

---

*Araştırma Makalesi / Research Article*

---

## **Mermer Tozu Atığı ve Silis Dumanının Betonun Karbonatlaşma Özelliğine Etkisi**

Cuma KARA<sup>1\*</sup>, Salih YAZICIOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Artvin

<sup>2</sup>Gazın Üniversitesi, Teknolojisi Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

---

### **Özet**

Bu çalışmanın amacı; farklı oranlarda mermer tozu (MT) atığı ve %10 Silis dumanı (SD) ikame edilerek üretilmiş betonlarda karbonatlaşma sonucu meydana gelen fiziksel ve mekanik değişimi belirlemektir. Çalışma sürecinde % 5, % 10, % 15 MT ikameli, % 10 SD ikameli, % 5 MT + % 10 SD, % 10 MT + % 10 SD, % 15 MT + % 10 SD ikameli ve referans (katkısız) olmak üzere aynı çökme değerine sahip sekiz tip C30 sınıfı beton üretilmiştir. Beton numunelere 28 gün standart kür uygulanmıştır. Kür sonunda örneklerin yarısı kontrol numuneleri olarak laboratuvar şartlarında, diğerleri ise 56 gün süresince karbonatlaşma tankında bekletilmiştir. Beton türleri üzerinde eğilme dayanımı, karbonatlaşma derinliği, kapiler su emme, ultrases geçiş hızı, aşınma ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, farklı oranlarda MT, SD ve MT + SD içeren beton örneklerinde karbonatlaşma derinliği arttıkça; ultrases hızı değerlerinin arttığı, kapilarite katsayılarının azaldığı, aşınma miktarının düştüğü ve basınç dayanımının arttığı belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Beton, mermer tozu, silis dumanı, karbonatlaşma, dayanım

---

## **Effects of Marble Duster Waste and Silica Fume to Carbonation of Concrete**

### **Abstract**

This study aims is to determine the physical and mechanical variations which from occurring as a result of carbonation in concrete that produced by substituting marble dust waste and silica fume (10%) at different rates. During the study period, 5 %, 10 %, 15 % marble dust (MD), 10 % silica fume (SF) 5 % MS + 10 % SF 10 % MD + 10 % SF 15 % MD + 10 % SF admixtures (without additives) to C30 class concrete with a value of eight types of the same slump, are produced. Concrete were applied standart curing for 28 days. End of curing, half of the concretes samples were incubated in the carbonation tank during 56 days. The other half of concrete were maintained in laboratory conditions. On the concretes were performed flexural strength, depth of carbonation measuring, capillary water absorption, ultrasonic pulse velocity, compressive strength and abrasion strenght tests. As a result, when the depth of carbonation in concrete samples which with different proportions MD, SF, and MD + SF increases, the speed of pulse velocity was increased; capillarity coefficient was decreased; abrasion strenght was decrease and compressive strenght was increased.

**Keywords:** Concrete, marble dust, silica fume, carbonation, strenght.

---

---

\* Sorumlu yazar: [cumakara@artvin.edu.tr](mailto:cumakara@artvin.edu.tr)

Geliş Tarihi: 29.03.2016, Kabul Tarihi: 09.08.2016

## 1. Giriş

Betonun dayanıklı olması öncelikle karışıma giren malzemelerin doğru seçimine, beton karışım, döküm, sıkıştırma ve kür yöntemlerinin doğru uygulamasına bağlıdır. Ancak sadece bu standartları sağlamak betonun hizmet ömrü için yeterli olmayacaktır. Beton dış etkenlere karşı da korunmalıdır [1]. Bazı zararlı kimyasal maddeler içeren atmosfer ve su hem normal beton hem de betonarme için zararlı etkileri olan bir ortam oluşturmaktadır. Betonun geçirgenliği ile beraber karbondioksit, yumuşak ve asitlik oranı yüksek sular, klorürlü sular, sülfatlı sular ve deniz suları tehlike oluşturmaktadır [2]. Atmosferde serbest durumda bulunan karbondioksitin nemli ortamlarda, hidrate olmuş çimento ile reaksiyona girmesi sonucu beton içerisinde karbonatlaşma adı verilen olay meydana gelmektedir [3]. Karbonatlaşmanın beton üzerine en önemli zararlı etkisi, pH derecesinin azalmasıdır. Bu durum betonarme demirlerinin korozyonu üzerinde olumsuz etki yapar. Bu amaçla, paspayı bırakılarak demirlerin karbonatlaşma tabası altında kalması sağlanır [4]. Beton karbonatlaşması, betonun geçirgenliği ve ortamdaki nem durumuna bağlıdır. Yapılan araştırmalarla karbonatlaşma oluşumuna etki eden faktörler; boşluk suyu, bağıl nem, beton sınıfı, beton geçirgenliği, betonun yalıtımlı olup olmadığı, paspayı kalınlığı ve zaman olarak belirlenmiştir [5,6]. Günümüzde fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkilere karşı dayanıklı, kaliteli ve yüksek performanslı beton üretimi, gerek kimyasal gerekse mineral katkıların kullanımı ile mümkün olmaktadır [7].

Mermer fabrikalarından üretim atığı olarak çıkan toz atıklar genellikle değerlendirilememekte, üstelik çevre kirliliği açısından da sorunlar yaratmaktadır. Mermer toz (MT) atıklarının değerlendirilmesine yönelik olarak uygulamaya sokulabilecek alternatifler, mermer fabrika işletmecilerine ve ülke ekonomisine kazançlar sağlayabileceği gibi, bu fabrikaların çevre kirletici özelliğini de önemli ölçüde azaltacaktır. Geçmişten günümüze mermer ocaklarında ve mermer işleme tesislerinde ortaya çıkan tozların değerlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar devam etmektedir [8].

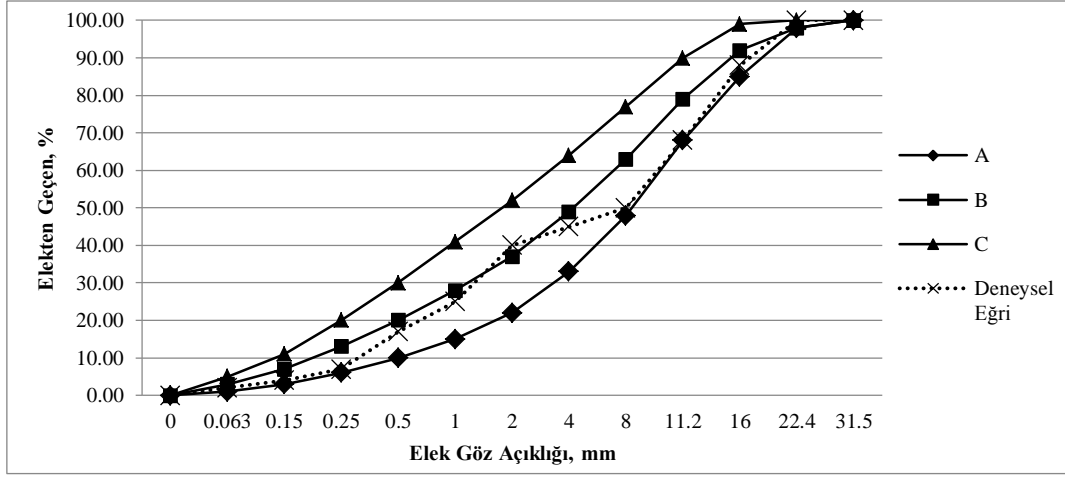
Yapılan araştırmalarda, silis dumanının (SD) betonda yüksek basınç dayanımı sağladığı, taze betonda terlemeyi ve ayrışmayı azalttığı, betonun hidrasyon ısısını etkilediği, priz süresini geciktirdiği, sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini, alkali silika reaksiyonunu azalttığı ve sülfatlara arşı dayanıklılık sağladığı bilinmektedir [9,10]. Ayrıca, SD nispeten daha koyu renkli beton elde edilmesine neden olmaktadır.

Betondaki karbonatlaşmanın daha az olabilmesini sağlayabilmek amacıyla yapılması gereken en önemli işlem, betonun mümkün olduğunca kadar geçirimsiz bir beton olarak üretilmesidir [9]. Geçirimsiz beton üretimi için kullanılan yöntemlerden birisi de filler malzeme kullanmaktır. Bu çalışmada mineral katkı maddeleri ile beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Puzolanik özellik gösteren malzeme olarak silis dumanı tercih edilirken, atık malzeme olarak mermer tozu kullanılmıştır. Mermer tozunun tercih edilme nedeni ülkemizde mermer rezervinin yüksek olmasıdır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Malzeme

Beton örneklerinin üretilmesi amacıyla Ankara'da bulunan Limak çimento fabrikası ürünü CEM I 42,5 R çimentosu, Kırşehir yöresine ait 0-4, 4-11, 11-22 mm gruplarında kırmataş agrega, Polikarboksilik Eter Esaslı süper akışkanlaştırıcı (SA), Kırşehir şebeke suyu kullanılmıştır. Agrega granülometrisi şekil 1 de verilmiştir [11,12].



Şekil 1. Agrega granülometrisi

Karışımında kullanılan atık MT Kırşehir Kaman'da bulunan ARP granit ve mermer işletmesine ait çökelti havuzundan alınmıştır. Mermerin kesimi esnasında su kullanıldığı için MT, çamur halinde temin edilmiştir. Toplama havuzundan çıkarılan çamur halindeki MT etüvde 110+5 °C'de kurutulmuştur. Tane yoğunluğu 2,73 g/cm<sup>3</sup> olan MT 0,125 mm'lik elekten elenmiş ve elekten geçen malzeme kullanılmıştır.

Karışımında kullanılan SD Antalya Etibank Elektrometalürji İşletmesi'nden temin edilmiştir. SD'ye ait tane yoğunluğu 2,32 g/cm<sup>3</sup>'tür. MT'ye ait XRF (X Ray Flouresan) analiz sonuçları ve SD'ye ait kimyasal özellikler Çizelge 1'de verilmiştir

Çizelge 1. MT XRF analiz sonuçları ve SD'ye ait kimyasal özellikler

Oksit	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
MT	39,40	15,20	7,65	34,20	0,65	-
SD	81,40	4,47	1,40	0,82	1,48	1,30

## 2.2 Yöntem

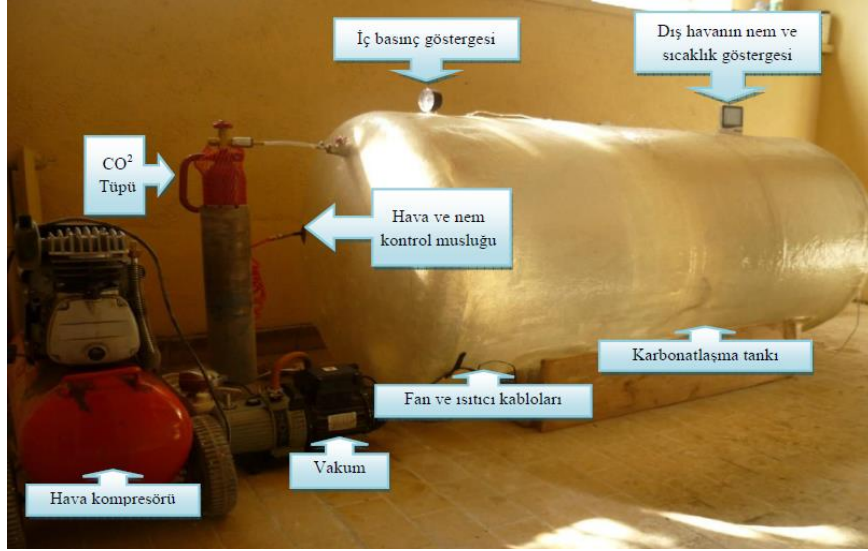
Karışımların beton sınıfı C30 olup, SA bağlayıcı miktarının % 1'i kadar kullanılmıştır. Farklı oranlarda MT, SD ve MT+SD çimento ile ikame edilmiştir. Referans, % 5 MT, % 10 SD, % 5 MT + % 10 SD, % 10 MT, % 10 MT + % 10 SD, % 15 MT, % 15 MT + % 10 SD olmak üzere toplam 8 farklı beton karışımı hazırlanmıştır [13, 14]. Silis dumanı ve silis alaşımlı katkıların birlikte kullanılması ile edilen yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı katkısı çimentonun ağırlıkça % 10'u civarındadır [10]. Bu nedenle silis dumanı ikame oranı % 10 tercih edilmiştir. Karışımlar hazırlanırken çökme değerleri S2 kıvam sınıfı olacak şekilde sabit tutulmuştur [15]. Her bir tür için beton karışımına giren 1 m<sup>3</sup>'lük malzeme miktarları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. 1 m<sup>3</sup> beton karışımına giren malzeme miktarları

Malzemeler	Referans	% 10 SD	% 5 MT	% 5 MT + % 10 SD
Çimento (kg)	340	306	323	289
MT (kg)	-	-	17	17
SD (kg)	-	34	-	34
Su (lt)	195	202	196	193.75

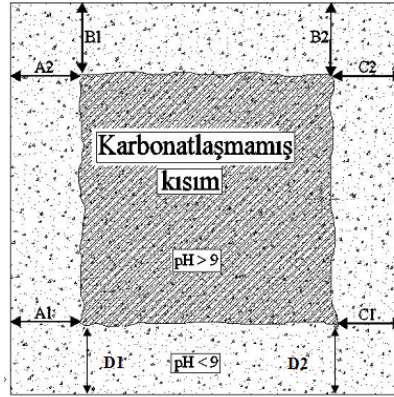
SA (kg)		3,4	3,4	3,4	3,4
Agrega (kg)	0-4	750	750	750	750
	4-11	825	825	825	825
	11-22	300	300	300	300
Slump		8	8,5	8,5	8
Malzemeler		% 10 MT	% 15 MT	% 10 MT + % 10 SD	% 15 MT + % 10 SD
Çimento (kg)		306	289	272	280
MT (kg)		34	51	34	51
SD (kg)		-	-	34	34
Su (lt)		175	182,5	212,5	225
SA (kg)		3,4	3,4	3,4	3,4
Agrega (kg)	0-4	750	750	750	750
	4-11	825	825	825	825
	11-22	300	300	300	300
Slump		8,3	8,5	8	8,5

Taze beton karışımı 100x100x400 mm boyutlarında prizmatik ve 100x100x100 mm boyutlarındaki küp kalıplara dökülmüştür. Her bir beton serisine ait 3 adet prizmatik örnek ve 6 adet küp örnek 28. Güne kadar standart kür havuzunda bekletilmiştir. Prizmatik örnekler karbonatlaşma testine tabi tutulmuştur [16]. Çalışmada karbonatlaşmanın gerçekleşebilmesi için 20 °C sıcaklıkta % 55 nem için sodyum dikromat seçilmiştir. Sodyum dikromatın doymuş çözeltisi tank içerisindeki kaba bırakılmış ve deney süresince suyun sıcaklığı 20°C'de tutulmuştur. Tankın içindeki CO<sub>2</sub> miktarını % 1 olarak ayarlanmıştır. Tank görünümü şekil 2'de verilmiştir. Betonlar 56 gün kadar karbonatlaşmaya maruz bırakılmıştır. Tanktan çıkarılan betonlar eğilme dayanımı testine tabi tutulmuştur. Bölünen parçalara baz indikatörü olan fenolftalein çözeltisi püskürtülmüş ve numunedeki renk farklılığı gözlenmiştir. Fenolftalein hidratasyon ürünü olan Ca(OH)<sub>2</sub> ile tepkimeye girerek ortamın pembe bir renk almasına neden olur. Numunelerin karbonatlaşma meydana gelen kısımlarında renk değişimi gözlenmez. Çünkü Ca(OH)<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ile tepkimeye girmiş olduğundan ortamın pH değeri 11-12,5 değerinden 8-9 gibi değerlere düşmüştür. Böylece ortamda fenolftalein'in tepkimeye girerek pembe renge dönüştüreceği Ca(OH)<sub>2</sub> bulunmaz [17].



Şekil 2. Karbonatlaşma tank düzeni

Her bir prizmatik örnekte fenolftalein püskürtülecek iki yüzey oluşmuştur. Böylelikle her bir beton karışım türü için 3 adet prizmatik örneğin kırılmasıyla oluşan toplam altı yüzeye fenolftalein çözeltisi sıkılarak, karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Beton numuneleri üzerinde renk değiştirmeyen kısımların derinlikleri ölçülerek ortalama karbonatlaşma derinliği (KD) hesaplanmıştır (Şekil 3) [17].



Şekil 3. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi

Karbonatlaşma derinliğinin hesaplanmasında Eş. (1) kullanılmıştır.

$$KD = \frac{A1+A2+B1+B2+C1+C2+D1+D2}{8} \quad (1)$$

Eğilme dayanımı sonrası iki parçaya ayrılan karbonatlaşma uygulanmış olan beton örnekler kesilerek 6 adet küp elde edilmiştir [18]. Küp örnekler ise karbonatlaşma uygulanmayan örnekler olarak değerlendirmeye alınmıştır. Karbonatlaşma uygulanmış ve uygulanmamış küpler üzerinde ultrases geçiş hızı ve kapiler su emme deneyi yapılmıştır. Tahribatsız yöntemlerin ardından 3'er adet örnek üzerinde basınç dayanımı, 3'er adet örnek üzerinde ise aşınma dayanımı testleri uygulanmıştır. Beton örnekleri üzerinde ASTM C 597'ye göre okunan ses geçiş süreleri Eşitlik (2) kullanılarak Ultrases geçiş hızına dönüştürülmüştür [19].

$$V = L / t \quad (2)$$

Eşitlik 2'de; V km/s cinsinden ses hızını, t saniye cinsinden ses geçiş süresini, L ise km cinsinden ölçü boyunu ifade etmektedir. Kapiler su emme katsayıları Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır [20].

$$C_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \sqrt{t_{so}}} \quad (3)$$

Burada;

$m_{dry,s}$  = Deney numunesinin kurutma sonrasındaki kütlesi (g),

$m_{so,s}$  = Deney numunesinin (t) süreyle suya temas ettirildikten sonraki kütlesi (g),

$A_s$  = Deney numunesinin suya temas ettirilen yüzeyinin brüt alanı (mm<sup>2</sup>),

$t_{so}$  = Deney numunesinin suya temas ettirilme süresi (s),

$C_{w,s}$  = Beton doğal taş ve yapay taş kâgir birimlerin kapiler su emme katsayısı, [ $g/(m^2xs^{0,5})$ ] ifade etmektedir.

Aşınma dayanımı deneyi ASTM C 944-99 standardında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [21]. Deney sonunda numunelerdeki kütlece ağırlık kayıpları ölçülerek sonuçlar ortalama “% ağırlık kaybı” olarak hesaplanmıştır.

Basınç dayanımı TS EN 12390-3 standartına uygun olarak, eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmıştır [22].

$$f_{ck} = F/A \quad (4)$$

Eşitlikte;

$f_{ck}$  = Basınç dayanımı, MPa (N/mm<sup>2</sup>)

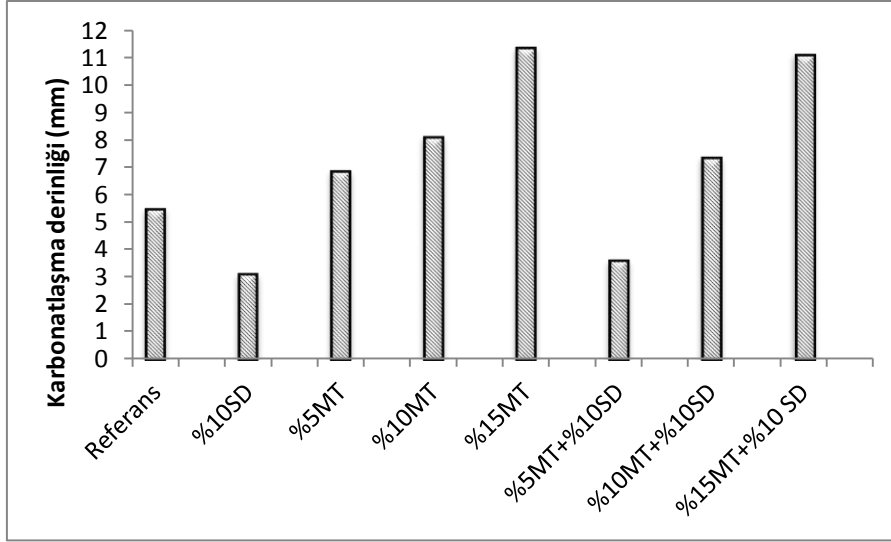
$F$  = En büyük yük, (N)

$A$  = Numunenin alanı, (mm<sup>2</sup>)

ifade etmektedir.

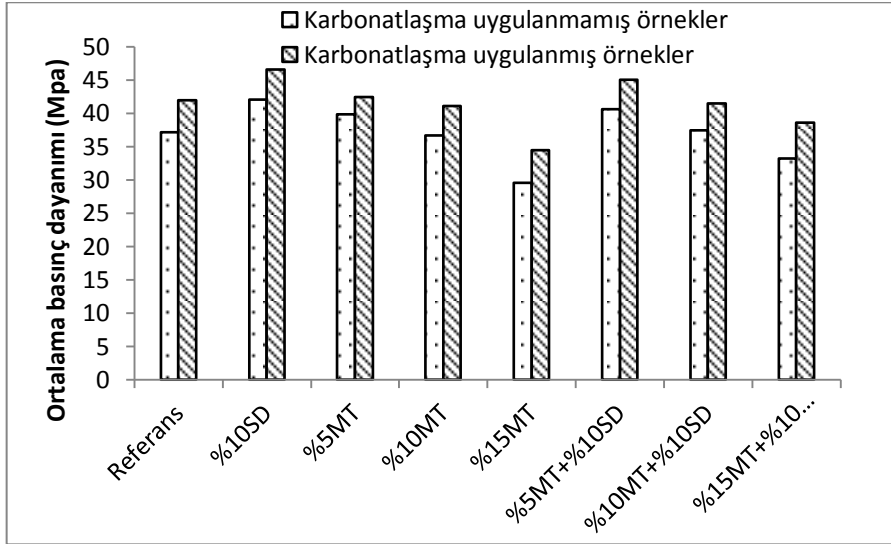
### 3. Bulgular

Farklı karışımlara ait betonların karbonatlaşma derinliklerine ilişkin sayısal veriler Şekil 4’de görülmektedir. En yüksek karbonatlaşma derinliğinin % 15 MT karışımına ait beton örneklerinde olduğu, en düşük karbonatlaşma derinliğinin ise % 10 SD karışım örneklerinde olduğu belirlenmiştir. En düşük karbonatlaşma derinliğini % 10 SD, ardından % 5 MT + % 10 SD ve referans örnekler takip etmektedir. MT + SD karışımlarının karbonatlaşma derinlikleri incelendiğinde MT oranı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin arttığı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan MT inceliği çimentodan daha azdır. MT ikamesi ile beton kompasitesi azalmaktadır, bu durum karbonatlaşma derinliğinin artmasına neden olmuştur. En az karbonatlaşma derinliğinin % 10 SD karışımına ait olması, literatür ile uyumludur. Silis dumanı betonun boşluklarını doldurarak geçirimsizliği azaltmaktadır. Bu nedenle betonda karbonatlaşma hareketi azalma gösterir [10].



Şekil 4. Karbonatlaşma derinlikleri

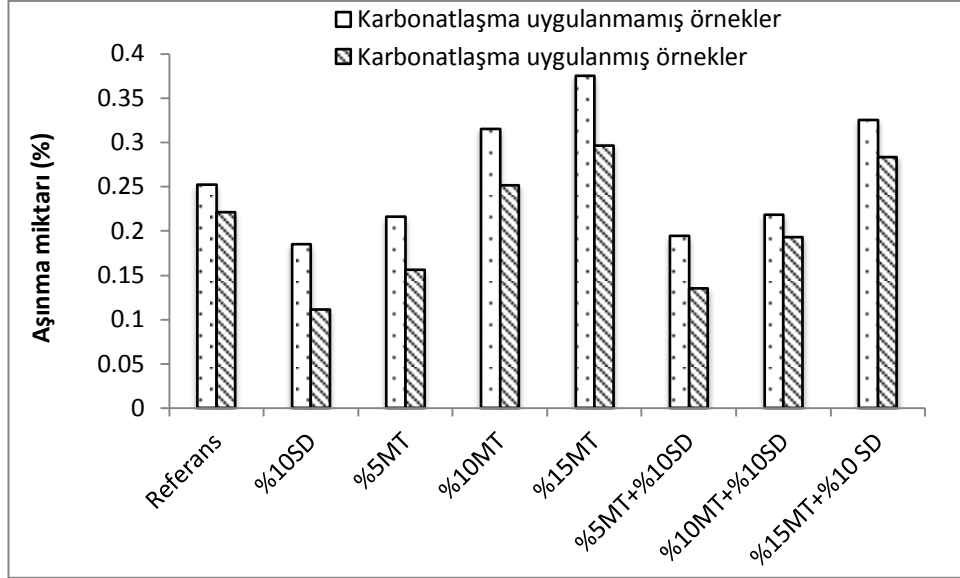
Beton türlerine ait ortalama basınç dayanımları incelendiğinde, MT + SD karışımlarının % 10 SD karışımına göre basınç dayanımlarının daha az olduğu görülmektedir. MT + SD karışımları incelendiğinde ise MT miktarının artmasıyla basınç dayanımlarının düştüğü belirlenmiştir. Silis dumanı diğer puzolanlarda olduğu gibi beton hamuru içerisinde yeni kalsiyum silika hidrat jelleri oluşmasını sağlamaları yanı sıra ince silis dumanı taneleri çimento hamurunu ve iri agrega hamuru ara yüzey geçiş bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını arttırmaktadır [10]. Bu nedenle, % 10 SD katkılı karbonatlaşma uygulanmamış ve uygulanmış betonlarda en yüksek basınç dayanımının elde edilmesi beklenen bir sonuç olmuştur.



Şekil 5. Ortalama basınç dayanımları

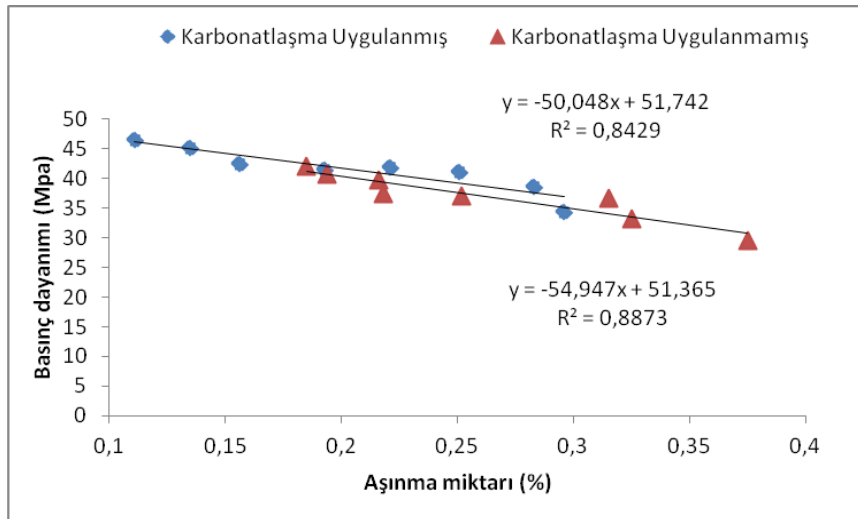
Karbonatlaşma öncesi ve sonrası basınç dayanımlarının değişimlerine bakıldığında (Şekil 5), karbonatlaşma sonrası dayanımlarının bir miktar arttığı görülmektedir. Betonda karbonatlaşma reaksiyonunun ürünü olan  $\text{CaCO}_3$ 'ün ortaya çıkmasıyla karbonatlaşan kısımlarda yoğunluk artışı gerçekleşmiş ve yüzeydeki bu yoğunluk artışı dayanımda az da olsa artış ile kendini hissettirmiştir. Bu durum literatür ile de uyumludur. Erdoğan [9], karbonatlaşma olayı sonucunda serbest kalan suyun, çimentonun hidratasyonuna yardımcı olarak dayanımda bir miktar artış meydana getirebileceğini belirtmiştir. Karbonatlaşmaya maruz bırakılan örnekler arasında (Şekil 6), en yüksek aşınma miktarı % 15 MT ve % 15 MT + % 10 SD karışımına aitken, en düşük aşınma miktarı ise % 5 MT + % 10 SD

ve % 10 SD içeren karışımlara aittir. Silis dumanı katkısı gerek hamur gerekse hamur-agrega ara yüzey dayanımlarını arttırması nedeni ile betonun bu gibi yıpratıcı etkilere karşı direncini arttırdığı bilinmektedir. Böhme cihazı ile yapılan deneylerde çimentonun % 10'u kadar katılan silis dumanı ile aşınma kaybının % 40 mertebesinde azaltılabileceği bulunmuştur [23]. Basınç dayanımı diğer mekanik özellikler ile paralellik göstermektedir. Basınç dayanımı yüksek olan örneklerin aşınma dayanımları da diğer örnekler göre daha iyi sonuç vermiştir. Karbonatlaşma uygulaması yapılmamış ve yapılmış örneklerin aşınma miktarları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, tüm beton karışımlarında karbonatlaşma uygulamasının ortalama aşınma miktarı değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir.



Şekil 6. Aşınma miktarları

Karbonatlaşma uygulanmış ve uygulanmamış örneklerin basınç dayanımı testi sonuçları ile aşınma dayanımı testi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak aralarındaki ilişkinin belirlenebilmesi amacıyla regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 7).

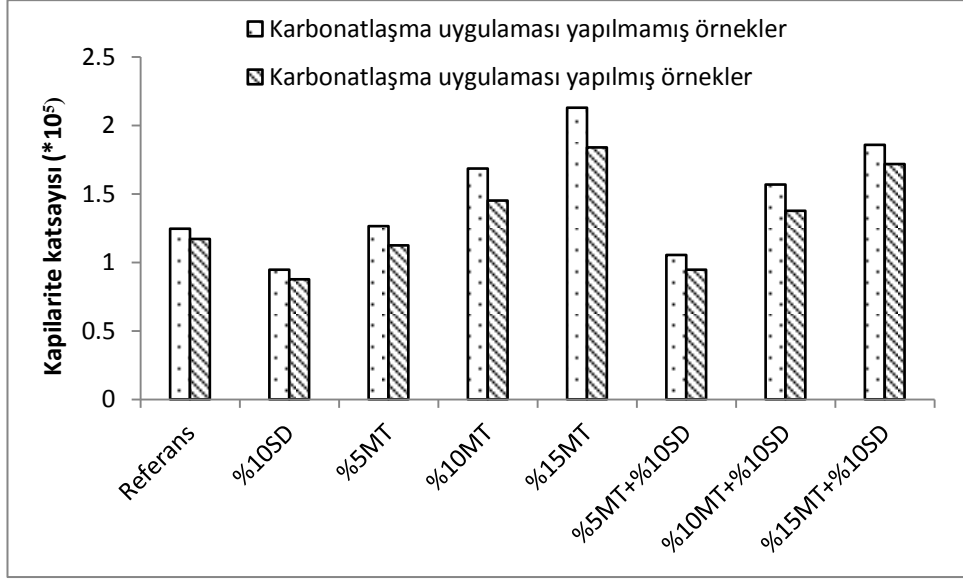


Şekil 7. Karbonatlaşma uygulanmış ve uygulanmamış örneklerde basınç dayanımı ile % ağırlık kaybı ilişkisi

Genelde literatürde beton numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda aşınma dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiden ve bu ilişkinin oldukça güçlü olduğundan bahsedilmektedir [24]. Karbonatlaşma uygulanmış ve uygulanmamış betonların basınç dayanımı ile aşınma miktarı arasındaki ilişki de korelasyon katsayıları sırasıyla 0,84 ve 0,88 olarak hesaplanmıştır. Bu durum karbonatlaşma

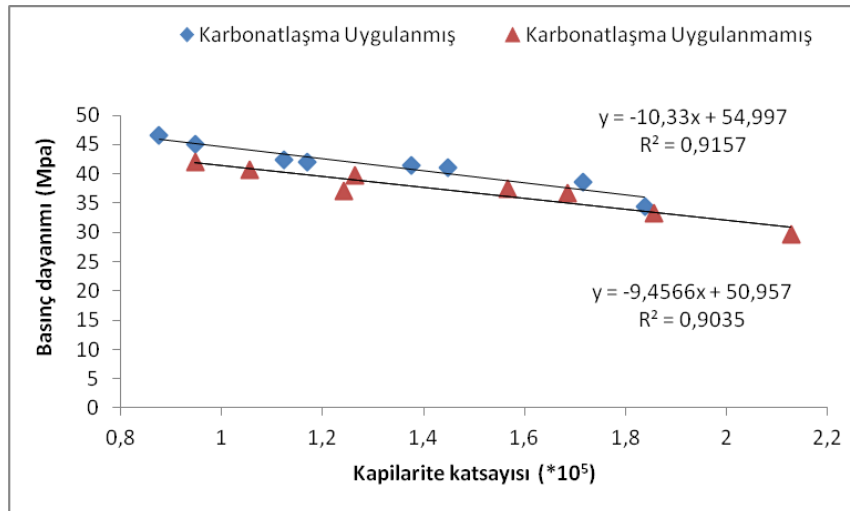


uygulanmayan örneklerin basınç dayanımı ile aşınma miktarı arasındaki ilişkinin daha kuvvetli olduğu bulgusunu ortaya koymuştur. Karbonatlaşma öncesi ve sonrası örneklerin kapilarite katsayılarının karşılaştırması Şekil 8’de görülmektedir. En yüksek kapilarite katsayısı % 15 MT karışımına aitken, en düşük değer % 10 SD karışımına aittir. SD’ye MT ilave edilen örnekler incelendiğinde, MT miktarı arttıkça kapilarite katsayısının arttığı görülmüştür. % 10 SD içeren örneğin kapilarite katsayısı referansa göre daha düşüktür. Tüm karışımlarda kapilarite katsayılarının karbonatlaşma sonrası düştüğü belirlenmişken, en büyük azalma miktarı % 15 MT karışımına aittir.



Şekil 8. Kapilarite katsayısı

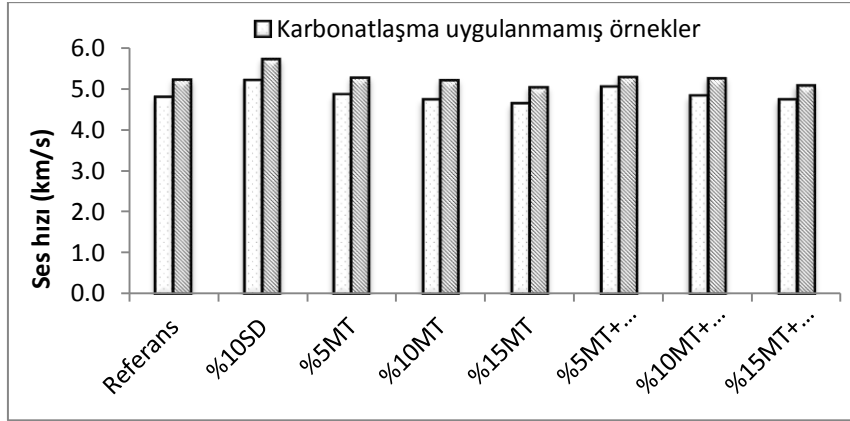
Kalsiyum karbonat bileşimi geçirgenliği azaltmakta, daha küçük kapiler bağlantılı gözenekler arasındaki bağlantıları tıkamaktadır [2]. Karbonatlaşmaya maruz bırakılmış örneklerin kapilarite katsayılarının karbonatlaşmamış örneklere göre daha düşük çıkması beklenen bir durumdur. Karbonatlaşma sonucu meydana gelen CaCO<sub>3</sub> kristalleri, çimento hamurundaki boşlukların içine yerleştiği için nispeten daha geçirimsiz bir beton meydana gelmiştir [8]. Düşük mukavemet değerlerinde kapiler su emme katsayısının yüksek olduğu daha önceden yapılan çalışmalardan bilinmektedir [24]. Şekil 9’da karbonatlaşma uygulaması yapılmış ve yapılmamış betonların basınç dayanımı ile kapilarite katsayıları arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 9. Karbonatlaşma uygulanmış ve uygulanmamış örneklerde basınç dayanımı ile kapilarite katsayısı ilişkisi

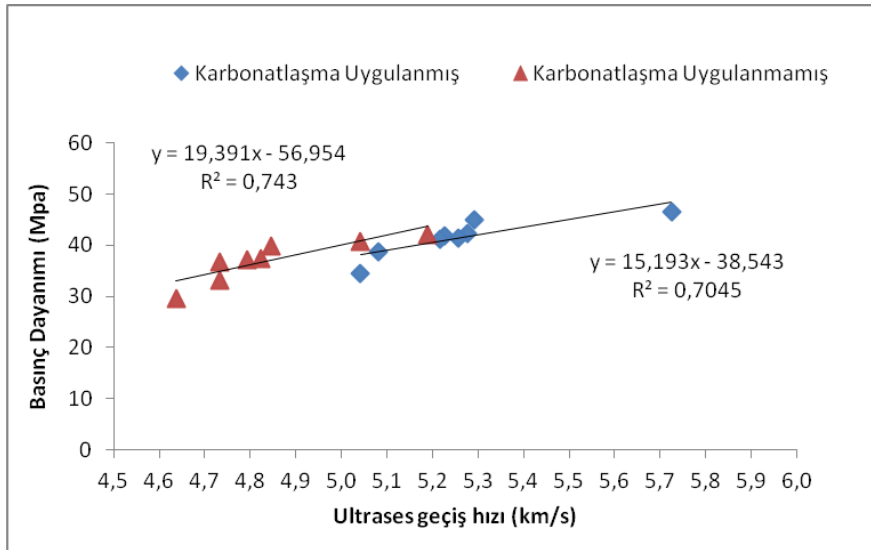
Şekil 9 incelendiğinde; karbonatlaşma uygulanmamış örneklerin basınç dayanımı-kapilarite katsayısı korelasyon değeri 0,91 iken, karbonatlaşma uygulaması yapılmayan örneklerde korelasyon değeri 0,90'dır. Bu durum, basınç dayanımı ile kapilarite katsayısı arasında oldukça kuvvetli bir ilişki olduğunu ve karbonatlaşma etkisinin bu ilişkiyi az miktarda değiştirdiğini göstermiştir. Ultrases geçiş hızı ölçülen karbonatlaşma uygulanmamış beton örnekleri incelendiğinde (Şekil 10), en yüksek ses hızının % 10 SD karışımına, en düşük ses hızının ise % 15 MT karışımına ait olduğu görülmüştür. Karbonatlaşma uygulaması yapılmış beton karışım örnekleri incelendiğinde (Şekil 7); en yüksek ses hızı değerinin % 10 SD beton karışımına, en düşük ses hızı değerinin ise % 15 MT ve % 15 MT + % 10 SD karışımlarına ait olduğu belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, tüm beton karışımlarında ses hızı değerleri artmıştır.

Literatürde karbonatlaşma meydana gelen beton örnekleri üzerinde gerçekleştirmiş ultrases geçiş hızı deneyine ait herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Ancak ses hızı ve beton basınç dayanımının birbiriyle paralellik gösterdiği bilinmektedir. Karbonatlaşma uygulanmış örneklerin basınç dayanımlarında meydana gelen artış, ses hızı değerlerinde de kendini göstermiştir.



Şekil 10. Ultrases geçiş hızı

Betonların basınç dayanımı arttıkça beton kalitesi yani ses hızı değerleri artış göstermektedir. Şekil 11'de çalışmada kullanılan betonların basınç dayanımı ile ses hızı değerleri arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 11. Karbonatlaşma uygulanmış ve uygulanmamış örneklerde basınç dayanımı ile ses hızı ilişkisi

Karbonatlaşma uygulanmamış örneklerin korelasyon katsayısı (0,74), karbonatlaşma uygulanmış örneklerin korelasyon katsayısından (0,70) büyüktür. Bu durum, karbonatlaşma etkisinin basınç dayanımı-ses hızı ilişkisini kuvvetlendirdiğini ifade etmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Farklı oranlarda MT, SD ve MT + SD kullanılarak üretilmiş beton karışımları ile yapılan çalışmada karbonatlaşma uygulanmamış örnekler incelendiğinde:

- En yüksek basınç ve eğilme dayanımının % 10 SD içeren örneklere ait olduğu, en düşük basınç ve eğilme dayanımının ise % 15 MT içeren örneklere ait olduğu görülmüştür.
- Aşınma miktarının en fazla olan örneklerin % 15 MT ve % 15 MT + % 10 SD içeren karışımlar olduğu, aşınma miktarının en az olduğu örneklerin ise % 10 SD, % 5 MT + % 10 SD ve % 5 MT içeren karışımlarda olduğu belirlenmiştir.
- MT miktarı arttıkça basınç ve eğilme dayanımlarının azaldığı, aşınma miktarının ise arttığı görülmüştür.
- MT ve SD'nin bir arada kullanımının, yalnız MT kullanımına göre daha olumlu basınç, eğilme ve aşınma dayanımı sonuçları verdiği elde edilmiştir.
- En yüksek ultrases hızı değerinin % 10 SD karışımında, en düşük ultrases hızı değerinin % 15 MT karışımına ait olduğu saptanmıştır.
- Kapiler su emme incelendiğinde, dayanım değerleriyle ilişkili olarak en düşük kapilarite katsayısının % 10 SD içeren örneklere ait olduğu, en yüksek kapilarite katsayısının diğer özelliklerle ilişkili olarak, % 15 MT içeren karışıma ait olduğu belirlenmiştir.

Karbonatlaşma uygulanmış örnekler incelendiğinde ise:

- Karışımlarda MT yüzdesi arttıkça karbonatlaşma derinliğinin arttığı görülmüştür.
- Basınç ve eğilme dayanımı düştükçe karbonatlaşma derinliğinin arttığı belirlenmiştir.
- Karbonatlaşma uygulanmış örneklerde ultrases hızı değerleri artış göstermiştir.
- Karbonatlaşma uygulanmış örneklerde aşınma miktarının azaldığı, basınç ve eğilme dayanımının ise arttığı saptanmıştır.
- Karbonatlaşma derinliğinin en çok % 15 MT içeren örneklerde olduğu, en az derinliğin ise % 10 SD içeren örneklerde meydana geldiği bulgusu elde edilmiştir.

Sonuç olarak farklı oranlarda MT, SD ve MT + SD içeren beton örneklerinde karbonatlaşma derinliği arttıkça; ultrases hızı değerlerinin arttığı, kapilarite katsayılarının ve aşınma miktarlarının düştüğü, basınç ve eğilme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Beton üretiminde MT'nin çimentoya % 5 ikame edilmesine kadar kullanılabilceği, % 10 SD ikamesi ile beraber MT'nin % 10'a kadar çimentoya ikame malzemesi olarak kullanılabilceği belirlenmiştir.

#### Kaynaklar

1. Bekem, İ., Gültekin, A. B., Dikmen, Ç. B. 2009. Yapı Ürünlerinin "Hizmet Ömrü" Açısından İncelenmesi: Betonarme Örneği, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 2155-2160 s.
2. Massazza, F. 2005. Betonun Dayanımı ve Yapıların Hizmet Ömrü: İki, Çözülebilir Sorun, Hazır Beton Dergisi, 42-56 s.
3. Gönen, T., Yazıcıoğlu, S. 2004. Farklı Nem Ortamlarındaki Betonlarda Karbonatlaşma Gelişimi, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(2): 367-373.
4. Yalçın, H., Gürü, M. 2006. Çimento ve Beton, Palme Yayıncılık, 216s. ISBN: 9944-341-16-9, Ankara.
5. Newman, J., Choo, B. S. 2003. Advanced Concrete Technology Concrete Properties, Butterworth-Heinemann Press, ISBN: 07506-5104-0, 8-17 s.

6. Betonda Karbonatlaşma 2011. <http://www.theconstructioncivil.com/2010/02/concrete-carbonation.html> (Erişim tarihi: 02.06.2012).
7. Ramyar, K. 2007. Portland Çimentosu – Süperakışkanlaştırıcı Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörler, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi, Ankara
8. Erdem, R. T., Öztürk, A. U. 2012. Mermer Tozu Katkısının Çimento Harcı Donma-Çözünme Özellikleri Üzerine Etkisi, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 1(2): 85-91.
9. Erdoğan, T.Y. 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını, 191-502-518s. Ankara.
10. Şimşek, O. 2009. Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin yayıncılık, 113-119,153 s. Ankara.
11. TS 3530 EN 933-1. 1999. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini - Eleme Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
12. TS 706 EN 12620+A1. 2009. “Beton agregaları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
13. TS 802. 1985. Beton Karışımı Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
14. TS 1247. 1984. Beton Yapım, Döküm Ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
15. TS EN 12350-2. 2002. Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
16. BS EN 13293. 2004. Products And Systems For The Protectgion And Repair Of Concrete Structures-Test Methods-Determination Of Resistance To Carbonation.
17. Yazıcıoğlu, S., Demirel, B., Gönen, T., Özer, Ş. 2012. Farklı Tip Çimentoların Betonun Karbonatlaşmasına Etkisi, SDU International Technologic Science, 4(3): 112-120.
18. TS EN 12390-5. 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
19. ASTM C 597. 2002. “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, American Society For Testing And Materials, USA.
20. TS EN 772-11. 2002. Kâgir Birimler - Deney Metotları - Bölüm 11: Betondan, Yapay Ve Doğal Taştan Yapılmış Kâgir Birimlerde Kapiler Su Emme Ve Kil Kâgir Birimlerde İlk Su Emme Hızının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. ASTM C 944. 1999. Standard test methot for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method, American Society For Testing And Materials, USA.
22. TS EN 12390-3. 2003. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
23. Yeğinobalı, A. 2009. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 27-36 s. Ankara.
24. Özcan, F. 2005. Silis Dumanı İçeren Harç Ve Betonların Özellikleri Ve Hızlandırılmış Kür İle Dayanım Tahmini, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği ABD, Doktora tezi, Adana.