

Silika Füme İçeren Betonlar İçin İstatistiksel Dayanım Bağlılıkları

1. GİRİŞ

Beton teknolojisinin 1980'li yılları, yüksek dayanımlı betonların (≥ 40 MPa) okyanus petrol üretim platformlarında ve özellikle yüksek katlı yapılarda, büyük açıklıklı öngermeli köprülerde uygulanmalarının büyük ölçüde arttığı zaman olmuştur. Aynı zaman aralığında yüksek dayanımlı betonların mühendislik özellikleri üzerinde düzenlenen bilimsel toplantıların yoğunlaşması da dikkat çekicidir. Bu bilimsel toplantılarda sunulan tebliğlerin konu itibarıyla dağılımları yakından incelendiğinde en çok tartışılan konulardan biri de mineral katkı olan "silika füme"nin silis dumanı beton karışımındaki işlevlerinin "mikroyapı" bazında araştırılması olmuştur. Kuşkusuz bu kapsamlı çalışmalar sayesinde "silika füme"nin beton özellikleri (mikroyapı, mekanik büyüklükler, permeabilite vb.) üzerindeki etkileri belirli ölçüler içinde belirlenmiştir. Pratik mühendislik açısından bakıldığında, "silika füme"nin özellikle yüksek dayanımlı betonların karışım tasarımına yönelik çalışmaların oldukça sınırlı olduğu gözlenebilir. Daha açık bir deyişle, yüksek dayanımlı betonların karışım tasarımını belirleyici şu sorular:

* Silika füme (mikro silis) içeren betonlar için dayanım = f (bileşim miktarları oranı veya oranları) bağıntıları nelerdir ve en yüksek kestirim kapasitesine sahip model hangisidir?

* Uçucu külden kullanıldığı gibi, silika füme'nin karışım içindeki "işlevsel özelliğini" analitik şekilde ifade eden bir yaklaşım ortaya konulabilir mi? Ve silika-fümenin kimyasal özelliklerinin etkisi bu yaklaşıma nasıl yansıtılabilir?

'Yanıt beklemektedir.'

Bu çalışmanın temel amacı ise yukarıda sıralanan soruların yanıtlarının özellikle yüksek dayanımlı betonların karışım tasarımına pratik yönden yardımcı olmak üzere, bilimsel ihtiyat ölçüsünde verilmesidir. Ayrıca ele alınan konunun bütünselliğinin sağlanması bakımından silika-fümenin işlevsel etkileri özetlenerek ele alınmıştır.

2. SİLİKA-FÜME'NİN İŞLEVSEL ETKİLERİNE GENEL BAKIŞ

Silika-füme'nin beton karışımındaki temel işlevleri Şekil 1'de açıklanmıştır. Özetlenirse, silika-füme'nin iki temel işlevi söz konusudur:

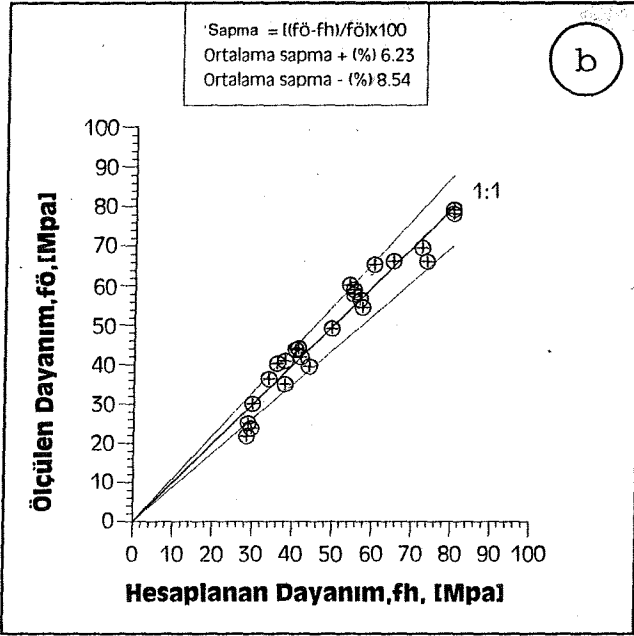
* Yaklaşık olarak normal portland çimentosu incelendiğinde 50 kat daha ince malzeme (ortalama dane boyutu 0.1 - 0.2 μ m) olması nedeniyle çimento hamurundaki porları(*) dolduracak hamurun "doluluk oranını" artırır (Khayat, Aitcin, 1992). Sonuçta Powers bağıntısı (Powers, 1958) gereğince "dayanım" artacaktır.

* Bilindiği üzere normal portland çimentosunun hidratasyon ürünü olan "Ca (OH)₂" kimyasal yönden labil özellik arz eder ve çimento hamuru ile agrega yüzeyi arasında boşluklu yapının oluşmasına yol açar. Silika-füme katkılı karışımında ise Ca (OH)₂, silika-füme "CSF" ile reaksiyona girerek yapı içinde kimyasal olarak bağlanır. Oluşan kalsiyum silikat hidrat "CSH" betonun en zayıf zonu oluşturur çimento hamuru ile agrega yüzeyleri arasındaki geçiş zonunun "bağ dayanımını" artırır. Silika-füme'nin bu puzzolanik işlevsel özelliği tamamen kimyasal yapısındaki amorf silisyum oksit (SiO₂)'den kaynaklanmaktadır. Puzzolanik etki hidratasyon kinematiki ile yakından ilintilidir. Kısaca, anılan etki zamana bağlı olarak gelişir (Sabir, 1995). ACI - Komite 234 raporuna göre silika fümenini dayanım üzerindeki etkisi 28 günlük kür yaşından sonra önemsiz olmaktadır (ACI, 1995).

Çimento hamurunun Porozitesi "P"

$$P = \frac{V_{SU}}{V} = \frac{M_{SU}}{M_C} = \frac{M_{SU}}{M_C} \cdot \frac{1}{\gamma_C} = \frac{M_{SU}}{M_C} \cdot \frac{1}{\gamma_C} + \frac{1}{\gamma_C}$$

ile ifade edilebilir. Burada;



Şekil 1. (a) Skjolsvold (1986) verileri kullanılarak en iyi regresyon modelinin "silika füme etkinlik katsayısı" $K_{sf} = 2$ için $\text{Dayanım} = f \left[\frac{M_c = M_{sf}}{M_{su}} \right]$ değişimi. (b) 1:1 tekniği ile ölçülen değerlerin (f_o) hesaplanan değerler (f_h) ile karşılaştırılması.

İzlendiği üzere ortalama sapma miktarları % 10'un altında kalmıştır. Bu sonuç, anılan ifadenin "kestirim kapasitesi"nin yüksek olduğuna işaret etmektedir.

Tüm dataların (N= 108 adet) dikkate alındığı regresyon analizinin sonuçları Çizelge 3'de ve en yüksek korelasyon katsayısı ile sonuçlanan ifadenin (7. bağıntı) değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir Aynı Şekilde kaynak bazında söz konusu regresyon modelinin değişimleri işlenmiştir.

Çizelge ve Şekil birlikte değerlendirildiğinde şu sonuçlar ön plana çıkmaktadır:

* Tüm datalar (N= 108 adet) alındığında, beklenildiği gibi, en iyi regresyon modelinin korelasyon katsayısı $r = 0.80$ mertebelerine inmektedir. Deneysel dataların, çıkartılan bağıntı "dağılımları" çok belirgindir. Bu dağılım, çok büyük ölçüde beton karışımlarında kullanılan silika-fümenin kimyasal bileşiminin farklılığın-

dan kaynaklanmaktadır. Nitekim, kaynak bazında silika-fümenin etkinlik katsayıları ayrı ayrı hesaplandığında $K = (1.97-5.11)$ arasında değiştiği gözlenmektedir. Silika-füme'nin puzzolanik etkisinin farklılığı (Khayat -Aitcin, 1992, sahife: 839'da) diğer kaynaklara atıfta bulunmak suretiyle rapor edilmiştir.

* Kaynak bazında incelendiğinde lineer çoklu regresyon modeli (bağıntı 7) kendi deneysel datalarına çok iyi uyum sergiledikleri hemen gözlenmektedir.

* Tüm dataların (N=108 adet) dikkate alındığı durumda silika-fümenin -28 günlük basınç dayanımı için- etkin katsayısı yaklaşık $K = 2$ olarak hesaplanmaktadır. Kuşkusuz bu değer tartışmaya açık bir büyüklük olup, bilimsel ihtiyatla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu büyüklüğü - değişmeyen kür yaşı ve koşulları için- denetleyen belli başlı faktörlerin silikafümenin kimyasal bileşimi ve spesifik yüzey alanı olduğu, ileri sürülebilir.

* 7 ifadesinden anlaşılacağı üzere değişmeyen (M_c/M_{su}) oranlarında artan silika füme miktarı " M_{sf} " ile 28 günlük dayanım artmaktadır. Verilen karışım ve kür koşulları altında silika füme miktarının arttırımı ile gerçekleştirilen "dayanım artması"nın limitli olabileceği, burada belirtilmelidir. Diğer kelimelerle, belirli bir silika-füme miktarından sonra dayanımındaki artış hızı önemsiz olabilir. Luciano ve arkadaşlarının (1991) çalışmasına göre verilen karışım koşulları (maksimum agrega çapı, agrega türü, silika füme türü süperplastikleştirici katkı türü) için dayanımı denetleyen silika-füme yüzde'sinin yanısıra, karışımında kullanılan süperplastikleştirici yüzde'sidir. Kritik silika-füme miktarı üzerinde daha sağlıklı bir değerlendirme yapılabilmesi bakımından dayanımı denetleyen tüm parametrelerin dikkate alındığı, özenle planlanmış ayrıntılı deneysel çalışmalara gereksinime vardır. 7 ifadesi (Çizelge 3) yardımıyla silika füme kullanılmadan endüstriyel çökme büyüklüklerine

- P = Sıkıştırılmış taze çimento hamuru içindeki su ile dolu boşlukların oranı
 V_{SU} = Hamurdaki su hacmi, (cm³)
 V = Tamamen sıkıştırılmış hamurun hacmi (cm³)
 M_{SU} = Hamurdaki su ağırlığı, gr.
 M_C = Hamurdaki çimento ağırlığı, gr.
 γ_C = Cimentonun spesifik ağırlığı

Artan su/çimento oranı ile hamurdaki su dolu porların hacmi artmaktadır.

3. SİLİKA FÜME İÇEREN BETONLAR İÇİN İSTATİSTİKSEL DAYANIM BAĞINTILARI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. İstatistiksel Analizde Kullanılan Bağın-tıların Gözden Geçirilmesi

Beton teknolojisinde karışım tasarımına yönelik olarak üretilmiş dayanım ifadeleri yakından incelendiğinde, bunların iki farklı formda oluşturulduğu göze çarpar:

$$* \text{Dayanım } f = f \left(\alpha = \frac{M_{SU}}{M_C} \right) \quad (\alpha = \text{su/çimento oranı})$$

(ağırlıkça) "değişken" kabul edilmiştir. Abrams bağıntısı, 1918, bu grubun en tipik örneğini teşkil eder.

$$* \text{Dayanım } f = f \left(\alpha = \frac{M_C}{M_{SU}} \right) \quad (\text{çimento/su oranı})$$

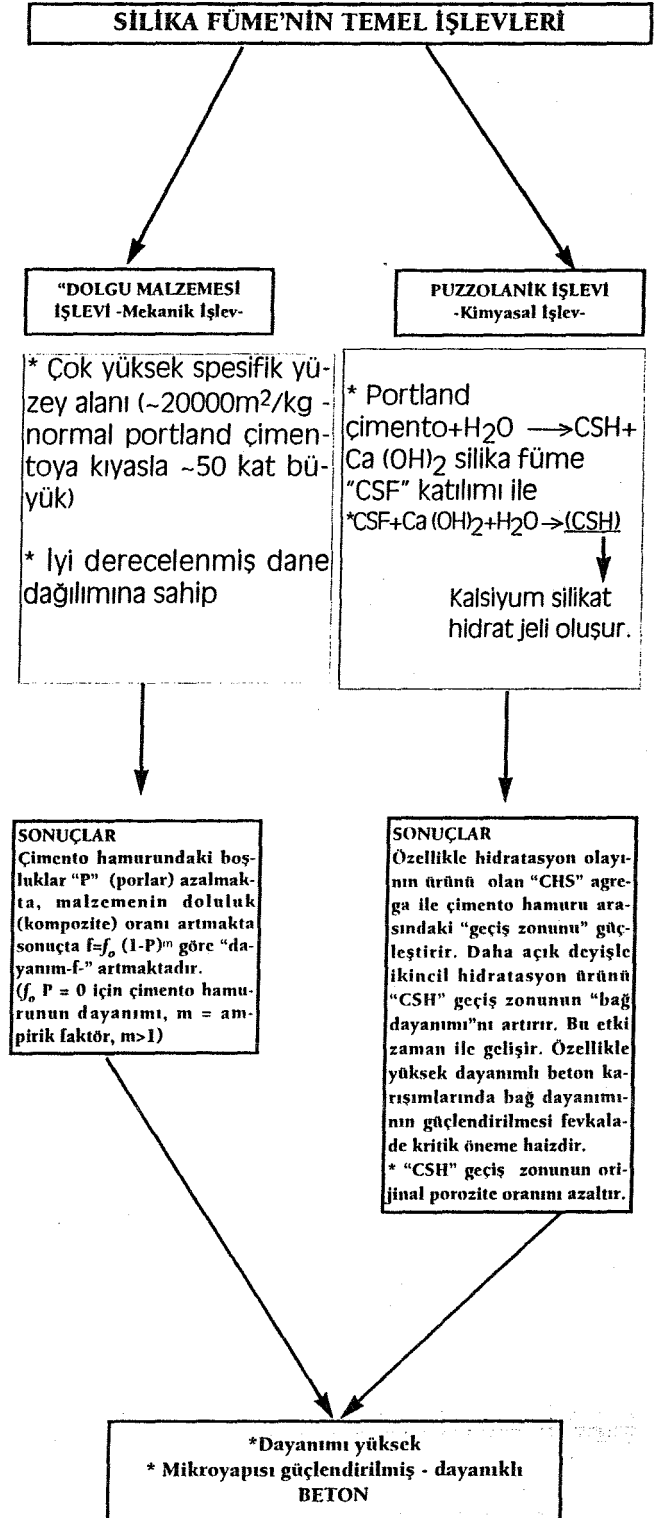
(ağırlıkça) "değişken" kabul edilmiştir. Bu grubun en tipik örneği ise (Bolomey, 1927)'dir.

Bu araştırma çerçevesinde kullanılan ifadeler numaralanarak, Çizelge 2 ve 3'de açıklamalarıyla birlikte verilmiştir. Anılan ifadelerin özellikleri aşağıda kısaca belirtilmiştir:

1 no'lu ifade Abrams bağıntısını gösterir. İfade-nin değişimi, log "dayanım" - M_{SU} / M_C ordinat sisteminde, artan M_{SU} / M_C değerleri için negatif eğimli bir doğruyu temsil eder. Daha açık bir de-yişle, artan su/çimento - ağırlıkça - oranı ile - verilen kür süresi ve agrega granülometrik dağı-lımı için - beton dayanımı azalır.

3 no'lu ifade, matematiksel olarak 1.no'lu ifadeye

Çizelge 1. Silika Füme Katkısının İşlevleri.



ÇİZELGE 2. N= 24 adet deneysel veriler için yapılan regresyon analizinden elde edilen bağıntılar ve korelasyon katsayıları.

BAĞINTI	Ham-Deneysel verilerin alındığı kaynak: SKJOLSVOLD,1986	Regresyon büyüklükleri				
NO:	MODEL	A	B	C	D	r
1	$\log f_{28} = A + B (M_{SU}/M_C + M_{SF})$	2.181	-0.79			0.956
2	$f_{28} = A+B [(M_C+M_{SF}/M_{SU})-0.5]+ C\beta^2$	8.59	32.43	187.8		0.962
3	$f_{28} = A\alpha^B$	26.87	-1.15			0.943
4	$f_{28} = A+B (M_{SU}/M_C + M_{SF}) + C(M_C + M_{SF})$	79.23	-64.5	0.035		0.954
5	$f_{28} = A+B (M_{SU}/M_C + M_{SF}) + C(M_C) + D(M_{SF})$	91.17	-75.4	0.011	0.126	0.97
6	$f_{28} = A+B (M_{SU}/M_C + M_{SF}) + C(M_C + M_{SF}) + D(M_{SF}/M_C)$	92	-79.4	0.015	36.99	0.974
7	$f_{28} = A+B (M_C/M_{SU}) + C(M_{SF}/M_{SU})$	-6.01	30.23	62.98		0.976

ÇİZELGE 3. N= 108 adet çeşitli deneysel veriler için yapılan regresyon analizinden elde edilen bağıntılar ve korelasyon katsayıları.

BAĞINTI	Tüm veriler için regresyon analizi sonuçları	Regresyon büyüklükleri				
NO:	MODEL	A	B	C	D	r
1	$\log f_{28} = A + B (M_{SU}/M_C + M_{SF})$	2.06	-0.78			0.736
2	$f_{28} = A+B [(M_C+M_{SF}/M_{SU})-0.5]+ C\beta^2$	14.92	19.77	81.42		0.796
3	$f_{28} = A\alpha^B$	23.94	-0.89			0.77
4	$f_{28} = A+B (M_{SU}/M_C + M_{SF}) + C(M_C + M_{SF})$	35.97	-48	0.108		0.785
5	$f_{28} = A+B (M_{SU}/M_C + M_{SF}) + C(M_C) + D(M_{SF})$	39.18	-50	0.092	0.187	0.797
6	$f_{28} = A+B (M_{SU}/M_C + M_{SF}) + C(M_C + M_{SF}) + D(M_{SF}/M_C)$	36.89	-50.2	0.101	21.2	0.792
7	$f_{28} = A+B (M_C/M_{SU}) + C(M_{SF}/M_{SU})$	7.008	17.78	35.24		0.807

f = Betonun 28 Günlük Dayanımı, MPa, (silindir dayanımı)

M_C = Karışımındaki Çimento Miktarı, (kg/m³), M_{SF} = Karışımındaki Silika Füme Miktarı (kg/m³)

M_{SU} = Karışımındaki Su Miktarı (kg/m³).

$\beta = \frac{M_{SF}}{M_C + M_{SF}}$, Silika Füme Kullanım Oranı -ağırlıkça,

$\alpha = \frac{M_{SU}}{M_C + M_{SF}}$, Su-Çimentolu Malzeme Oranı -ağırlıkça,

A.B.C.D - Regresyondan Elde Edilen Eşitliklerin Katsayıları, r - Korelasyon Katsayısı.

kıyasla daha basit olup, kestirim kapasitesi açısından da Abrams ifadesiyle karşılaştırılabilir nitelik sergiler (Arioğlu, 1975, Arioğlu, Yüksel, 1985; Arioğlu Odbay, 1994).

4, 5, ve 6 no'lu ifadeler temelde Abrams bağıntısının değiştirilmiş türleridir. Bu bağıntıların kestirim kapasitelerinin Abrams ifadesinden farkedilebilir düzeyde üstün oldukları söylenebilir. Özellikle uçucu kül içeren betonlarda anılan ifadelerin çok iyi sonuç verdikleri rapor edilmektedir. (Oluokun, 1994). Bu tür bağıntılar mineral katkı içeren beton karışımlarının tasarımında kiritik çimento, uçucu kül miktarının belirlenmesinde kullanılabilir.

2 no'lu bağıntı temelde Bolomey formülünün uçucu kül içeren betonlar için değiştirilmiş formunu ifade eder. Bu ifadeden hareketle uçucu kül içeren betonlarda maliyeti minimize eden "optimal uçucu kül dozajı" (miktarı) analitik şekilde formüle edilmiştir. (Popovics, 1982; Arioğlu, Manzak, 1993).

7 no'lu bağıntı ise (Bolomey, 1927), tarafından teklif edilen ampirik bağıntının ($f = A+B (M_c/M_{su})$) çoklu regresyon analizi için "değiştirilmiş" şeklindedir. 7. ifade, uçucu küllü betonların "dayanım= $f (M_c/M_{su})$ " değişimlerinin çıkarılmasında kullanılmıştır ve aynı lineer çoklu regresyon ifadesinden hareketle, F türü uçucu küllerin ($CaO \leq 10$) "etkinlik katsayısı" -28 günlük dayanımlar için- ($K=C/B$) belirlenmiştir (Hedegaard, Hansen, 1992).

3.2. İstatistiksel Analizde Kullanılan Deneysel Dataların Kısa Tanıtımı

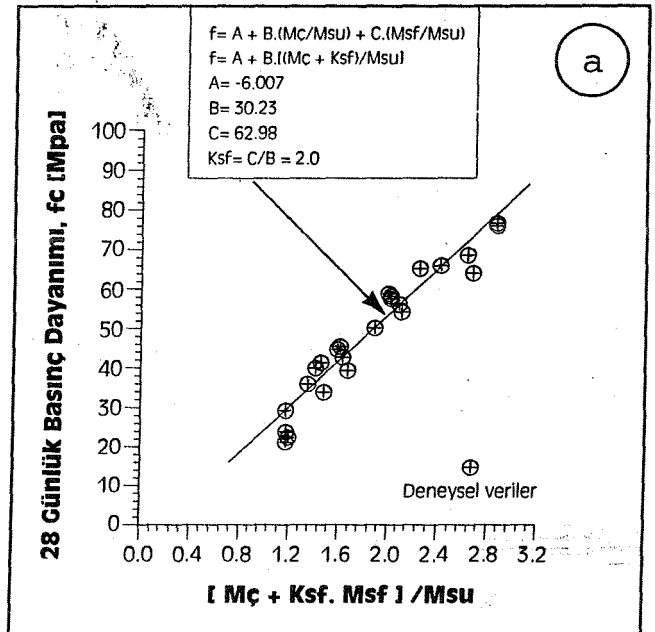
Analizde kullanılan ham dataların alındığı kaynaklar ve teknik özellikleri topluca EK 1'de takdim edilmiştir. Tüm datalar ele alındığında, çimento miktarı $M_c = 73.5-590 \text{ kg/m}^3$, silika füme miktarı $M_{sf} = 11-150 \text{ kg/m}^3$, su miktarı $M_{su} = 106-268 \text{ kg/m}^3$, su-çimentolu malzeme miktarı oranı ağırlıkça- $a = M_{su}/M_c + M_{sf} = 0.25-0.60$, silika füme kullanım oranı - ağırlıkça- $\beta = \% 1.7-30$, çökme $\Delta = 6 - 25 \text{ cm}$ aralıklarında değişmiştir. Tüm dataların içerdiği dayanım aralığı ise (22 -108) MPa'dır ($\emptyset 150-300 \text{ mm}$ silindir dayanımı). Dataların çok

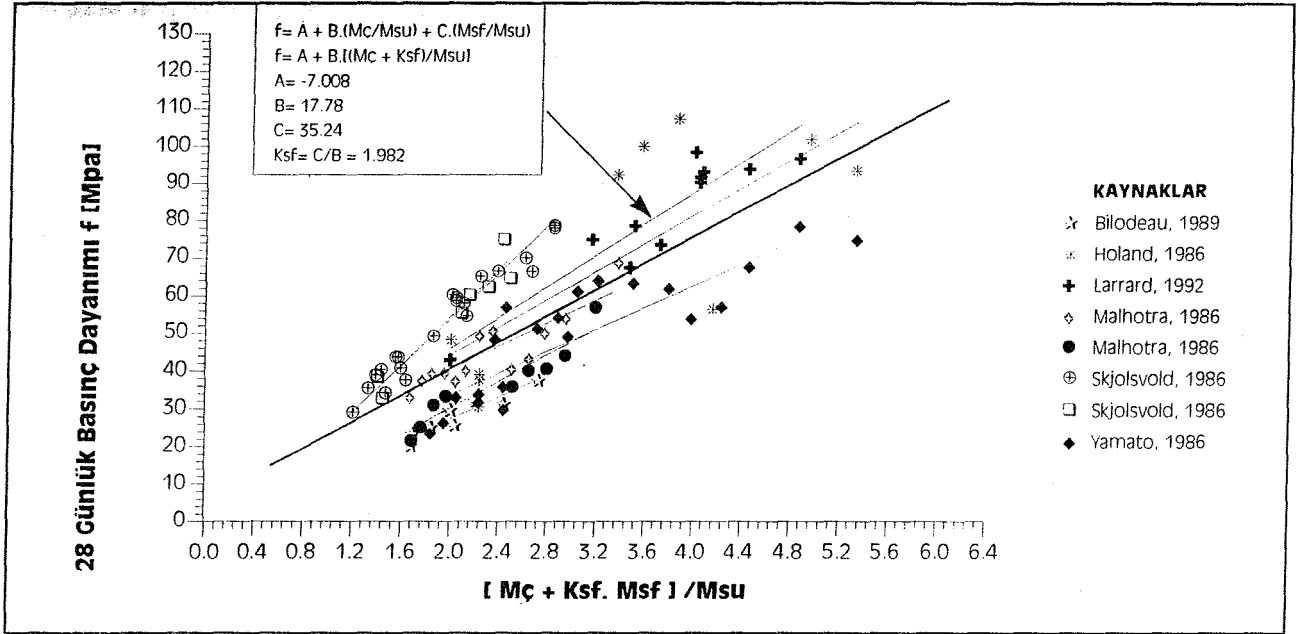
az kesiminde, kullanılan silika-füme'nin tam kimyasal analiz sonuçları (SiO_2, K_2O, Na_2O, C) rapor edilmiştir. Bu nedenle silika-fümenin bağlayıcılık etkinlik katsayısı "Ksf'nin kimyasal bileşimi ile var olabilecek önemli ilintiler (de Larrard, Gorse, Puch, 1992) için ilk ipuçları bu çalışma çerçevesinde çıkartılamamıştır.

3.3. Sonuçlar ve Değerlendirilmesi

Yer ekonomisi sağlamak amacıyla burada sadece Skjolsvold, 1986'nın ham verilerinin regresyon analizinin toplu sonuçları Çizelge 2'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere, analizde dikkate alınan modeller arasında en yüksek korelasyon katsayısı ($r = 0.976$) ile sonuçları ifade, değiştirilmiş Bolomey bağıntısı (7. ifade) olmuştur. Şekil 1-a'da anılan bağıntının değişimi gösterilmiştir. Değişimin çizilmesinde $K=C/B = 62.98/30.23 \approx 2.0$ değeri alınmıştır. Açıkta ki artan "çimentolu madde/su" oranında betonun 28 günlük dayanımı "f" artmaktadır. Şekil 1-b'de ise lineer - çoklu regresyon ifadesinden (Şekil 1-a) hesaplanan 28 günlük dayanım değerlerinin deneysel değerlerden sapma miktarları 1:1 teknikle incelenmiştir.

Şekil 1. (a)





Şekil 2. Tüm veriler (N=108 adet) kullanılarak en iyi regresyon modelinin Dayanım - f [(Mc+Msf)/Msu] değişimi ve kaynak bazında aynı modelin değişimleri.

(Δ=10-20 cm) haiz beton karışımlarında ulaşılabilecek basınç dayanımı merteye yakınsaklığı için de kestirilebilir:

$$\frac{M_{sf}}{M_{su}} = 0 \text{ için}$$

$$f_{28} = 7.00 + 17.78 \left(\frac{M_c}{M_{su}} \right), \text{ MPa}$$

$$M_c = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{su} = 130 \text{ kg/m}^3 \text{ kabulleri yapılırsa,}$$

$$f_{28} = 7.00 + 17.78 \left(\frac{500}{130} \right) = 75.3 \text{ MPa (} \phi \text{ 150 x 300mm) bulunur.}$$

Bu sonuç, de Larrard, Gorse, Puch (1992-a) ifadesiyle ($M_{sf} = 0$ için) test edilirse

$$f_{28} = \frac{K_a \cdot R_{c,28}}{(1 + 3.1\alpha)^2}$$

$$* \text{ İri agrega faktörü (kireçtaşı için) } K_a = 4.91$$

$$* \text{ Çimento norm dayanımı } R_{c,28} = 42.5 \text{ MPa}$$

$$* \text{ Su / çimento - ağırlıkça - oranı } \alpha = \frac{M_{su}}{M_c} = \frac{130}{500} = 0.26$$

$$f_{28} = \frac{4.91 \times 42.5}{(1 + 3.1 \times 0.26)^2} = 64 \text{ MPa (} \Phi = 160 \times 320 \text{mm)}$$

elde edilmektedir. Yaklaşımlar arasındaki kabul

edilebilir sayısal farkı irdelemeden, - silika füme kullanılmadan - endüstriyel çökme değerlerine (10 - 20 cm) cevap verilebilecek karışımların 28 günlük dayanım düzeyi 75MPa olarak kestirilebilir. Kuşkusuz silika-füme katılmadan basınç dayanımı çok yüksek (150-200 Mpa), iyi kaliteli agrega, ve yüksek erken dayanımlı (ASTM III türü Portland çimento) çimento kullanılmak suretiyle yukarıda hesaplanan dayanım düzeyinin çok üzerinde beton üretmek mümkündür. Geçer iken burada vurgulanmalıdır ki, agreganın tek eksenli basınç dayanımı, yüksek dayanımlı betonların dayanımını etkileyen önemli bir faktördür (Arioğlu, Köylüoğlu, 1996).

4. SONUÇ

Bu çalışma çerçevesinde incelenen konularda elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

* Silika füme içeren betonlar için çıkarılan regresyon analizi ifadelerine kaynak bazında bakıldığında, en yüksek korelasyon katsayısı ile sonuçlanan ifade Bolomey bağıntısının değiştirilmiş formu olmuştur (Çizelge 2, Bağıntı 7) (Şekil 1). Söz konusu bağıntı yardımıyla silika fümünün bağlayıcılık etkinlik katsayısı "Ksf" sayısal şekilde

belirlenebilmektedir. Bu katsayının büyük değer alması silika fümenin beton dayanımını arttıran katkısının büyük olacağını açıklar. K_{sf} 'nin genel anlamda kür yaşının, kimyasal birleşiminin, ve spesifik yüzey alanının fonksiyonu olduğu, ileri sürülebilir. Sözü edilen konunun ortaya çıkarılması için bu amaca yönelik olarak özenle düzenlenmiş, kapsamlı deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır.

* Çeşitli kaynakların birlikte (N= 108 adet) kullanıldığı regresyon analizinde de 7. bağıntının deneysel verilere oldukça iyi uyum sergilediği gözlenmiştir (Şekil 2). Gözlenen sapmaların, farklı nitelikteki silika füme kullanımından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. (Kullanılan verilere ait silika füme nitelikleri, özellikle kimyasal özellikleri, orjinal kaynağında rapor edilmediğinden bu farklılık analitik bir şekilde burada ifade edilmemiştir.)

* Ekonomik yönden karışımda kullanılacak optimal çimento-silika füme miktarının analitik şekilde belirlenmesi probleminde, bağıntı 2 ve bağıntı 6'dan (Çizelge 2) yararlanılabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmanın yapılmasını ve yayınlanmasını teşvik eden Yapı Merkezi A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Prof. Dr. Müh. Sayın Ergin Arioğlu'na teşekkür ederler.

Çalışmada ileri sürülen sonuçlar sadece yazarlara aittir.

KAYNAKÇA

Abrams, D.A., "Design of Concrete Mixtures", Bulletin-1 Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Dec. 1918.

ACI Committee 234, "Guide for Use of Silica Fume in Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 4, July-August 1995, pp. 437-440

Arioğlu, Ergin, "Maden Galerilerinin Takviyesi için İnşa Edilen Rambu Duvarlarının İmalinde Kullanılan Anhidrid Karışımlarının Teknik Özellikleri", İTÜ Dergisi, Cilt 33, Yıl 33 Sayı 5, 1975

Arioğlu, Ergin, Manzak, O., "İnşaat Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Ekonomiklik Analizi" Türkiye Prefabrik Birliği Dergisi, Sayı 22, Nisan 1992, s. 25-33.

Arioğlu, Ergin, Odbay, O., "Discussion of Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic

Modulus and Fracture Energy by P.J.M. Monteiro, P.R.L. Helene and S.H. Kang", Materials and Structures, 27, RILEM- 1994, pp. 494-497.

Arioğlu, Ergin, Yüksel, A., "Mix Design of Shotcretes For Underground Structural Support", Journal of Mines, Metals and Fuels, June-July 1995.

Arioğlu, Ergin, Köylüoğlu, Ö.S., "Discussion of Estimation of Coarse Aggregate Strength in High-Strength Concrete by T.P. Chang, N.K. Su" ACI Material Journals, November-December 1996, pp. 637-639.

Bilodeau, A., Carette, G.G., "Resistance of Condensed Silica Fume Concrete to the Combined Action of Freezing and Thawing Cycling and De-Icing Salts", ACI SP-114, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 3. Int. Conf., 1989, pp. 945-970.

Bolomey, J., "Durcissement des Mortiers et Betons" Bulletin Tech, Suisse Romande No 16, 22 and 24, 1927.

Hedegaard, S.E., Hansen, T.C., "Modified Water/Cement Ratio Law for Compressive Strength of Fly Ash Concretes", Materials and Structures, 25 RILEM, 1992, pp. 273-283.

Holland, T.C., Krysa, A., Luther, M.D., and Liu, T.C., "Use of Silica-Fume Concrete to Repair Abrasion-Erosion Damage in the Kinzua Dam Stiling Basin", ACI SP-91, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 2. Int. Conf., 1986, pp. 841-863.

Khayat, K.H. and Aitcin, P.C., "Silica Fume in Concrete- An Overview", ACI Istanbul Conference, SP 132-46, 1992, pp. 853-872.

Larrard, F. de, Gorse, J.F. and Puch, C., "Comparative Study of Various Silica-Fumes as Additives In High Performance Cementitious Materials", Materials and Structures, 25 RILEM, 1992-a, pp. 265-272.

Larrard F. de, Le Roy, R., "the Influence of Mix-Composition on the Mechanical Properties of Silica-Fume High- Performance Concrete", Fourth International ACI-CANMET Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 1992, Istanbul.

Luciano, J.J. Nmai, C.K., DelGado, J.R., "A Novel Approach to Developing High-Strength Concrete" Concrete International, Vol. 13, No. 5, May 1991, pp. 25-29.

Malhotra, V.M., "Mechanical Properties, and Freezing-and-Thawing Resistance of Non-Air-Entrained and Air-Entrained Condensed Silica



Fume Concrete Using ASTM Test C 666, Procedures A and B", ACI SP-91, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 2. Int. Conf. Madrid, 1986, pp. 1069-1094.

Oluokun, F.A., "Fly Ash Concrete Mix Design and The Water-Cement Law", ACI Materials Journal, Vol. 91, No 4, July-August 1994, pp. 362-371.

Popovics, S., "Strength Relationships For Fly Ash Concrete" ACI Journal, January-February, 1982, pp. 43-49.

Popovics, S., Popovics, J.S., "A Foundation of Computer Program for the Advanced Utilization of w/c and Air Content in Concrete Proportioning", Concrete International Vol. 16, No. 12, December 1994, pp. 21-26.

Powers, T.C., "Structure and Physical Propert-

ies of Hardened Portland Cement Paste", J. Amer. Ceramic Soc., Vol. 61, No. 1, 1958, pp. 1-5.

Sabir, B.B., "High-Strength Condensed Silica Fume Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 47, No. 172, 1995, pp. 219-226.

Skjolsvold, O. "Carbonation Depths of Concrete with and without Condensed Silica Fume", ACI SP- 91, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 2. Int. Conf. Madrid, 1986, pp. 1031-1048.

Yamato, T., Emoto, Y. And Soeda, M., "Strength and Freezing- and-Thawing Resistance of Concrete Incorporating Condensed Silica Fume", ACI SP-91, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 2. Int. Conf. Madrid, 1986, pp. 1095-1117.

EK 1. Regresyon Analizlerinde Kullanılan Ham Verilere Ait Beton Karışımlarının Teknik Özellikleri ve Karışım Bileşenleri. (Veriler aralık olarak gösterilmiştir)

HAM VERİ KAYNAĞI	DAYANIM (MPa)	M _c	M _{sf}	M _{su}	ΣMa	α	β	γ	Δ
Holand, 1986	32.7-108.7	269-593	17.6-88.9	73.5-156.8	1795	0.32-0.45	6.1-18	2444	19-25
Malhotra, 1986	34.1-67.7	239-431	14-130	168.6-174.8	1238-1959	0.40-0.60	1.7-30.1	2385-2435	7.5-21.6
Malhotra, 1986	23.1-57	202-417	11-123	141-172.6	1907-1200	0.40-0.60	5-30	2255-2370	7-23
Skjolsvold, 1986	25.2-78.6	172-510	11-96	170-268	1624-2047	0.61-0.47	4.9-20.1	2350-2480	10-14
Skjolsvold, 1986	34.1-74.7	290-484	38-61	198-259	1644-2000	0.44-0.56	13.1	2370-2500	17-19
Yamato, 1986	25-79.7	231-500	17-150	125-187		0.25-0.55	7.8-8.4		7.5-12.5
Bilodeau, 1989	22-38.4	203-316	17-27	131.9-153.5	1674-1969	0.4-0.6	8	2250-2340	7-12.5
Gjorv, 1990	22.8-83.9	168-634	16-77	157-180	1641-2002	0.27-0.91	7.4-13.9	2374-2452	8.5-10.8
Larrard, 1992	43.5-99.4	342-457	20.9-57.9	106-171	1759-1918	0.26-0.50	4.8-13	2360-2450	6-25

M_c = Karışımdaki Çimento Miktarı, (kg/m³),

M_{sf} = Karışımdaki Silika Füme Miktarı (kg/m³),

M_{su} = Karışımdaki Su Miktarı (kg/m³),

ΣMa = Toplam Agrega Miktarı, kg/m³, $\alpha = \frac{M_{su}}{M_c + M_{sf}}$, Su - Çimentolu Malzeme Oranı - ağırlıkça

$\beta = \frac{M_{sf}}{M_c + M_{sf}} \times 100$, Silika Füme Kullanım Oranı - ağırlıkça, Δ= Betonun Taze (Plastik) Yoğunluğu (kg/m³),

γ= Çökme (cm),