

# YÜKSEK SICAKLIĞIN KARBON LİF TAKVİYELİ HAFİF BETONDA BASINÇ DAYANIMI VE POROZİTEYE ETKİSİ

**Bahar DEMİREL, Tahir GÖNEN**

Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, 23119, Elazığ

Geliş Tarihi : 23.10.2007

Kabul Tarihi : 15.04.2008

## ÖZET

Bu çalışmada, silis dumanı katkılı karbon lif takviyeli hafif betonun mekanik özellikleri üzerine yüksek sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, çimento ağırlığının % 10'u oranında silis dumanı, CEM I 42,5 N tipi çimento, Elazığ yöresi bazik karakterli pomza agregası ve çimento ağırlığının % 0,5 oranında karbon lif kullanılarak hafif beton numuneler hazırlanmıştır. Yüksek sıcaklığın hem silis dumanlı hem de karbon lifli hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine yaptığı etkileri gözlemek için, silis dumansız hafif beton, silis dumansız karbon lifli hafif beton, silis dumanlı hafif beton ve silis dumanlı lifli hafif beton olmak üzere 4 farklı seri hazırlanmıştır. 365 günlük yaşa erişen numuneler 1saat süreyle 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Numuneler oda sıcaklığında soğutulduktan sonra, porozite ve basınç dayanımı değerleri kaydedilmiştir. Sonuç olarak, silis dumanı içeren serilerde basınç dayanımı kayıpları silis dumansız serilere göre daha yüksek çıkmıştır. Basınç dayanımı ve porozite arasındaki ilişki 500 ve 750 °C dışında yüksektir.

**Anahtar Kelimeler :** *Yüksek sıcaklık, Karbon lif, Hafif beton, Silis dumanı, Pomza.*

## THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE POROSITY AND COMPRESSIVE STRENGTH ON THE CARBON FIBER REINFORCED LIGHTWEIGHT CONCRETE

### ABSTRACT

In this study, the effect of high temperature on the mechanical properties of the carbon fiber reinforced lightweight concrete with silica fume was investigated. With this aim, lightweight concrete samples were produced by using basaltic pumice (scoria) obtained from Elazığ region. In addition, the samples produced with and without silica fume and carbon fiber. Silica fume was replaced 10 % by weight of cement and carbon fiber was added 0.5 % by weight of cement. Four different series of samples were prepared in order to observe the effect of high temperature on the physical and mechanical properties of both the lightweight concrete with and without silica fume and the lightweight concrete with and without carbon fiber. The specimens completed the 365 days curing period were exposed to 250, 500, 750 and 1000 °C for 1 hour. Porosity and compressive strength were determined and recorded after the specimens were cooled at the room temperature. In conclusion, it is determined that the losing of compressive strength in the specimens with silica fume is higher than the others. Relation of compressive strength-porosity is high out of 500-750 °C.

**Key Words :** *High temperature, Carbon Fiber, Lightweight Concrete, Silica Fume, Pumice.*

## 1. GİRİŞ

Pomza taşı, volkanik faaliyetler esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi aniden terk etmesi sonucu oluşan, gözenekli bir yapıya sahip ve dünya endüstrisinde yeni olmamakla beraber, ülkemiz endüstrisine son yıllarda girmeye başlayan volkanik kökenli bir kayattır. Pomzanın kullanım alanları içerisinde en önemli yer tutanı, hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılmasıdır (Çankıran, 1998). Hafif agrega kullanılarak üretilen taşıyıcı hafif beton düşük birim ağırlığı nedeni ile yapı tasarımında daha küçük eleman kesitlerini ve daha uzun açıklıkları mümkün kılar, taşınması kolaydır, kalıp işlerinde de ekonomi sağlar (Yeğinobalı, 1997).

Betona yeni özellikler kazandırmak ve bazı özelliklerini de belirgin olarak arttırmak için, beton içerisine lifler katılmaktadır (Arslan ve Ulucan, 1997). Günümüzde betonda yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polimer (polipropilen, PVA), cam ve karbon esaslıdır. Betona lif katmak; betonun çekme ve eğilme dayanımını, duktilitesini, enerji tüketme kapasitesini ve çatlak gelişim karakteristiklerini geliştirmek için kullanılan etkin yöntemlerden biridir (Şimşek, 2004). İçerisine hacimce en az % 0,2 oranında mikroskobik karbon lif parçacıkları ilave edilen beton (CFRC-Carbon Fiber Reinforced Concrete), akıllı beton adını alır ve bu haliyle, basınç veya çekme gerilmelerini hem elastik hem de inelastik bölgelerde sezebilme kabiliyetine erişmiş olur. Bu kabiliyet, dış etkiler sebebiyle elektrik direncini, geri dönüşümlü veya dönüşümsüz değiştirmesi temeline dayanır (Mingqing v.d., 1999). Yapılan bir diğer çalışmada karbon lifin beton basınç dayanımını düşürdüğü, aynı zamanda basınç gerilmesi uygulanmadan bile artan frekansla elektrik iletkenliğini arttırdığı belirlenmiştir (Demirel v.d., 2006)

Betonda lif kullanımına ek olarak; silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları da belirli oranlarda çimento ile yer değiştirilerek kullanılmaktadır. Bu mineral katkıların

betonda kullanımı; ince taneli olmaları ve puzolanik reaksiyona girmeleri dolayısıyla betonun mekanik özelliklerini geliştirmektedir (Aruntaş, 2006). Beton elemanlar servis ömürleri boyunca, uzun süreli olarak farklı sıcaklık koşullarında kalırlar. Baca gibi bazı elemanlar işlevleri gereği bu etki altındadır. Ayrıca açıkta kalan hiperstatik betonarme elemanlarda güneş enerjisinin bile önemli mertebelerde iç gerilmeler doğurduğu kanıtlanmıştır. Yapı elemanının betonarme hesaplarda öngörülme bu tür gerilmeler altında çatlamaması ve deforme olmaması istenir (Baradan v.d., 2002).

Baradan v.d., (2002), 250 °C'nin altındaki sıcaklıklarda betonun dayanımının etkilenmediğini; 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise dayanım kaybının belirgin olduğunu belirtmişlerdir. Akman (1990), 300 °C'den itibaren alüminli ve demiroksitli bileşenler dehidratasyona başladığından basınç dayanımının azalmaya başladığını ve 400°C civarında Ca(OH)<sub>2</sub>'nin CaO'ya dönüştüğünü vurgulamış; bu sıcaklık değeri aşıldığında bu kez silis jellerinin parçalanmaya başladığını, 600-700 °C'den sonra ise beton içerisindeki tüm elemanların tahrip olduğunu belirtmiştir.

Bu çalışmada, karbon lif kullanılarak deformasyon veya gerilmeyi sezme kabiliyeti artırılan (Chung ve Chen, 1993; Mingqing v.d., 1999) ve akıllı olarak adlandırılan hafif betonun, farklı sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra dayanım kayıpları incelenmiştir. Ayrıca, mineral katkı olarak kullanılan silis dumanının etkisi de gözlenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 2.1. Malzeme

Çalışmada Elazığ ili pomza yataklarından temin edilen bazik karakterli pomza agregası,  $d_{max}=8$  mm olacak şekilde düzenlenmiş ve hafif agrega olarak kullanılmıştır. Agregaya ait bazı fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Agreganın özellikleri.

Agrega Özellikleri	Pomza		TS 1114 (1986) -üst sınır		TS EN 206-1 (2002) -üst sınır	
	İnce	İri	İnce	İri	İnce	İri
Gevşek Birim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1,028	0,912	1,2	1,0	-	-
Etiv Kuru Tane Yoğ. (gr/cm <sup>3</sup> )	1,69	1,88	-	-	2,0	2,0

Ana bağlayıcı olarak Elazığ çimento fabrikasından temin edilen ve TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 N Portland çimento kullanılmıştır.

Mineral katkı olarak Antalya Eti Elektro Metalürji A.Ş.'den temin edilen silis dumanı çimentonun ağırlıkça % 10'u oranında yer değiştirilerek

kullanılmıştır. Çimento ve silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmektedir.

Takviye malzemesi olarak, teknik özellikleri Tablo 3’te verilen, 5 mm. boyunda ve çimento ağırlığının % 0,5’i oranında karbon lif kullanılmıştır. Lifi harç içinde homojen dağıtmak için için Culminal 9115 modifiye metilselüloz (Hercules, Inc, USA), metilselüloz kullanıldığında meydana gelecek köpüklenmeyi önlemek için ise Rhoximat DF 770 DD (Rhodia, Inc, USA) köpük önleyici kullanılmıştır.

Tablo 2. Çimento ile silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşim (%)	CEM I 42,5 N	Silis dumanı
S(SiO <sub>2</sub> )	21.12	91
A(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.62	0,58
F(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.24	0,24
CaO	62.94	0,71
MgO	2.73	0,33
SO <sub>3</sub>	2.30	1,06
Na <sub>2</sub> O	-	0,38
K <sub>2</sub> O	-	4,34
C	-	0.8-1.0
Kızdırma Kaybı	1.78	1,84
Fiziksel Özellikler		
Yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	3.10	2,20
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3370 (Blaine)	144000

Tablo 4. 1m<sup>3</sup> beton için yaklaşık karışım miktarları, (kg).

Seriler	Su	Çimento	Uçucu Kül	Silis Dumanı	İnce Agregası (0-4mm)	İri Agregası (4-8mm)	Karbon Lif	Akışkanlaştırıcı
N	310	450	-	-	710	225	-	-
SD*	315	405	-	45	701	220	-	3,6
N-CF*	310	450	-	-	710	225	2,25	3,6
SD-CF*	315	405	-	45	701	220	2,25	3,6

\* Akışkanlaştırıcı kullanılan seriler.

## 2. 2. 2 Porozite

28. günden sonra kür tankından çıkarılarak 1 yılını tamamlayana kadar 20±2 °C ortam sıcaklığına sahip laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin

Tablo 3. Karbon lifin özellikleri.

Filament Çapı	15±3µm
Çekme Dayanımı	3,43 GPa
Elastisite Modülü	230GPa
Kopmada Uzama	%1,5
Yoğunluk	1,82 gr/cm <sup>3</sup>
Elektrik Direnci	1,6x10 <sup>-5</sup> Ωm

## 2. 2. Metot

Numuneler 40 dm<sup>3</sup> kapasiteli beton mikserinde laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Lifli ve lifsiz olmak üzere 2 farklı tip ve her tip için silis dumanı katkılı ve katkısız olmak üzere hazırlanan 4 farklı serinin kodları ve karışım oranları Tablo 4’te verilmektedir. Bu tabloya göre hazırlanan ve işlenerek 100x100x100 mm. kalıplara yerleştirilen beton, 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak kirece doymun 23±2 °C deki su ile dolu kür tankının içerisine kür sürelerini tamamlamaları için yerleştirilmiştir.

Karbon lif ilave edilen numunelerde daha fazla su ihtiyacı ortaya çıkmakta, başka bir deyişle, çökme (slump) değeri düşmektedir (Chen ve Chung, 1993a). Lif ve silis dumanı ilavesiyle meydana gelen işlenebilirlik kaybı, YKS firmasından temin edilen YKS MR 25 (Lingün Sülfonat esaslı) akışkanlaştırıcı kullanımı ile önlenmiştir.

### 2. 2. 1. Basınç Dayanımı

Kirece doymun su ile dolu kür tankında 3, 7, 28 ve 365 günlük yaşa ulaşan numuneler Autotest 3000 Beton Basınç Dayanım Presi ile 3 kN/sn yükleme hızı ile basınç uygulanarak kırılmış ve dayanımları kaydedilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler de soğuduktan sonra aynı teknikte kırılmıştır.

yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası porozite değerleri kaydedilmiştir. Porozitenin tespiti için (1)’nolu formül kullanılmıştır.

$$P = \frac{(W_{dyk} - W_{kuru})}{(W_{dyk} - W_{su})} 100 \dots \dots \dots (1)$$

Formülde; P= Porozite (%),  $W_{dyk}$  = Numunenin doymuş yüzey kuru ağırlığı, (kg),  $W_{kuru}$  = Numunenin etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı, (kg),  $W_{su}$  = Numunenin su altındaki ağırlığı, (kg)'dır (Türkmen, 2003).

### 2. 2. 3 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Sadece 365 gün kür yaşına ulaşmış numuneler için sıcaklık testleri yapılmıştır. Numuneler, F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Laboratuvarında bulunan ısınma hızı 6°C /dakika olan 1200°C kapasiteli Protherm HLF 150 laboratuvar tipi fırında, 1 saat süre ile 250, 500, 750 ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır (Şekil 1). Baradan v.d. (2002), 250°C'nin altındaki sıcaklıklarda betonun dayanımının etkilenmediğini belirtmiştir. Bu nedenle ilk sıcaklık değeri 250°C olarak belirlenmiş; daha sonra eşit aralıklarla sıcaklık değerleri artırılmıştır. Her bir sıcaklık değeri için beşer numune kullanılmıştır. Arzu edilen sıcaklıkta 1 saat süre çalışan fırın daha sonra otomatik olarak kapanmış ve numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Tüm numunelere porozite ve basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve elde edilen tüm sonuçlar, laboratuvar ortamında bekleyen numunelerden (20°C) alınan sonuçlarla kıyaslanmıştır.

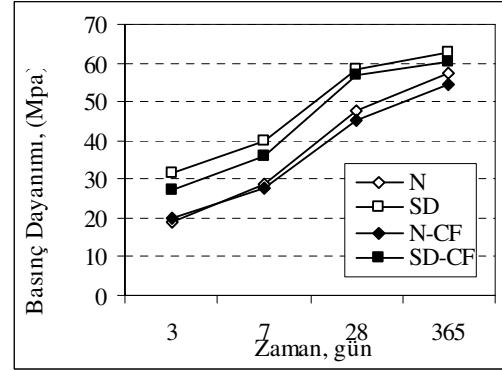


Şekil 1. Sıcaklık uygulanan fırın.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hazırlanan 4 serinin kür yaşına bağlı olarak değişen basınç dayanımı değerleri Şekil 2'de verilmektedir. Kür yaşına bağlı olarak basınç dayanımında meydana gelen dayanım artışı, silis dumanlı serilerde ilerleyen kür yaşlarında yavaşlama eğilimi göstermiştir. Bu durum; silis dumanının betonun

mekanik özelliklerine ileri yaşlara kıyasla erken yaşlarda daha fazla etki etmesinden kaynaklanmaktadır (Mazloom v.d., 2004). Ayrıca, karbon lif harç ve beton içerisinde hava boşluğu miktarını arttırdığı için basınç dayanımında az da olsa bir düşüş mevcuttur (Chen ve Chung, 1993b).



Şekil 2. Kür yaşına bağlı basınç dayanımı değişimi.

Laboratuvar ortamında 1 yılını doldurduktan sonra farklı sıcaklıklara maruz kalan serilerin 20°C'de elde edilen dayanımlara göre kayıp miktarları Tablo 5'te verilmektedir.

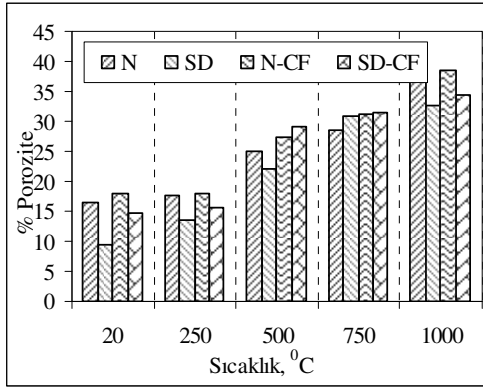
Tablo 5. Serilerin farklı sıcaklıklardaki dayanım kayıpları.

Beton Tipi	t (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kalan Dayanım (%)	Dayanım Kaybı
N	20	57,57	100	-
	250	53,29	92,57	7,43
	500	46,12	80,11	19,89
	750	30,76	53,43	46,57
	1000	8,54	14,83	85,17
SD	20	62,63	100	-
	250	55,23	88,19	11,81
	500	47,59	75,99	24,01
	750	32,34	51,64	48,36
	1000	6,23	9,95	90,05
N-CF	20	54,32	100	-
	250	46,22	85,09	14,91
	500	40,54	74,63	25,37
	750	35,31	65	35,00
	1000	7,26	13,37	86,63
SD-CF	20	60,21	100	-
	250	48,12	79,93	20,07
	500	40,83	67,82	32,18
	750	28,58	47,47	52,53
	1000	4,12	6,86	93,14

Tablo 5 incelendiğinde her tip seride de sıcaklık arttıkça dayanım düşmüştür. Tüm seriler dayanımlarının yaklaşık yarısını 750°C'de kaybetmişlerdir. Lifsiz serilerin her sıcaklık derecesinde kalan dayanımları, lifli serilerden daha fazladır.

750°C ve üzerinde silis dumanı kullanımına bağlı olarak kalan dayanımın azaldığı görülmüştür. Bu sonuç Sancak ve Şimşek (2006) de çalışmalarında silis dumanlı hafif beton serilerinin 800°C'de basınç dayanımı kaybının arttığını ifade etmişlerdir. Yine Aköz v.d., (1995), 600 °C'den sonraki sıcaklıklarda, silis dumanı katkılı harçların basınç dayanımı kayıp oranının katkısız harçlara göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Tüm serilerde 1000°C'de kalan dayanımlar %10 seviyelerindedir. Başka bir deyişle numuneler yük taşıma özelliklerini %90'lık bir kayıp ile korumaktadırlar. Numunelerin kırık yüzeyleri çıplak gözle incelendiğinde ise özellikle lif katkısız serilerde lif katkılı seriye göre daha büyük genişlikte çatlaklara rastlanmıştır.



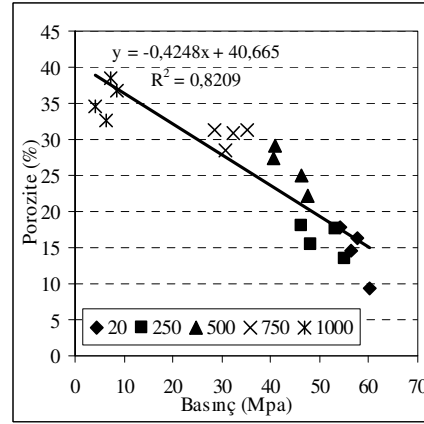
Şekil 3. Serilerin porozite-sıcaklık ilişkisi.

Yüksek sıcaklığın poroziteye etkisi grafik olarak Şekil 3'te verilmektedir. 4 seride de sıcaklık 250 °C'ye ulaşana kadar porozitede fazla belirgin bir artış meydana gelmemiştir. Fakat 250°C'den sonra porozitede ani artışın olduğu Şekil 3'te açıkça görülmektedir. Sıcaklık yaklaşık 300°C'ye ulaştığında, çimento hamurundaki CSH arayüzeylerindeki su ve CSH ile sülfoalimünattan gelen kimyasal bağ suyunun bir bölümü kaybedilir ve mikroçatlakların oluşumu artar (Lin v.d., 1996). Bu durum porozite artışını da beraberinde getirmiştir.

Sıcaklık değeri ne olursa olsun karbon lif, poroziteyi arttırmıştır. Bu durum lifin beton içerisinde hava boşluğu miktarını arttırmasından kaynaklanmıştır (Chen ve Chung, 1993b).

Silis dumanı düşük sıcaklıklarda (20 ve 250°C) lif olsun ya da olmasın poroziteyi azaltmaktadır. Bu silis dumanının tane büyüklüğünün portland çimentosundan daha küçük olması sonucu betonun

daha boşluksuz bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 4. Basınç dayanımı-porozite ilişkisi.

Bu çalışma için basınç dayanımı ile porozitenin ilişkisi Şekil 4'te görülmektedir. Normal şartlarda bir numunenin basınç dayanımı ile porozitesi arasında yakın bir ilişki vardır. Porozitenin artmasına bağlı olarak o nispette dayanım da düşer (Öztürk ve Baradan, 2008). Ancak bu çalışmada, 500 ve 750°C sıcaklıklarda bu lineer ilişki zayıftır. Porozitedeki ani artışın 500°C'de görülmekte iken; basınç dayanımındaki ani düşüş ise 750°C'de kaydedilmiştir. Bu zayıf ilişki buna bağlanabilir.

#### 4. SONUÇLAR

Yüksek sıcaklığın mineral katkı kullanılması durumunda karbon lif takviyeli hafif betondaki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Kullanılabilir sınırlar içerisinde olmakla beraber, karbon lif hafif betonun basınç dayanımında düşme meydana getirmiştir. Bu durum yüksek sıcaklık değerlerinde de çok düşük olmakla birlikte görülmektedir.

Tüm sıcaklık değerlerinde de silis dumanı içeren serilerin basınç dayanımı kayıpları, silis dumanı içermeyenlerden daha yüksek çıkmıştır.

Porozite verilerinden görülmüştür ki; 250 °C'den sonra CSH arayüzeylerindeki suyun buharlaşması sonucu, mikroçatlaklar oluşmuş ve bu durum porozitenin artması ile kendini göstermiştir.

## 5. KAYNAKLAR

- Akman, S. 1990. Yapı Malzemeleri, İTÜ, İstanbul.
- Aköz, F., Yüzer, N. and Koral, S. 1995. Portland çimentolu ve silis dumanı katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkileri. İMO Teknik Dergi 6, 919-931.
- Arslan, A. ve Ulucan, Z. Ç. 1997. Çelik liflerin erken yaştaki betonarme kirişlerin göçmesine etkisi. İMO Teknik Dergi 8, 507-1515.
- Aruntaş, H.Y. 2006. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. Gazi Üniv., Müh. Mim. Fak. Der., 21, 193-203.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), DEÜ., Mühendislik Fak. Yayınları, İzmir.
- Chen, P. and Chung, D.D.L. 1993a. Carbon fiber reinforced concrete as an electrical contact material for smart structures. Smart Mater. Struct., 2, 181-188.
- Chen, P. and Chung, D.D.L. 1993b. Concrete reinforced with up to 0.2 vol % of short carbon fibres. Composites 24, 33-52.
- Chung, D.D.L. and Chen, P. 1993. Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of Non-Destructive flaw detection. Smart Mater. Struct., 2, 22-30.
- Çankıran, O. 1998. Pomza agregalı hafif betonun mekanik özellikleri ve kimyasal katkılarla dayanımının artırılması. SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 82 s. Isparta
- Demirel, B., Yazıcıoğlu, S. and Orhan, N. 2006. Electrical behaviour of carbon-fibre reinforced concrete with increasing loading in varying and constant frequencies. Magazine of Concrete Research 58, 691-697.
- Lin, W. M., Lin, T. D. and Powers-Couche, L. J. 1996. Microstructures of fire-damaged concrete. ACI Materials Journal 93, 199-205.
- Mingqing, S., Zhuoqiu, L., Qizhao, M. and Darong, S. 1999. A study on thermal self-monitoring of carbon fiber reinforced concrete. Cem. Concr. Res., 29, 769-771.
- Sancak, E. ve Şimşek, O. 2006. Yüksek sıcaklığın silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkılı hafif betona etkileri. Gazi Üniv., Müh. Mim. Fak. Der. 21, 443-450.
- Şimşek O. 2004. Beton ve beton teknolojisi. 242s. Seçkin Yay. San. ve Tic. A.Ş, Ankara.
- TS EN 197-1. 2002. Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, 25 s., Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206-1. 2002. Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, 68s. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1114. 1986. Hafif Agregalar-Beton İçin, 11s., Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkmen, İ. 2003. Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag. Materials Letters 57, 4560-4569.
- Yeğınobalı, A. 1997. Hafif beton ve yüksek dayanımlı hafif beton. Çimento ve Beton Dünyası 2, 20-30.
- Mazloom, M., Ramezani-pour, A.A. and Brooks, J.J. 2004. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. Cement and Concrete Composites, 26, 347-357 .
- Öztürk, A. U. and Baradan, B. 2008. A comparison study of porosity and compressive strength mathematical models with image analysis. Computational Materials Science, In Press.