celal Bayar University, Manisa, Turkey.

<sup>2</sup>\*Corresponding author: [hakankoman@hotmail.com](mailto:hakankoman@hotmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-7309-7718>)

Civil Engineering, Faculty of Engineering, Celal Bayar University, Manisa, Turkey.

# Producing Structural Lightweight Concrete with Artificial Cold Bonded Aggregates and Investigating Its Mechanical Properties

---

## ABSTRACT

---

In this study, artificial, prismatic aggregates including %10 fly ash, %50 GGBS (ground granulated blast furnace slag), %40 OPC (ordinary portland cement) and water with NaOH (as an activator) with a mass that is the %37 of the mass of materials counted, were produced by using cold bonding method, and their specific gravity and water absorption rates were investigated. Later, by using these aggregates, structural lightweight concretes including 0,4 water/cement ratio, and silica fume, were designed and 3 series of concrete were produced. First series included 520 kg/m<sup>3</sup> cement content, and in the other series fly ash and GGBS were replaced in the amount of %42 by mass with the cement. Only in the 3rd series that were different from the other two, strux 90/40 fibres were used and their affect were investigated. Hardened concretes were tested for compressive strength at 7 and 28th days and tested for flexural strength at 28th day. The results showed that its possible to produce a structural lightweight concrete with a specific gravity of 1900-2000 kg/m<sup>3</sup> and with a compressive strength of 28-32 Mpa, and GGBS and fly ash with calcium content dont decrease the strength of concrete when they are used as a replacement with cement.

---

**KEYWORDS:** - *Fly Ash, Silica Fume, Structural Lightweight Concrete, Cold Bonding Method, GGBS, Artificial Aggregates, Strux 90/40 Fibres.*

---

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda yaşanan yıkıcı depremler, depreme dayanıklı yapı tasarımında yoğun çalışmalara yol açtığı gibi, yapı malzemeleri alanında da önemli gelişmeler olmasına neden olmuştur. Yapıya etkiyen deprem yükleri yapının ağırlığıyla orantılı olduğundan yapı ağırlığını azaltmak insanoğlunun depremle savaşında önemli bir yol kat edilmesini sağlayacaktır. Bu yüzden en önemli yapı malzemelerini gözden geçirmek ve bu malzemelerin özelliklerini iyileştirmek büyük bir önem arz etmektedir.

Yoğunluğa bağlı olarak beton 3 sınıfa ayrılabilir. Çakıl taşı, kırmataş, agregaları, doğal kum kullanılan yaklaşık 2400 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip betona Normal ağırlıklı beton denir. Hafif beton terimi 1800 kg/m<sup>3</sup> ten daha az yoğunluğa sahip betonlar için kullanılan bir terimdir. Betonlar dayanımlarına göre ise 3 sınıfa ayrılabilirler [1].

Düşük dayanımlı Beton 20 MPa (3000 psi) dan daha az

Orta dayanımlı beton: 20 ila 40 MPa (3000 ila 6000 psi)

Yüksek dayanımlı beton: 40 MPa dan daha fazla (6000 psi dan daha fazla) [1].

Betonun hafifletirmenin avantajları eski çağlarda dahi fark edilmişti. Hafif betonun kullanımı milattan 3000 yıl öncesine dayanmaktadır. Üçüncü yüz yılda yapılan Iraktaki Babül sarayları, ve 624 ile 987 yılları arasında Meksikada yapılan piramitlerin inşasında hafif beton kullanılmıştır. Efes ve Milas'daki tarihi eserlerin bozulmadan günümüze kadar ulaşmasının, buradaki yapılarda kullanılan kayaç ve bağlayıcıların puzolanik aktiviteye sahip olmaları ile mümkün olacağını belirtmektedir. Avrupada ise 2000 yıl öncesinde Romalılar tapınak ve heykellerini hafif beton kullanarak inşa etmişlerdir [2].

İstanbul'daki şu anda da kullanılan Ayasofya, Roma'daki büyük Collesium ve Pantheon buna örnek olarak gösterilebilir. Çünkü Roma ve Bizanslı mühendisler büyük açıklıkları geçen ve depremlerde çökmeyen kubbeler yapmak istemişlerdir.

Hafif betonun modern zamanlarda kullanımının başlangıcı ise 2. Dünya savaşı yılları kabul edilebilir. ABD de ise genişletilmiş kil, ve şist kullanılarak Hayde tarafından ticari amaçlarla hafif beton üretilmiştir, ve 2. Dünya Savaşı esnasında gemi yapmak için kullanılmıştır. Ve Park Plaza Otelinin yapımında kullanılmıştır. 1950lerde çok katlı binaların yapımında hafif beton kullanımı sürdürülmüştür. Bank of America Corporate Center, Cahrlotte; the Watergate Apartments, Washington D.C.; and the Lake Point Towers, Chicago bunlardan bazılarıdır [3].

Modern zamanlarda taşıyıcı hafif betonla yapılan yapılara örnek verecek olursak;

40 000 kişilik Wellington Stadyumu, Yeni Zelanda'da yapılmıştır. Genleştirilmiş şist agregası kullanılmıştır. Silindir basınç dayanımı 35 Mpa olan beton yapılmıştır. Gecelik dayanım kazanması 25 Mpa'dır. Burada kırıç döşeme gibi elemanlar için erken dayanım arzulanmıştır. Stadyumun yapıldığı bölge deprem bölgesidir, ve yoğunluğu 1850kg/m<sup>3</sup> olan beton kullanmak yapıya etkiyen deprem yüklerini azaltmıştır. Californiada The New Benicia-Martinez Köprüsü yapılmıştır. Bu köprü, 2,3km uzunluğundadır. 22 açıklıktan oluşmaktadır. Açıklık aralığı 127-201m arasında değişmektedir ve 16 tanesi su üzerindedir. Yapılan fizibilite çalışmasında çelik, asma betonarme köprü, ve hafif betonla yapılmış köprü değerlendirilmiş ve hafif betonlu köprünün en düşük maliyetli olacağı sonucuna varılmıştır. Normal kum, çimento, uçucu kül, metakaolin ve hafif agregası kullanılarak üretilen betonda su/çimento oranı 0,31, çimento içeriği de 494kg/m<sup>3</sup> tür [3, 4]. Başka bir çalışmada üretilen uçucu kül-öğütülmüş yüksek fırın cürufu-çimentodan oluşan soğuk bağlama yöntemiyle yapılmış agregayla üretilen betonlarla 28 günlük dayanımı 42 Mpa olan beton imal edilmiştir. Bu betonda çimento oranı 400 kg/m<sup>3</sup> tür [5]. Wasserman ve Bentur ise ticari Lytag isimli sinterlenmiş uçucu kül agregasıyla yaptıkları betonlarda, 440 kg/m<sup>3</sup> çimento oranı kullanarak 0,4 su/çimento oranı için 28 günlük dayanımı 45,4 Mpa olan beton elde etmişlerdir. [6]

Jianming Gao ve diğeri ise genişletilmiş kil agregasıyla yaptıkları çalışmada 0,3 su/çimento oranıyla 85,4 Mpa ya ulaşan çelik fiber donatılı beton yapmışlardır [7]. Ayrıca ülkemizde taşıyıcı hafif betonun yapı tasarımına etkileri de incelenmiştir. Serkan Subaşı ve Tuncay Kap genişletilmiş kil hafif agregalı betonun yapı davranışı ve kaba yapı maliyetlerine olan etkisini inceledikleri çalışmada., yapıda normal beton yerine genişletilmiş kil agregalı hafif beton kullanılması durumunda; yapının zati ağırlığının %42 oranında azaldığı, böylece zemine gelen yükün yaklaşık 1,9 ton/m<sup>2</sup>, yapı eleman kesitlerinin %15, yapı temel kalınlığının %33, yapıya etkiyen deprem kuvvetlerinin %15 oranında azaldığı, kaba yapı maliyetlerinin de normal betona göre %0,3 oranında azaldığı görülmüştür [8].

İnsanoğlunun depremle savaşının yanı sıra çevre kirliliğiyle de savaşı bulunduğumuz yüzyılda büyük önem arz edecektir. Bu bakımdan sanayi artışı maddelerin yeniden değerlendirilmesi yerinde olacaktır. Termik santral artışı uçucu kül, ve demir çelik fabrikaları artışı yüksek fırın cürufu betonun özelliklerini iyileştirmek için bir süredir kullanılmaktadır. A.Sivakumar ve P.Gomathinin çalışmalarında da belirtildiği gibi uçucu kül bir artık madde değildir ve uçucu kül agregası olarak, beton katkısı olarak, veya ince agreganın yerine kullanılarak değerlendirilebilir [9].

Bu çalışmada, %10 uçucu kül, %50 yüksek fırın cürufu, %40 standart portland çimentosu, ve sayılan bu katı maddelerin ağırlıkça %37'si kadar NaOH'lı su kullanılarak (aktivatör olarak), soğuk bağlama yöntemiyle prizmatik agregalar yapılmış ve özgül ağırlığı ile su emme oranları incelenmiştir. Daha sonra bu yapıy agregalar kullanılarak, 0,4 su/çimento oranına sahip, silis dumanı içeren taşıyıcı hafif beton dizaynı yapılmış ve 3 seri beton yapılmıştır. Ve imal edilen betonların mekanik özellikleri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

#### Uçucu Kül

Uçucu kül, Manisa Batı Beton hazır beton santralinden temin edilmiştir. Yatağan uçucu küdür. Yatağan uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'a yakın olması nedeniyle TS EN 197-1'e göre W sınıfına (kalkersi uçucu kül) girmektedir. Ancak, ASTM C 618'e göre SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değerinin % 70'in üzerinde olması nedeniyle F sınıfı küle (silissi) uygun olmakla birlikte, yine CaO'in % 10'u geçmesi sonucunda kireçsi kül sınıfına girmektedir. Buna göre, bu külün her iki uçucu kül sınıfı için de sınırda olduğu düşünülmüştür. Yatağan külü, ASTM C 618 standardı ve TS 639'daki SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>> 70 koşulunu sağlamaktadır. TS EN 450 standardına göre SO<sub>3</sub> ve serbest kireç yüzdeleri de sırasıyla en fazla % 3 ve % 1 koşullarına uymaktadır. Buna göre, Yatağan uçucu külünün dört standartta da istenilen kimyasal bileşen sınırlamalarına uygun olduğu sonucuna varılmıştır [10].

Bir başka makalede de; Tablo 1'deki gibi kimyasal analiz sonucu gösterilmiştir [11].

**Tablo 1.** Yatağan uçucu külü kimyasal analizi

Kimyasal kompozisyon	Yatağan
SiO <sub>2</sub> (%)	50,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	21,13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6,17
CaO (%)	12,44
MgO (%)	4,53
SO <sub>3</sub> (%)	1,33
Na <sub>2</sub> O (%)	0,24
K <sub>2</sub> O (%)	2,54

### Yüksek Fırın Cürufu

Bolu çimento Sanayi A.Ş.'den temin edilmiştir. Yine Bolu Çimento,A.Ş.den temin edilen kimyasal analiz sonuçlarına göre Silisyum dioksit oranı %41,05, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı %11,27, CaO oranı %37,7 , MgO oranı %4,5tur. Özgül ağırlığı 2,86gr/cm<sup>3</sup>'tür.

### Çimento

Çimento, Standart Portland çimentosu 42,5R olup Manisa Batı Beton'dan temin edilmiştir. Yoğunluğu 3,12g/cm<sup>3</sup> tür. Firmadan alınan çimento kimyasal özellikleri, Tablo 2'deki gibi verilmiştir [12].

**Tablo 2.** Çimentonun kimyasal analizi

%	Çimento
CaO	63,20
SO <sub>3</sub>	2,66
Cl	0,0106
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.04
SiO <sub>2</sub>	19,59
Serbest CaO	0,65

### Silis Dumanı

Silis dumanı Sika Yapı Kimyasalları firmasından temin edilmiştir ve yoğunluğu 300kg/m<sup>3</sup> tür, gri renkli, incelik modülü 0,1 um olan silis dumanıdır. Sika Fume adıyla satışa sunulmaktadır. Yüksek performanslı beton üretmek için kullanılmaktadır.

### Süper Akışkanlaştırıcı

Sika Yapı Kimyasalları firmasından temin edilen, Sika Viscocrete SF-18 ticari adlı yüksek performanslı bir süperakışkanlaştırıcı kullanıldı.Açık kahverengi renğinde, 20°Cde 1,10+-0,02 kg/l yoğunluğunda, klorür içermeyen, ph değeri 3-7 arasında olan, modifiye polikarboksilat esaslı polimerdir [13].

### Strux 90/40 Fiber Donatı

Fiber donatı, Grace Yapı Kimyasalları Sanayi ve Ticaret A.Ş. ürünüdür, Grace firması kataloğundan alınan bilgilere göre, özgül ağırlığı 0,92 gr/cm<sup>3</sup>, Elastisite Modülü 9,5Gpa, Çekme dayanımı 620 Mpa, Erime noktası 150 derecedir. Asit ve tuz dayanımı yüksektir. 90 en boy oranıyla 40mm uzunluğundadır [14].

## 2.2. Soğuk bağlanmış Agrega Üretimi ve Özellikleri

Agrega üretiminde, elastisite modülü çimento pastasının elastisite modülüne yakın olan agregaya kullanılmasının, agregaya-çimento pastası arasındaki gerilme yığılmaları azalttığı ve çimento pastası-agrega birleşim bölgesinin zayıflığı azalttığı bilinmektedir ve çalışmamızda dikkate alınmıştır. Yüksek dayanımlı beton ile ilgili Amerikan standardı ACI 363R-92 de, “kırma agregaya birleşim bölgesindeki kenetlenmeden ötürü küresel çakıldan daha iyi dayanıma yol açmaktadır ve ideal agregaya temiz, kübik, köşeli olmalı disk yapıdaki çok yassı ve iğnesel parçacıkları minimum düzeyde barındırmalıdır.” denilmektedir. Yine Amerikan beton enstitüsü ACI'nın standardının beton için agregalar bölümünde hafif agregaları anlatırken genişletilmiş kil agregasının döner fırın yöntemiyle

oluşturulduğu ifade edilmiş ve üretilen agregaların küp, köşeli ve gözenekli bir biçimde oluşturulduğu ifade edilmiştir [15].

Somnuk Tangermsirikul, ve Anil C Wijeyewickrema tarafından yapılan çalışmanın amacı ise uçucu kül agregasının dayanımını tahmin etmek için bir metod önermektir. Çünkü topaklaşmış agreganın dayanımı uçucu kül agregalı betonun dayanımını tahmin etmede önemli bir faktördür. Basit noktasal yük testiyle, küre şeklindeki topağın çekme dayanımı, matematiksel denklem kullanılarak çıkarılmıştır. Daha sonra değişik kimyasal bileşimlere sahip uçucu küllerle yapılan agregaların 30 günlük çekme dayanımı, agrega yapımında kullanılan uçucu kül-çimento gibi hammadelerin denk CaO oranına bağlı olacak şekilde bir fonksiyonla ifade edilmiştir. Bulunmuştur ki, uçucu kül agregasının çekme dayanımı, uçucu kül agregasını oluşturan hammaddelerin içerdiği eşdeğer CaO içeriği arttıkça ve 14ten 91 günlüğe kadar zamana bağlı değişen çekme dayanımı 30 günlük çekme dayanımı kullanılarak saptanabilir. Buradaki denk CaO oranıyla uçucu külü oluşturan hammaddelerin ağırlıkça yüzdesi x kimyasal analizindeki uçucu kül miktarlarının toplamı ifade edilmiştir ve Denklem 1 ve 2'de görülmektedir [16].

$$(CaO)_{eq} = (r \times (CaO)_c + (1-r) \times (CaO)_f) / 100 \quad [1]$$

Ve eşdeğer CaO oranı arttıkça dayanımın arttığı da görülmüştür ve şu denklemle ifade edilmiştir.

$$\sigma_t(30gün) = 0.104 (CaO)_{eq} \quad [2]$$

Bu bilgiler ışığında , üretilen agregalar 0,5 oranında granüle edilmiş yüksek fırın cürufu,0,4 oranında çimento,0,1 oranında uçucu kül olan katı hammadeleri karıştırıldıktan sonra katı hammadenin %37'si kadar 10 Molar NaOH'lı su kullanılarak hamurlaştırılmış ve bu hamurdan, kalıp yardımıyla dikdörtgen prizma şeklinde katılaştırılarak elde edilmiştir. Burada NaOH aktivatör görevi görmüştür. Agregada üretiminde NaOH'lı suyun katı maddenin %37'si kadar olmasının sebebi yapılan denemelerde bu oranın hamura kalıplarda katılaştırılarak elde edilmesi için minimum oran olmasıdır. Daha düşük oranlarda hamurun katılaştığı ve ayrıştığı ve kalıplara yerleştirilemediği gözlemlendi. Su içeriğinin %37 gibi görece yüksek olması agregada dayanımını azaltmıştır. Agregalar 1. tip ve 2.tip olmak üzere 2 boyutta katılaştırılmışlardır. 1. tip kaba agregalar 10mmx10mmx5mm , 2.tip kaba agregalar ise 10mmx5mmx5mm boyutlarında prizmatik agregalardır. Agregalar yapıldıktan sonra nemli ortamda beklemeleri için naylonla kaplanarak minimum 1 hafta,oda sıcaklığında kür edilmiştir.



Şekil 1. Üretilen 1. tip ve 2. tip prizmatik agregalar

Üretimi yapılan agregalara özgül ağırlık deneyi yapıldı. Bu deney kapsamında, 24 saat su içerisinde bırakılan agregaların sudan çıkarıldıktan sonra doymuş kuru yüzey haline getirilmesiyle ağırlığı ölçüldü ve agregaların sudaki ağırlığı ölçülmüştür. Doymuş kuru yüzey ağırlığından sudaki ağırlığı çıkarılarak agrega hacmi bulundu ve doymuş yüzey ağırlığı hacme bölünerek Hacim özgül ağırlığı  $2,21\text{g}/\text{cm}^3$  olarak hesaplandı. Daha sonra doymuş kuru yüzey ağırlığından agregalar fırında kurutulduktan sonra elde edilen değişmez agrega ağırlığı çıkarılıp , bu değer değişmez agrega ağırlığına bölünerek ve 100le çarpılarak su emme %3,27 olarak bulundu. (Normal beton agregalarıyla kıyaslırsak; kumun %0,4, gri kalkerin %0,5, kumtaşının %0,6, beyaz kalkerin %1,5 su emme oranı vardır [17].

### 2.3. Beton Tasarımı ve Üretimi

Yapılan bir diğer çalışmada ise, uçucu kül içeren betonların basınç dayanımını tahmin etmek için bir denklem bulunması amaçlanmıştır. Değişik uçucu kül tipleri için bileşen malzemelerin kimyasal içeriklerini kullanma konsepti önerilmiştir. 28 günlük basınç dayanımını değiştiren faktörlerin CaO içeriği, su/çimento oranı ve pasta oranının sıkıştırılmış agregadaki boşluk oranına oranı olduğu düşünülmektedir. CaO çimentodaki hidrasyon reaksiyonunun ve uçucu külün puzolonik reaksiyonunun dominant bir kimyasal bileşimidir. Bundan sonra hidrasyon ve dayanım artışı sağlayan puzolonik reaksiyon, diğer yaşlardaki basınç dayanımını tahmin etmek için kullanıldı. 3 günden 1 yıllığa kadar basınç dayanımının tahmin edilmesi için tatmin edici sonuçlar alındı. Şekil 2.1 de beton bileşenlerinin CaO içeriğiyle, beton basınç dayanımı arasındaki ilişki görülüyor [18].

$$C = (w_{fa} \times CaO_{fa} + w_{ce} \times CaO_{ce}) / 100 \quad [3]$$

$w_{fa}$ :  $1\text{m}^3$  betondaki uçucu kül,  $w_{ce}$ :  $1\text{m}^3$  betondaki çimento Bu şekilde  $w/b = \text{su}/\text{çimento}$  oranıdır Ve şu denklemle ifade edilmiştir.

$$F_c(28) = ((16.45 \times (w/b)^{-1.26}) \times (\log C - 1.8) - 10.91 \times \ln(w/b) + 3.96) \times (1.8931 \times e^{-0.53\gamma}) \quad [4]$$

( $\gamma = \text{çimento pastasının hacminin sıkıştırılmış agrega fazının boşluk içeriğine oranı}$ )

Bu bilgiler ışığında, J. Gao et al. in çalışmasındaki genişletilmiş kil agregasıyla yapılan beton karışım oranlarıyla karşılaştırmak amacıyla, o çalışmadaki karışım oranları baz alınarak, karışım oranları saptanmıştır. CaO/ SiO<sub>2</sub> oranı 0,86 olan bir beton karışımı yapılmıştır. Tablo 3 te bu oranlar görülmektedir.

**Tablo 3.** Beton serilerinin m<sup>3</sup> Karışım Oranları

Bileşenler(Kg/m <sup>3</sup> )	Seri-1	Seri-2	Seri-3
Çimento	520	300	300
Su	228	228	228
Kum	530	530	530
2. Tip Agregası	232	232	232
1. Tip Agregası	348	348	348
Silis Dumanı	50	50	50
Uçucu Kül	0	120	120
Yüksek Fırın Cürufu	0	100	100

Strux 90/40 Fiber Donatı	0	0	6
Su/Bağlayıcı oranı	0,4	0,4	0,4
Süperakışlanlaştırıcı	9	9	9

## 2.4. Basınç ve Eğilme Deneyleri

### Basınç Deneyleri

150mmx150mmx150mm küp numuneler her bir seri için 6'şar adet dökülmüştür. Hazırlanan 150mmx150mmx150mm küp numuneler, küp içerisine 3 kerededir doldurularak ve her doldurulan kısım en az 21 defa şişlenerek ve tokmaklanarak yerleştirildikten sonra, ve 1 gün laboratuvar koşullarında nemli olması için üzeri örtülü tutulduktan sonra, kalıplarından çıkarılarak, havuzda küre alınmıştır. Ve deney tarihine kadar havuz küründe bekletilmiştir.



Şekil 2. Numune alınması ve havuz kürü

Küp numuneler kırılmadan önce tartılmıştır:

Seri-1 ortalama:6,632 kg

Seri-2 ortalama:6,454 kg

Seri-3 ortalama:6,593kg

Bu sonuçlardan da görülmektedir ki bu agregayla m<sup>3</sup> te 1900kg civarı beton ağırlığına ulaşılabilir ve normal betonun ağırlığına 2400kg dersek,normal betondan %20 daha hafif beton elde edilmesi mümkün olabilir.

Şekil 3'te eğilme deneyi için 100x100x400mm boyutlarında beton kirişler dökülerek tek eksenli eğilme deneyine tabi tutuldu. Kirişlere 3 nokta eğilme deneyi yapıldı. Bu deneyde kirişin oturduğu mesnetlerin açıklığı 30cm oldu ve yük tam ortadan uygulandı.



Şekil 3. Eğilme Deneylerinden bir kesit

## 3. BULGULAR

Küp numunelere 7 ve 28. Günlerde basınç testi uygulanmıştır. Aşağıdaki resimlerde basınç testlerinden kareler görülmektedir ve beton numunelerin kırılma eğilimi, fiber donatıların sünekliliğe etkisi görülmektedir. Kırılan beton numunelerinden görülmektedir ki kırılma çoğunlukla agregaların ortadan ikiye ayrılmasıyla olmuştur ki bu da agrega-çimento matrisi arası birleşimin gözenekli agrega olmamasına rağmen, prizmatik ve köşeli agrega olması, ve elastisite modülü çimento matrisinden çok farklı olmaması, silis dumanı kullanılması ve silis dumanının



agrega-çimento matrisi arası geçiş bölgesindeki kireçle reaksiyona girerek mekanik dayanım veren C-S-H'ı oluşturması dolayısıyla, zayıf olmadığını göstermektedir ve denilebilir ki kırılmada agrega basınç dayanımı etkili olmuştur. Fiber donatıların bilgisayardaki grafikleri incelendiğinde görülmüştür ki fiber donatılı beton numunesi hemen kırılmayarak bir süre aynı gerilmeyi karşılayabilmiş yani sünek davranabilmiştir.



Şekil 4. Basınç Deneylerinden kesitler

28 günlük sonuçlar göstermiştir ki, uçucu kül, ve yüksek fırın cürufunu çimentoyla ağırlıkça %42 oranında yer değiştirmemiz basınç dayanımını düşürmemiş ve metreküpte 520kg dozajlı Seri-1le hemen hemen aynı sonuçlara ulaşılmıştır. göre Seri-1'in CaO oranı daha yüksek olmasına karşın, yukarıdaki bölümlerde açıklanan literatür özetlerinde belirtildiği şekilde yaşla dayanım kazanmayı belirlediği iddia edilen SiO<sub>2</sub>/ CaO oranı Seri-2 de seri -1 den çok daha yüksek olduğu için böyle olduğu düşünülmektedir. Strux 90/40 fiber donatı kullanımının 7 günlük sonuçlarda basınç dayanımına katkı yaptığı görülmüş ancak 28 günlük sonuçlarda dayanıma katkıda bulunmadığı görülmüştür. Denklem 2'nin beton basınç dayanımını tahmin etmede güvenilir bir yaklaşım olduğu görülmüştür. Tablo 4.de Beton serilerinin basınç dayanımları görülmüyor:

Tablo 4. Beton Basınç Dayanımları

Yaş	Seri-1	Seri-2	Seri-3
7 Gün (3 küp)	17,69	15,44	16,84
	16,81	16,54	18,22
	17,50	16,20	17,60
Ortalama (7 gün)	17,33	16,06	17,55
28 Gün (3 küp)	28,61	32,65	27,90
	29,62	27,26	28,82
	32,5	27,05	29,70
Ortalama(28 gün)	30,24	28,98	28,80

Eğilme deney sonuçları ise şu şekildedir: (28 günlük)

Seri -1 : 2,23Mpa

Seri -2 : 2,78Mpa

Seri -3 : 3,52Mpa

Normal beton'un çekme dayanımı, tek yüklü eğilme deneyi için  $0,7x$  Basınç Dayanımı<sup>0,5</sup>tir [19]. Buna göre örneğin 30 Mpa karakteristik dayanımı olan normal betonun çekme dayanımı 3,83 tür. Önceki bir çalışmada 40 Mpa basınç dayanımı olan 5H serilerinin 28 günlük çekme dayanımını 2,5-2,6 olarak bulunmuştur [3]. Rossignolo ve diğerleri ise yaptıkları çalışmada, ürettikleri genişletilmiş kil agregalı, 50 Mpa basınç dayanımı olan betonun eğilme çekme dayanımını 5 Mpa olarak bulmuşlardır [20]. Bu yüzden denilebilir ki; bizimkisi gibi özel betonlar, eğer genişletilmiş kil agregasında olduğu gibi çimento matrisiyle birleşimi mekanik bir kilitlenmeyle güçlenmiş değilse, normal betonlara kıyasla daha az çekme dayanımları vardır. Görülmüştür ki, ilk seri diğer serilerden daha fazla çimento içermesine karşın, çimentonun uçucu kül ve yüksek fırın cürufuyla yer değiştirildiği, diğer serilerin altında çekme dayanımına sahip olmuştur. Bunun sebebinin yüksek fırın cürufu ve uçucu külün agrega-çimento matrisi arası ara geçiş bölgesinin dayanımını iyileştirmesi olarak düşünülmektedir. Strux 90/40 fiber donatı içeren seri 3 ise en yüksek çekme dayanımına sahip olmuştur. Çimentoyu ağırlıkça %42 oranında uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufuyla yer değiştirmek, çekme dayanımını%24, hem uçucu ve yüksek fırın cürufuyla yer değiştirmek hem de fiber donatı kullanmak %58 oranında arttırmıştır. Sadece strux 90/40'ın çekme dayanımı artışına etkisi seri-2 ve seri-3'ü kıyaslarsak, %26 dolaylarındadır.

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Üretilen prizmatik hafif agregayla yapılan betonlar, daha önceki çalışmalarda , genişletilmiş kil ve sinterlenmiş uçucu kül agregalarıyla yapılan betonlardan daha az dayanıma sahip olmuştur.Litaratürde Değişik agregalarla yapılan betonların dayanımlarının değişkenliği değerlendirildiğinde soğuk bağlanmış agregaların en düşük, sinterlenmiş uçucu kül agregalarının daha iyi, ve genişletilmiş kil agregasının en iyi beton basınç dayanımına yol açtığını gördük. Ancak ürettiğimiz agregayla üretilen beton benzerleri içinde Gomathi ve Sivakumarın ürettiğiyle hemen hemen aynı dayanım değerlerine ulaşmasına karşın, Mehmet Gesoğlu ve diğerlerinin ürettiği betonlardan daha düşük dayanıma ulaşmıştır [5,9]. (Ürettiğimiz agrega Mehmet Gesoğlu ve diğerlerinin yaptığı çalışmadaki agregalardan daha yüksek çimento içeriklidir.) Bunun sebebinin de agregamızın su içeriğinin o agregadan yaklaşık 2 kat daha yüksek olması dolayısıyla dayanımının azalmasından, suda değil nemli ortamda kür edilmesinden, ve gözenekli yüzeyli bir agrega olmamasından dolayı çimento matrisi-agrega yüzey geçiş bölgesinin diğer agregalar kadar iyi olmamasından kaynaklandığını düşünmekteyiz. Agregaların prizmatik yapılması önceki çalışmalarda bahsedildiği üzere 0,40 su/çimento oranı ve altı için kenetlenmeyi arttırsa da, ve silis dumani kullanımı agrega – çimento matrisi birleşim bölgesini güçlendirse de, agregaların gözenekli yüzeye sahip olmaması agrega-çimento matrisi arası yüzey geçiş bölgesinin dayanımını etkilemiş olabilir.

Strux 90/40 içeren seri-3 ,7 günlük sonuçlarda 520 dozlu seri-1 den bile iyi sonuçlar vermekle beraber, 28 günde görülmüştür ki basınç dayanımına katkısı olduğu söylenemez.

Yeni agregayla üretilen betonlarda en iyi numune sonucuna göre 1900-2000 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu 32, 65 Mpa küp dayanımına ulaşan beton üretilebilmesi mümkün olmuştur. Depreme dayanıklı yapı tasarlamak isteniyorsa bu agregalarla yapılan beton kullanmak yapı ağırlığını %16- 20 arası azaltacaktır.

Yapılan bir çalışmada F sınıfı uçucu külü çimentoyla yer değiştirmenin beton basınç ve çatlama dayanımını azalttığı görülmüştür [21]. Papadakis'in yaptığı çalışmada ise yüksek kalsiyum içerikli uçucu küle çimentonun

yer değiştirilmesinin beton dayanımını arttırdığı görülmüştür [22]. Bizim çalışmamızda çimentoyu ağırlıkça %42 oranında yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufuyla yer değiştirmenin basınç dayanımını azaltmadığı hatta çok az arttırdığı, eğilme dayanımını ise arttırdığı görüldü. Bu sonuçlara göre denilebilir ki, Nipat Nipatsat ve Somnuk Tangtermsirikul tarafından önerilen beton dayanımını beton bileşenlerinin kimyasal yapılarına göre tahmin etmeye yönelik geliştirilen formülün güvenilir olduğu görülmüştür [18].

Sonuç olarak, seri-1 diğer serilerden daha fazla çimento içermesine karşın, çimentonun uçucu kül ve yüksek fırın cürufuyla yer değiştirildiği, seri-2 ve seri-3'ten daha düşük çekme dayanımına sahip olmuştur. Strux 90/40 fiber donatı içeren seri 3 ise en yüksek çekme dayanımına sahip olmuştur. Seri-3'ün en yüksek çekme dayanımına sahip olmasının sebebi, fiber donatıların betonun çekme dayanımına olan katkısıdır. seri-2'nin seri-1 den yüksek çekme dayanımına ulaşmasının sebebinin ise yüksek fırın cürufu ve uçucu külün agrega-çimento matrisi arası ara geçiş bölgesinin dayanımını iyileştirmesi olarak düşünülmektedir. Çimentoyu ağırlıkça %42 oranında uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufuyla yer değiştirmek, çekme dayanımını %24, hem uçucu ve yüksek fırın cürufuyla yer değiştirmek hem de fiber donatı kullanmak %58 oranında arttırmıştır. Sadece strux90/40ın çekme dayanımı artışına etkisi seri -2 ve seri 3ü kıyaslarsak, %26 dolaylarındadır. Jianming Gao ve diğerlerinin çalışmasında hacmen %0-2 arası çelik fiber donatı kullanmak, eğilme-çekme dayanımını %9.6 ila %90 arttırmıştır. Bu çalışmada %0,65 oranında Strux 90/40 fiber donatı kullanılmıştır. Bu iki çalışmayı kıyaslarsak, Strux 90/40'ın dayanıma katkısı çelik fiber donatıyla benzer düzeydedir.

Geri dönüşümün ön plana çıktığı günümüzde, doğal kaynakların sınırlı olmasından dolayı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi sanayi artığı malzemeleri değerlendirmek önem kazanmıştır. Ayrıca çimento üretimi sırasında açığa çıkan sera gazlarının küresel ısınmayı arttırdığı bilinen bir gerçektir. Bu malzemeleri betonda değerlendirerek, çevre kirliliğinin ve tarım arazilerinin bu artık maddelerle işgal edilmesinin önüne geçmesi amaçlanmış ve sonuçlar olumlu yönde ortaya çıkmıştır.

## **TEŞEKKÜR**

Deney yapılması sırasında yardımlarını esirgemeyen Manisa Spil Lab Beton labouratuvarı sorumlusu inşaat teknikeri Serkan Sipahioğlu'na ve inşaat teknikeri İbrahim Paşak'a , Manisa Er Prefabrik laboratuvar sorumlusu inşaat teknikeri Cihan Altın'a, deney için malzeme temin ettiğimiz Manisa Batı Beton, ve Bolu Çimento'ya, pilot deneyler ve agrega seçimi sırasında yardımcı olan lisans öğrencilerine, eğilme deneylerinde yardımcı olan, Manisa /Turgutlu'da bulunan TSE çalışanlarına, malzeme temin ettiğimiz Sika Yapı Kimyasalları çalışanı Furkan Bircan'a, teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

## KAYNAKÇA

- 1) Concrete- P.kumar Mehta,Paulo,J.M.Monteiro, Fourth Edition 704 sayfa).
- 2) Ulusu,İ.,2007. Ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliğinin araştırılması Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- 3) Aşık,M,2006 Structural lightweight concrete with natural perlite aggregate and perlite powder, ODTÜ,Ankara
- 4) <http://www.hpcbridgeviews.org/i49/Article1.asp>.
- 5) Mehmet Gesoğlu,Erhan Güneyisi,Hatice Öznur Öz,2012, Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag, Materials and Structures (2012) 45:1535–1546 DOI 10.1617/s11527-012-9855-9.
- 6) R.Wasserman and A.Bentur,Effect of Lightweight Fly Ash Aggregate Microstructure on The Strength of Concretes, Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 4, pp. 525-537, 1997 .
- 7) Jianming Gao, Wei Sun and Keiji Morino,1997, Mechanical Properties of Steel Fiber-reinforced, High-strength, Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites 19 (1997) 307-313 0 1997 Elsevier Science Ltd.
- 8) Serkan Subaşı,Tuncay Kap,2009 Genleştirilmiş Kil Agregalı Hafif Betonun Yapı Davranışı ve Kaba Yapı Maliyetine Etkisi, ISSN:1306-3111e-Journal of New World Sciences Academy 2009, Volume: 4, Number: 1, Article Number: 2A0005.
- 9) Sivakumar and Gomathi,2011, Pelletized fly ash lightweight aggregate concrete A promising material, Journal of Civil Engineering and Construction Technology Vol. 3(2), pp. 42-48, February 2012 Available online at <http://www.academicjournals.org/JCECT>.
- 10) Pelin Türker, Bahadır Erdoğan, Fehime Katnaş, Asım Yeğinobalı, Türkiyedeki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri,TÇMB/Ar-Ge/Y03.03, Temmuz 2009 Ankara.
- 11) Mustafa Çullu,Hakan Bolat,Serkan Subaşı,İlker Tekin, Yatağan ve Soma Termik Santralleri Uçucu Küllerinin Çimento Genleşmesine ve Mekanik Özelliklerine Etkisi.
- 12) Manisa Batı Beton Çimento Kimyasal Analizi.
- 13) Sika Yapı Kimyasalları Viscocrete Kataloğu.
- 14) Grace Yapı Kimyasalları Strux 90/40 fiber donatı kataloğu.
- 15) State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete,ACI363 R-92.
- 16) Somnuk Tangersirikul, ve Anil C Wijeyewickrema, Strength Evaluation of Aggregate Made from Fly Ash, ScienceAsia 26 (2000) : 237-241.
- 17) Özkan Şengül, Agregası Türünün Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Davranışına Etkisi, Hazır Beton, Mart –Nisan,2001 .
- 18) Somnuk Tangersirikul, ve Nipat Nipatsat, Compressive Strength Prediction Model for Fly ASH Concrete, Thammasat int. J. Sc.Tech.,Vol.5,No:1, January-April 2000.
- 19) Betonarme, Uğur Ersoy, Güney Özcebe.
- 20) Joao A. Rossignolo, Marcos V.C. Agnesini, Jerusa A. Morais, Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates, Cement & Concrete Composites 25 (2003) 77–82.
- 21) Rafat Siddique, Fracture Toughness and Impact Strength of High-Volume Class-F Fly Ash Concrete Reinforced with Natural San Fibres, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies ISSN 1583-1078, Issue 12, January-June 2008 p. 25-36.

- 22) Vagelis G. Papadakis, Effect of fly ash on Portland cement systems Part II. High-calcium fly ash, Cement and Concrete Research 30 (2000) 1647-1654.