

SİLİKA FÜME İÇEREN BETON KARIŞIMLARININ (20 MPa ≤ f₂₈ ≤ 120MPa) KARIŞIM TASARIMLARININ RASYONELLEŞTİRİLMESİ

Prof. Dr. Müh. Ergin Arıoğlu¹

ÖZET

Bu çalışmada silika füme içeren betonların (20 MPa – 120MPa, Su/Toplam bağlayıcı madde oranı = 0.19 - 0.90) karışım tasarımının temel ilkeleri ortaya konulmuştur.

Karışım tasarımında en önemli ilinti basınç dayanımı $f_{28} = f(\text{su/toplam bağlayıcı}) = f(\text{su/çimento miktarı} + K \times \text{silika füme miktarı})$ 'dır. Burada toplam 131 ham deneysel veri için ± %15 hata ile çalışan, ilk karışım tasarımına yönelik bağıntı elde edilmiştir. Karışımında kullanılacak çimento miktarını belirlemeye yarayan çimento hamuru hacmi “ $V_h = 0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ” sonucundan hareketle hesaplanmaktadır. Pratik açıdan da bu çalışma çerçevesinde geliştirilen karışım tasarımı yöntemi, regresyona girmemiş 20 adet ham veri için de tahkik edilmiştir. Bu analizde elde edilen bileşenleri (çimento, su, silika füme, toplam agrega, süperakışkanlaştırıcı), orijinal çalışmalarda kullanılan bileşenlerle ayrıntılı şekilde karşılaştırılmıştır. En önemli karışım bileşenleri olan çimento “ M_c ” ve su “ M_{su} ” değerlerinin % 15 sapma sınırları altında kaldığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Silika Füme, Karışım Tasarımı, Yüksek Beton Dayanımı

ABSTRACT

In this study, the main principles of mix design of concretes having silica fume (20 MPa – 120MPa, water/total binder ratio = 0.19-0.90) are outlined.

In the mix design, the most important relation is in between compressive strength, f_{28} and $f(\text{water/total binder})$. By making the use of 131 experimental data, a relationship with ± %15 error is obtained for the initial mix design. The cement content that will be used in the mix could be determined from the volume of the paste, $V_h = 0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Practically, some other 20 data - which were not included in the regression analysis - were also tested with the method. The results (cement, water, silica fume, total aggregate, superplasticizer) of these 20 data were compared those obtained in the original study. The most important mix components, cement “ M_c ” and water “ M_w ” quantities were found to be in between the ± %15 deviation limits.

Keywords: Silica Fume, Mix Proportioning, High Concrete Strength

¹ İTÜ, Maden Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul

1.GİRİŞ

Beton teknolojisinde karışım tasarımı, başka bir deyişle istenen basınç dayanımını, işlenebilirliği ve dayanıklılığı sağlayan beton karışımının bileşenlerinin (çimento, su, mineral katkı maddeleri, ince ve kaba agrega, diğer katkı maddeleri) belirlenmesi, çok önemli bir konudur. Ve başta Abrams[1] (1919) olmak üzere pekçok araştırmacının sürekli dikkatlerini çekmiştir. Beton literatürü incelendiğinde pratik mühendislik amaçlarına yönelik bellibaşlı beton karışım tasarım yöntemleri olarak Doe yöntemi [2]: (28 günlük küp basınç dayanımı 60-20 MPa, su/çimento oranı (ağırlıkça) 0.4-0.8, maksimum agrega çapı 10-20-40 mm, çökme 25-100 mm), ACI [3] yöntemi (211.1-91) : (28 günlük silindir basınç dayanımı 40-15 MPa, su/çimento oranı (ağırlıkça) 0.42-0.79, maksimum agrega çapı 10-20-40 mm, çökme 50-125 mm), Britanya Hazır Beton Birliği (BRMCA) Yöntemi: (örneğin 75 mm referans çökme ve maksimum agrega çapı 20 mm için çimento miktarı 450-200 kg/m³, su/çimento oranı 0.4-0.9, 28 günlük ortalama küp basınç dayanımı 60-20 MPa), ACI-211, 1993 (28 günlük silindir basınç dayanımı 85-40 MPa, su/çimento + uçucu kül oranı (ağırlıkça) 0.2-0.5 maksimum agrega çapı 9.5-12.7-19-25.4 mm), Mehta-Aitcin[4] (1990) Yöntemi : (ortalama 28 günlük basınç dayanımı 120-65 MPa, maksimum su miktarı 120-160 kg/m³, normal portland çimento + uçucu kül veya normal portland çimento + uçucu kül + silika füme kullanımı, su/toplam bağlayıcı madde = 0.19-0.32) ve Domone-Soutsos[5] (1994) Yöntemi: (28 günlük küp basınç dayanımı: 125-60 MPa, su/toplam bağlayıcı oranı 0.22-0.38, silika füme kullanım oranı %5 - 10 - 15 ağırlıkça) ortaya çıkmaktadır. Anılan yöntemler yakından incelendiğinde şu ortak hususlar göze çarpmaktadır:

- Basınç dayanımı = f (su/toplam bağlayıcı madde) (toplam bağlayıcı madde = çimento + uçucu kül + silika füme) değişimleri analitik şekilde ifade edilmemiştir. Basınç dayanımına bağlı olarak “maksimum su miktarı” veya “su/çimento oranları” önerilmiştir.
- Mineral katkı olarak karışımında kullanılan uçucu kül veya silika fümenin işlevsel özelliğini ortaya koyacak “etkinlik faktörü”, keza analitik şekilde belirlenmemiştir. Diğer kelimelerle, silika fümenin basınç dayanımı üzerindeki etkisi sayısal şekilde ifade edilmemiştir.
- Sözü edilen yöntemlerin çalışma aralıkları dayanım itibariyle, ya normal dayanımlı betonlar (≤ 40 MPa) ya da yüksek dayanımlı betonlar (60-120 MPa) için geçerli olmaktadır. 20 – 120 MPa gibi çok geniş bir dayanım aralığına yanıt verebilecek dayanım = f (su/toplam bağlayıcı madde) değişimi tanımlanmamıştır. Bilindiği gibi mineral katkı (silika füme) sadece dayanımı arttırmak için kullanılmamaktadır. (20-100) MPa dayanım aralığında betonu dış ajan etkilerinden koruyabilmek bakımından, daha açık bir deyişle “yüksek performanslı beton” üretimi için %5 gibi çok az bir silika füme karışıma katılmaktadır. Yüksek performanslı beton üretimi için keza basınç dayanımı = f (su/çimento + silika füme) analitik ifadeleri ortaya konmamıştır.
- Yukarıda belirtilen yöntemlerin uygulama sırasındaki “hata miktarları” açıklanmamıştır. Daha açık bir anlatımla, belirlenen malzeme miktarlarındaki sapmaların boyutu konusunda bir açılım sözkonusu değildir.

Bu çalışma, 20-120 MPa gibi çok geniş dayanım aralığında üretilecek, sadece silika füme içeren betonların karışım tasarımı ile ilintili temel ilkeleri belirli bir ayrıntı içinde vermek üzere gerçekleştirilmiştir. Literatürde çeşitli amaçlara yönelik olarak rapor edilen 131 adet işlenmemiş deneysel karışım verisi kullanılmak suretiyle karışım tasarımı için silika fümenin “etkinlik faktörü”nü “ K_{sf} ” de sayısal şekilde dikkate alan basınç dayanımı =

$$f \left(\frac{\text{su}}{\text{çimento miktarı} + K_{sf} \cdot \text{silika füme miktarı}} \right)$$

bağıntıları çıkartılmıştır. Çalışmada üretilen bağıntılar regresyon analizine girmemiş 20 adet deneysel karışım verisi için ayrı ayrı test edilerek “ortalama sapma miktarları” belirlenmiştir.

Ayrıca, karışım tasarımını üstlenen mühendisler için, yol gösterici nitelikte, bazı büyüklükleri tahkik eden ampirik kökenli bağıntılar da önerilmiştir.

2. SİLİKA FÜMENİN İŞLEVSEL ÖZELLİKLERİ ve SİLİKA FÜME İÇEREN BETONLARIN KULLANIM YERLERİ

Çizelge 1’de silika fümenin temel işlevleri ve silika füme içeren betonların kullanım yerleri topluca belirtilmiştir. Çizelge’de verilen açıklamalar yeterli olduğundan burada tekrarlanmayacaktır.

İyi kaliteli agrega (basınç dayanımı 150-200 MPa) ve sadece süper plastikleştirici kullanılmak suretiyle rahatlıkla 100 MPa (silindir dayanımı) dayanım düzeyinde beton üretmek mümkündür. Yanlış burada şu soru sorulmalıdır: Acaba bu dayanımdaki beton istenen “mikroyapı”ya sahip mi? Daha açık bir anlatımla, çeşitli dış ajanlara (Cl⁻, H₂O, SO₄, CO₂, SO₂, vb) karşı uzun dönemde dayanıklılığı ne düzeydedir? Özellikle uzun dönemde istenen düzeyde dayanıklılığı betonda gerçekleştirilmek bakımından toplam bağlayıcı maddenin (çimento + silika füme) en az %5 silika füme kullanılması gerekmektedir [6]. Silika füme kullanımı ile betonun mikroyapısı iyileştirilmekte, sonuçta permeabilite büyüklüğü (su permeabilitesi < 1x10⁻¹⁴ m/sn : Cl iyonu geçiş hızı 6 saat sonunda ≤ 500 coulomb) çok düşük değerdedir [7]. Özellikle yaklaşık 22 - 27 yıldan beri çok ağır mekanik yüklemelere ve ciddi deniz çevresel etkilerine maruz kalan kuzey denizindeki petrol üretim platformlarının (45-70 MPa dayanımlı beton) dayanıklılık (korozyon) bakımından bugün hiçbir sorunları olmaması, silika fümenin betona getirdiği katkıyı açıkça sergilemektedir.

3. SİLİKA FÜME İÇEREN BETON KARIŞIMLARININ TASARIM İLKELERİ

3.1. Kabuller

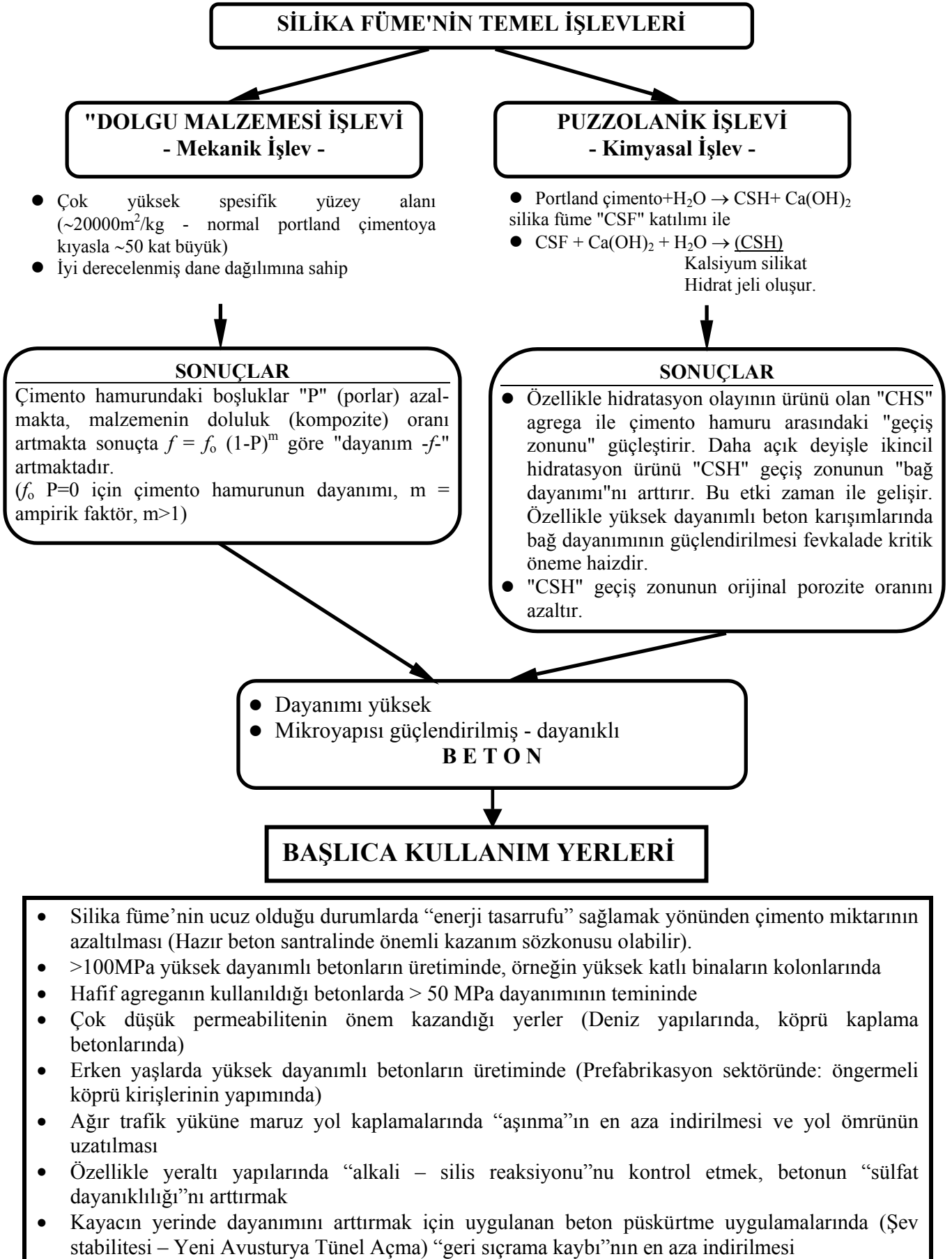
Karışım tasarımında yapılan bellibaşlı kabuller aşağıda belirtilmiştir:

- Çimento hamuru hacmi “V_h”, [çimento + silika füme + toplam su (karışım suyu + süperplastikleştiricinin oluşturduğu su) + hava] ile 28 günlük beton dayanımı ”f₂₈” arasında herhangi bir ilinti yoktur. Yüksek dayanım (≥ 40 MPa) için çimento hamurunun ortalama hacmi V_{h,ort} = 0.325 m³/m³ olarak hesaplanmıştır (Şekil 1a). Bu değer [4] kaynağında 0.350 m³/m³ olarak alınmıştır.
- Çimento hamuru hacmi “V_h” ile beton karışımının çökme büyüklüğü arasında bir ilişki sözkonusu değildir. Daha açık anlatımla, anılan iki temel büyüklük birbirinden bağımsızdır (Şekil 1b). Dolayısıyla tasarımda kabul edilen ortalama çimento hamurunda beton karışımı, arzu edilen çökme değerinde gerçekleştirilebilir.
- Silika fümenin etkinlik faktörü “K_{sf}” değiştirilmiş Bolomey[8] bağıntısından hesaplanmıştır[9]. Anılan faktörün nasıl belirlendiği konusunda ayrıntılı bilgi [10] kaynağından temin edilebilir. Bu çalışmada n = 131 adet deneysel veri için K_{sf} = 1.935 elde edilmiştir.
- 28 günlük basınç dayanımı “f₂₈” ile “α’ = su/toplam bağlayıcı madde” arasındaki ilişki

$$f_{28} = A\alpha'^B \quad (1)$$

modeli [11], [12] ile ifade edilmiştir. n = 131 adet deneysel verinin kullanıldığı regresyon analizinde A = 21.116, B = -0.966, korelasyon katsayısı r = 0.835 (Şekil 2) olarak hesaplanmıştır. Analizin çalışma aralığı ise 20 MPa < f₂₈ ≤ 120 MPa ve 0.19 < α’ ≤ 0.90’dır.

Çizelge 1. Silika Fümenin Temel İşlevleri ve Silika Füme İçeren Betonların Kullanım Yerleri



Burada:

$$\alpha' = \frac{M_{su}}{M_{\zeta} + KM_{sf}} \quad (2)$$

M_{su} = Karışımdaki toplam su miktarı, kg/m^3

M_{ζ} = Çimento miktarı, kg/m^3

M_{sf} = Silika füme miktarı, kg/m^3

K_{sf} = Silika füme etkinlik faktörü

- $n = 131$ adet deneysel verinin kullanıldığı regresyon analizinin sonucunda toplam su miktarı " M_{su} " ile $\alpha' = M_{su}/[M_{\zeta} + K.M_{sf}]$ büyüklükleri arasında

$$M_{su} = 220.328\alpha'^{0.325} \quad (3)$$

bağıntısı çıkartılmıştır. Bu ampirik bağıntı yardımıyla istenen 28 günlük dayanım için karışımda kullanılacak toplam su miktarı (süperplastikleştiriciden gelen su da dahil) belirli bir yakınsaklıkla kestirilebilir. (3). bağıntısının değişimi Şekil 2'de izlenmektedir. Aynı şekil üzerinde [5] kaynağında rapor edilen " f_{28} " dayanım-maksimum toplam su miktarı " M_{su} "nun değişimi bu çalışmada üretilen $M_{su} = f(f_{28})$ bağıntısıyla karşılaştırılmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, karışım tasarımının kritik büyüklüğü olan toplam su miktarı " M_{su} ", birbirinden farklı iki yaklaşımda da uyumlu oldukları farkedilmektedir.

- Çimento miktarı " M_{ζ} "

Çimento hamuru $V_h = 0.33 \text{ m}^3/m^3$ kabulünden (Şekil 1a) hareketle aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$V_h = V_{\zeta} + V_{sf} + V_{su} + V_{hava} \cong 0.33 \text{ m}^3/m^3 \quad (4)$$

$$V_{su} = M_{su}/\gamma_{su} = M_{su} (kg/m^3)/1000 (kg/m^3), \text{ m}^3/m^3 \quad (5)$$

Toplam su miktarı " M_{su} " ise Şekil 2'den istenen f_{28} basınç dayanım değeri için bellidir.

$$V_{hava} \cong 0.02 \text{ m}^3/m^3 \quad (6)$$

$$V_{sf} = M_{sf}/\gamma_{sf} \quad (7)$$

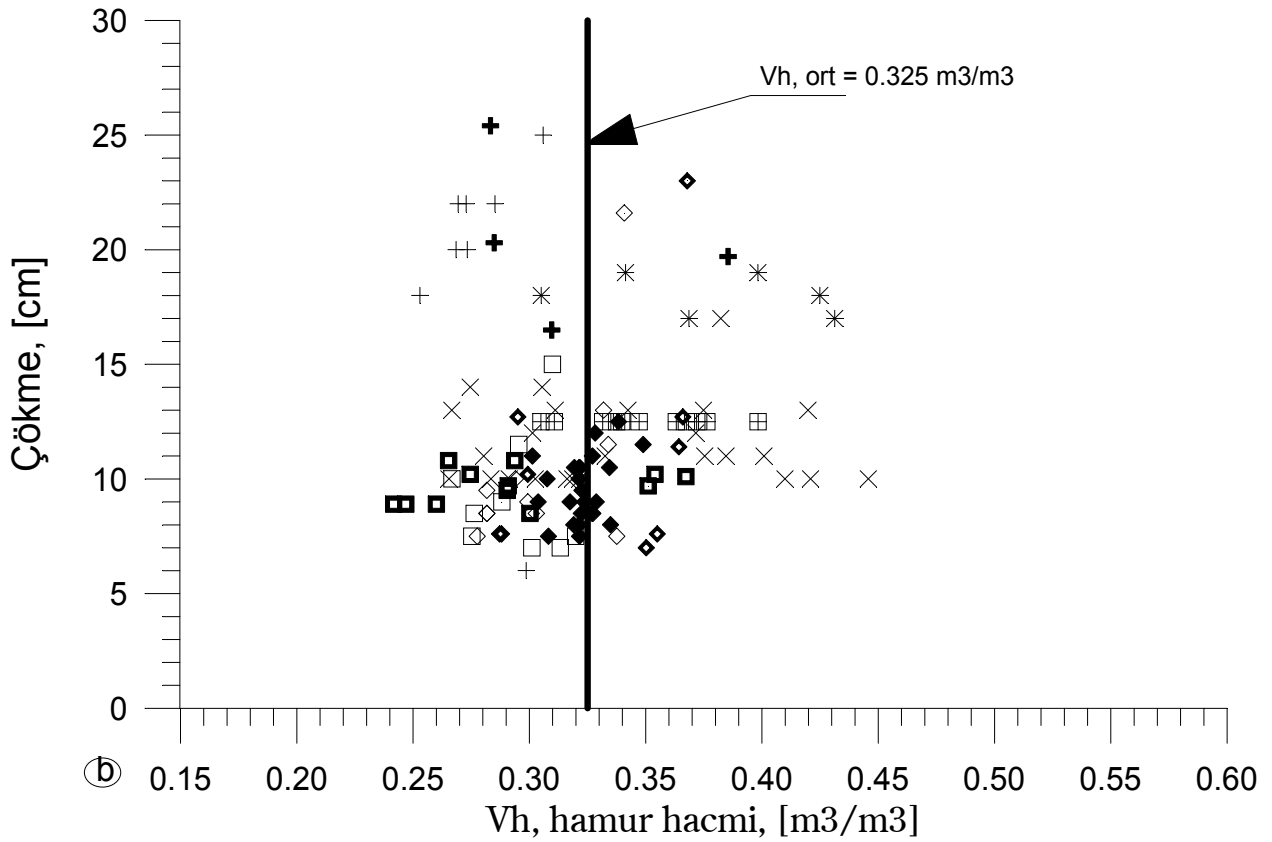
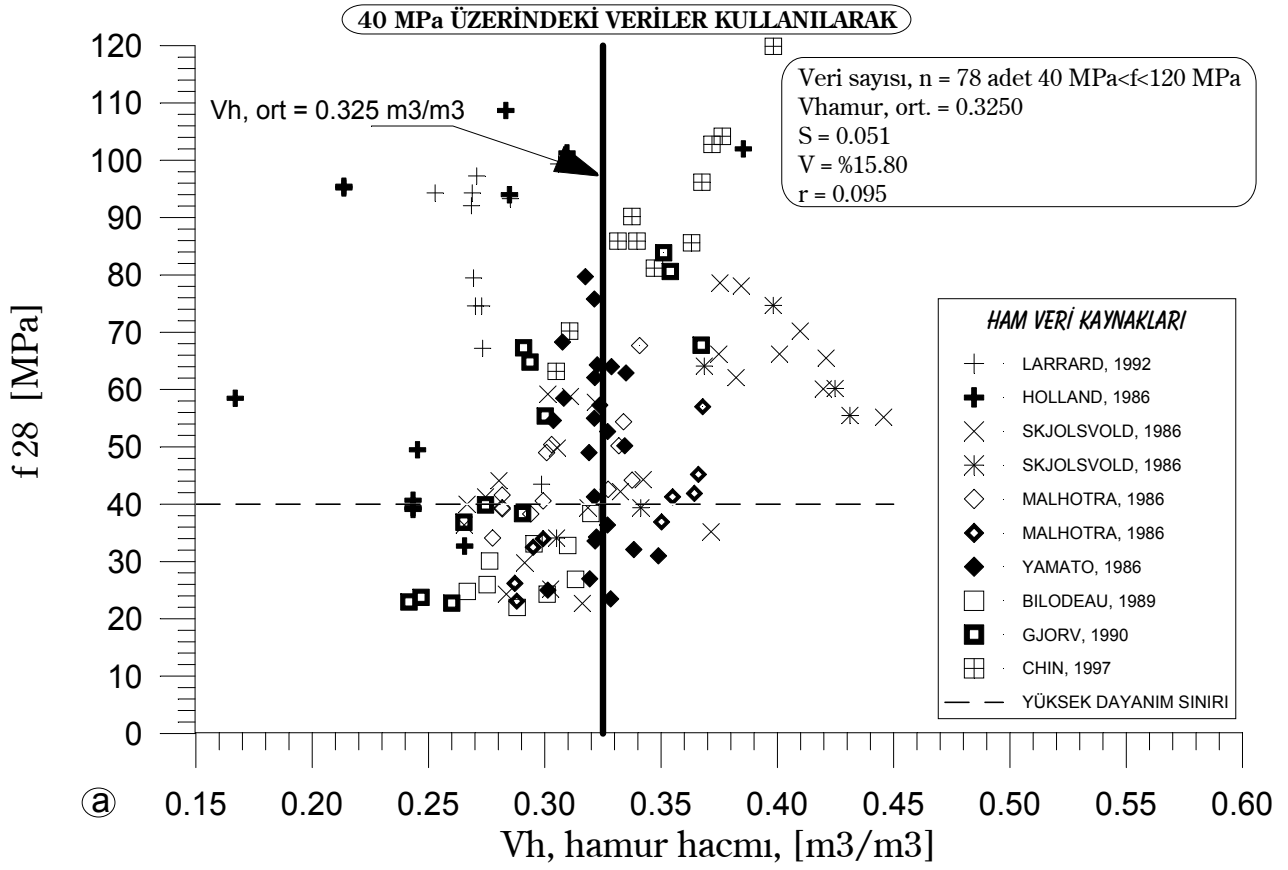
$$V_{\zeta} = \frac{\beta}{1-\beta} M_{\zeta} \frac{1}{\gamma_{\zeta}} \quad (8)$$

$$\beta = M_{sf}/[M_{sf}+M_{\zeta}] \quad (6a)$$

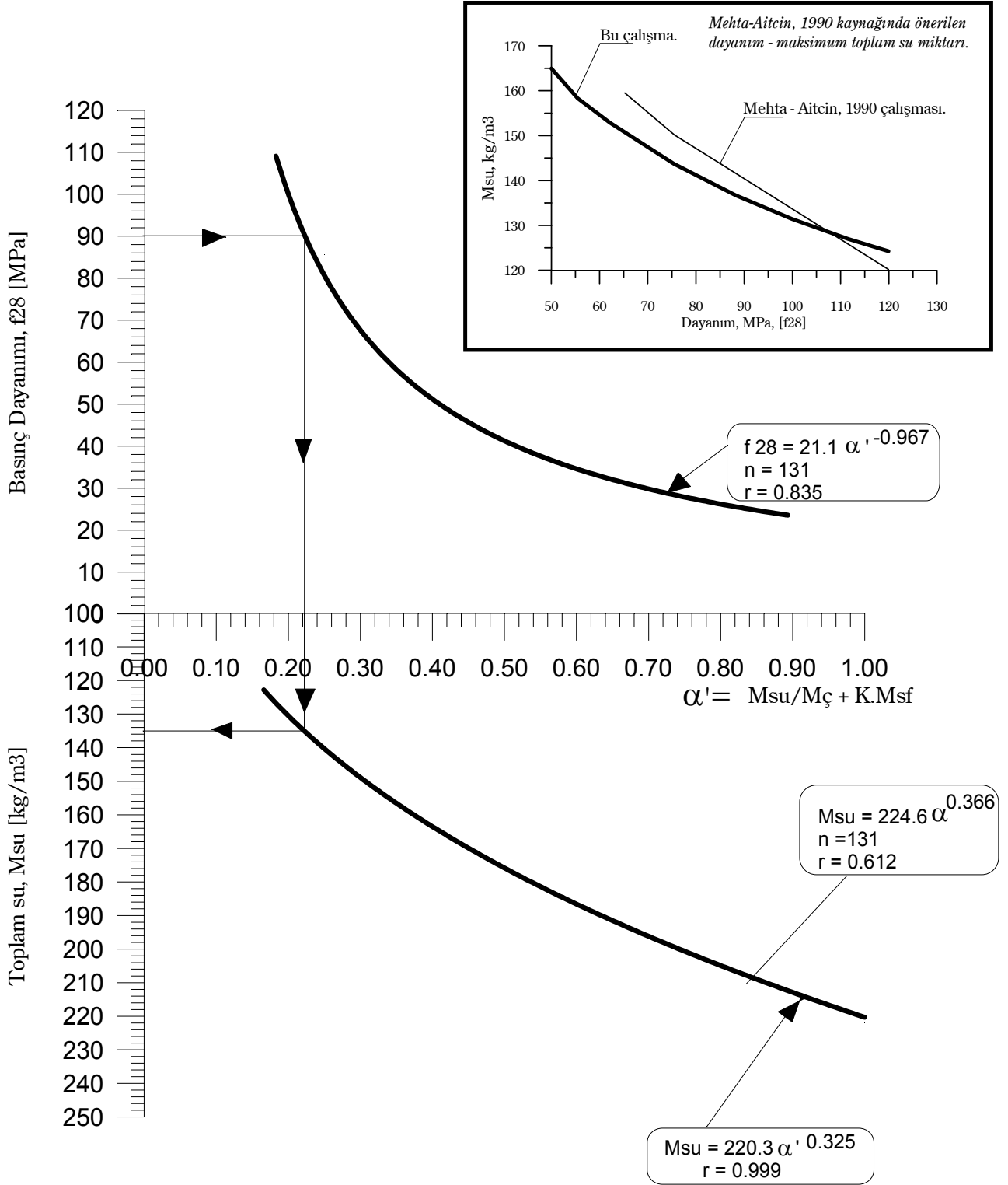
$$V_{\zeta} = M_{\zeta}/\gamma_{\zeta} \quad (9)$$

Yukarıdaki temel ifadeler dikkate alınmak suretiyle temel ifade (4)'den çimento miktarı " M_{ζ} " belirlenebilir:

$$M_{\zeta} = \frac{V_h - [V_{su} + V_{hava}]}{\frac{1}{\hat{\alpha}_{\zeta}} + \frac{1}{1 - \hat{\alpha}_{\zeta} \hat{\alpha}_{sf}}} = \frac{0.33 - 0.02 - V_{su}}{C} = \frac{0.31 - V_{su}}{C}, \text{ kg/m}^3 \quad (10)$$



Şekil 1. Çimento hamuru hacmi ile dayanım ve çökme büyüklüklerinin değişimleri
(S = standard sapma, V = değişkenlik katsayısı, %, r = korelasyon katsayısı)



Şekil 2.n=131 verinin kullanıldığı 28 günlük basınç dayanımı (silindir numune) - α' ve M_{su} değişimi, bu çalışmada çıkarılan toplam M_{su} değerleri ile Mehta-Aitcin , 1990 kaynağında önerilen maksimum su miktarı.

Burada γ_c = çimentonun yoğunluğu, kg/m^3 , β = silika fümenin kullanım oranı, ağırlıkça, γ_{sf} = silika fümenin yoğunluğu, m^3/m^3 , V_{su} = toplam su hacmi m^3/m^3 , V_{hava} = karışımdaki hava hacmi, $V_{hava} = \%2$ (0.02) kabulü yapılmıştır. Eğer beton donmaya açık koşullarda bulunacak ise donma-çözülme koşuluna ve kullanılan maksimum agregada çapına “ d_{mak} ” göre bir değer alır. (Örneğin; $d_{mak} = 2.5$ cm çok yüksek donma çözülme durumunda – hava sürükleyici katkı kullanımı – $V_{hava} = \%6$ (0.06) alınabilir. Aynı koşulda $d_{mak} \cong 1.0$ cm için $V_{hava} = \%7$ (0.07) kabulü yapılabilir.) $C = \gamma_c, \beta, \gamma_{sf}$ 'ye bağlı değer. $\gamma_c = 3150 \text{ kg/m}^3$, $\gamma_{sf} = 2200 \text{ kg/m}^3$ için $\beta = 0.05, 0.10$ ve 0.15 kullanım oranlarına karşılık gelen C değerleri sırasıyla 3.41×10^{-4} , 3.68×10^{-4} ve 3.98×10^{-4} ’dür.

- Toplam agregada (kaba + ince) miktarı “ ΣM_a ” ise

$$\Sigma V_a = 1 - V_{h,ort} = 1 - 0.33 = 0.67 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ (Şekil - 1a)} \quad (11)$$

kullanımından,

$$\Sigma M_a = \gamma_{ort} \cdot \Sigma V_a = [\gamma_k \cdot a + \gamma_i \cdot (1-a)] \cdot 0.67 \quad (12)$$

olarak belirlenmiştir. Burada ΣV_a = toplam agregada hacmi, m^3/m^3 , γ_{ort} = karışım agregasının (ince + iri agregada yoğunluğu, kg/m^3 , γ_k = kaba agreganın yoğunluğu kg/m^3 , γ_i = ince agreganın (0-5 mm) yoğunluğu, kg/m^3 , a = iri agreganın toplam agregada içindeki payı, ağırlıkça. a büyüklüğü karışım agregasının boşluk oranını minimize eden, diğer bir deyişle karışım agregasının birim hacim ağırlığını maksimize eden değerdir. Kuşkusuz bu değer büyük ölçüde karışımda kullanılacak agregaların granülometrik bileşimine bağlıdır. Pratik yaklaşıma göre $a = \%60-55$ alınabilir, ve bu değerlere karşılık gelen karışım agregasının (ince + kaba agregada) boşluk oranı $\%24$ ’dür. Daha açık anlatımla, bu boşluk oranı teorik olarak çimento + silika füme + su ile doldurulacak çimento hamuru hacmini “ V_h ” tanımlar. Karışım tasarımında $V_h = 0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ alındığı dikkate alınırsa fark çimento hamuru “ ΔV_h ” = $0.33 - 0.24 = 0.09 \text{ m}^3/\text{m}^3$ olarak hesaplanabilir. Ortalama $\%2$ hava boşluğu alındığında fazlalık oranı yaklaşık 0.07 ($\%7$) olmakta $470-500 \text{ kg/m}^3$ çimento miktarında ve $\%0.8$ süperplastikleştirici (toplam bağlayıcı madde ağırlığı cinsinden) $100-150$ mm büyüklüğünde bir çökme elde edilebilmektedir.

3.2. Karışım Tasarımı Aşamaları

Karışım tasarımında izlenecek adımlar bir nümerik uygulama içinde ayrıntılı şekilde aşağıda açıklanmıştır.

Montreal’de yüksek katlı bir bina inşaatında kullanılmış bir beton karışımı burada örnek olarak alınmıştır. Ölçülen ortalama 28 günlük beton dayanımı ($\Phi 150 \times 300$ mm) $f_{28} = 90$ MPa’dır.

- $\alpha' = M_{su} / M_c + K M_{sf}$ oranının belirlenmesi

Şekil-2’de hazırlanan tasarım nomogramı yardımıyla, verilen $f_{28} = 90$ MPa dayanıma karşı gelen $\alpha' = 0.22$ olarak belirlenmiştir.

- Toplam su miktarının “ M_{su} ” hesaplanması

Şekil-2’den $\alpha' = 0.22$ için toplam $M_{su} = 135 \text{ kg/m}^3$ olarak elde edilmiştir. (Nomogramın çalıştırma şekli Şekil-2 üzerinde gösterilmiştir.)

- **Çimento miktarının “M_ç” hesaplanması**

f₂₈ dayanım düzeyi için β = 0.05 silika füme kullanım oranı kabul edilirse,

$$M_{\text{ç}} = \frac{0.31 - V_{\text{su}}}{C} \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{su}} = \frac{M_{\text{su}}}{\gamma_{\text{su}}} = \frac{135 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.135 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$M_{\text{ç}} = \frac{0.31 - 0.135}{3.4 \times 10^{-4}} \cong 512 \text{ kg/m}^3$$

$$\beta = 0.05, \gamma_{\text{ç}} = 3150 \text{ kg/m}^3, \gamma_{\text{sf}} = 2200 \text{ kg/m}^3 \text{ için } C = 3.4 \times 10^{-4}$$

- **Silika füme miktarının “M_{sf}” hesaplanması**

Kullanım oranından “β” hareketle

$$\beta = \frac{M_{\text{sf}}}{M_{\text{sf}} + M_{\text{ç}}} = 0.05$$

ve hesaplanan M_ç = 512 kg/m³ değerleri için M_{sf} = 25.6 kg/m³ bulunur.

- **Toplam agrega miktarının “ΣM_a” hesaplanması**

a = %60, γ_k = 2700 kg/m³, γ_i = 2650 kg/m³ değerleri için (12) bağıntısından

ΣM_a = 0.67x[2700x0.60 + 2650x(1-0.6)] ≅ 1796 kg/m³ bulunur.

$$\frac{\Sigma M_a}{M_{\text{ç}}} = \frac{1796}{512} = 3.51$$

- **Toplam agrega miktarı/ Çimento miktarı oranının belirlenmesi**

Hesaplanan değerlere göre anılan oran

olarak bulunmaktadır. Bu büyüklük yardımıyla aşağıdaki ampirik bağıntıdan [21], hesaplanan çimento miktarı “M_ç” tahkik edilebilir:

$$M_{\text{ç}} = \frac{1000}{0.320 + 0.487 \frac{\Sigma M_a}{M_{\text{ç}}}} = \frac{1000}{0.320 + 0.487 \times 3.51} = 493 \text{ kg/m}^3$$

hesaplanır. Görüldüğü üzere çimento miktarındaki sapma % 3.7 düzeyindedir.

- **Taze karışımın yoğunluğu (plastik yoğunluk) “γ_b”**

$$\gamma_b = M_{\text{ç}} + M_{\text{sf}} + M_{\text{su}} + \Sigma M_a = 514 + 25.7 + 135 + 1796 = 2471 \text{ kg/m}^3 \text{ dür.}$$

- Çalışmada elde edilen değerlerin orijinal deneysel değerler ile karşılaştırılması

Bileşenler, kg/m ³	(1) Bu çalışma	(2) Mehta-Aitcin,1990	$\Delta = [1-2/2] \times 100, \%$
Çimento	512	500	+2.4
Silika füme	25.6	30	-14.5
Toplam su-ağırlıkça	135	135	0
Su/Bağlayıcı madde oranı	0.25	0.25	0
Toplam agregası	1796	1800	-0.2
İnce agregası x 0.4	718	700	+2.6
Kaba agregası x 0.6	1078	1100	-2.0
Σ agregası/Çimento-ağırlıkça	3.51	3.6	-2.5
Plastik yoğunluk	2467	2465	0.08
Süperplastikleştirici *	-	15 lt/m ³	-

- Süperplastikleştirici madde miktarının kestirimi

Genelde karışıma konulan süperplastikleştirici dozajı çökme miktarına göre belirlenmelidir. $M_{sp} = \omega \cdot (M_c + M_{sf})$ olup ilk deneme için süperakışkanlaştırıcı kullanım dozajı $\omega = \%1$ kabul edilirse, $M_{sp} = 0.01 \times (512 + 25.6) = 5.38 \text{ kg/m}^3$ kullanılmalıdır. Bu miktar süperplastikleştirici kullanımından gelen su miktarı ise $M_{su,sp} = \omega \cdot (M_c + M_{sf}) \cdot [(1-k)/k] = 0.01 \times (512 + 25.6) \cdot [(1-0.4)/0.4] \cong 8.06 \text{ kg/m}^3$ ’dür. Dikkat edilmelidir ki, karışım suyu ise $M_{su} - M_{su,sp} = 135 - 8.06 \cong 127 \text{ kg/m}^3$ mertebesinde olacaktır. (k solüsyondaki katı madde miktarıdır, genelde $k = 0.4$ ’dür.)

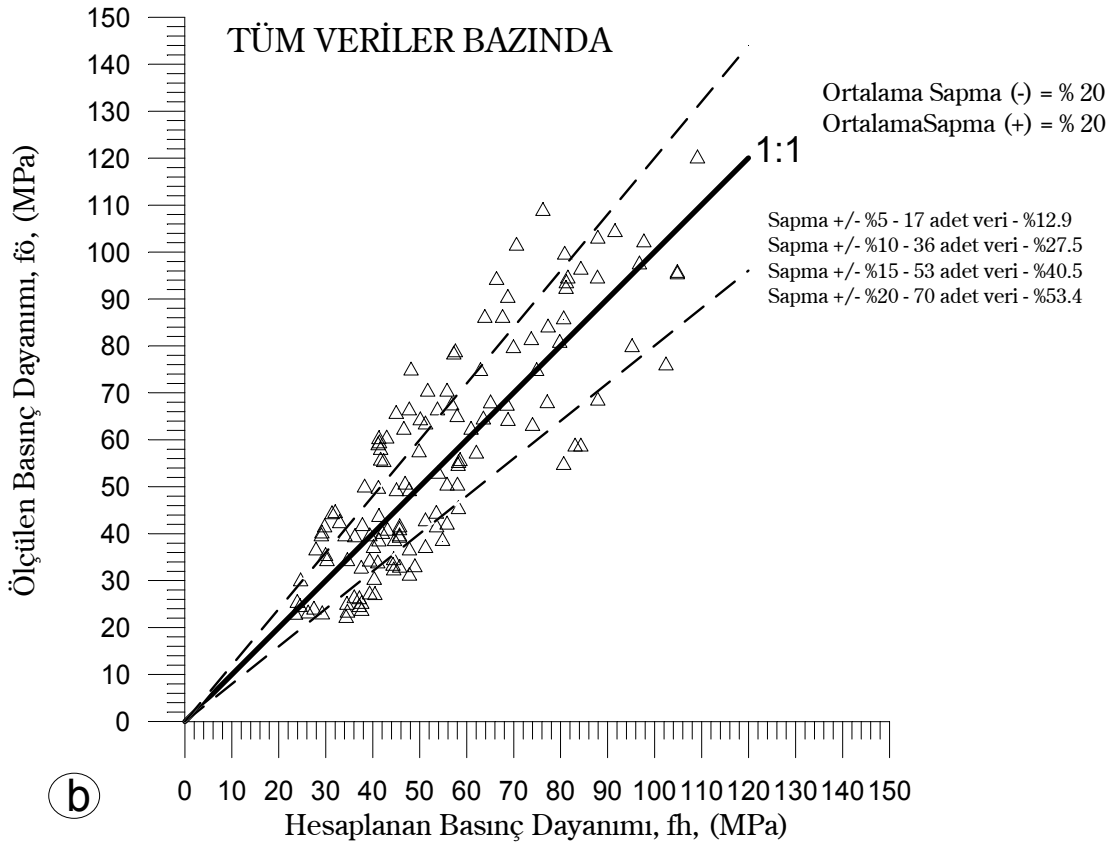
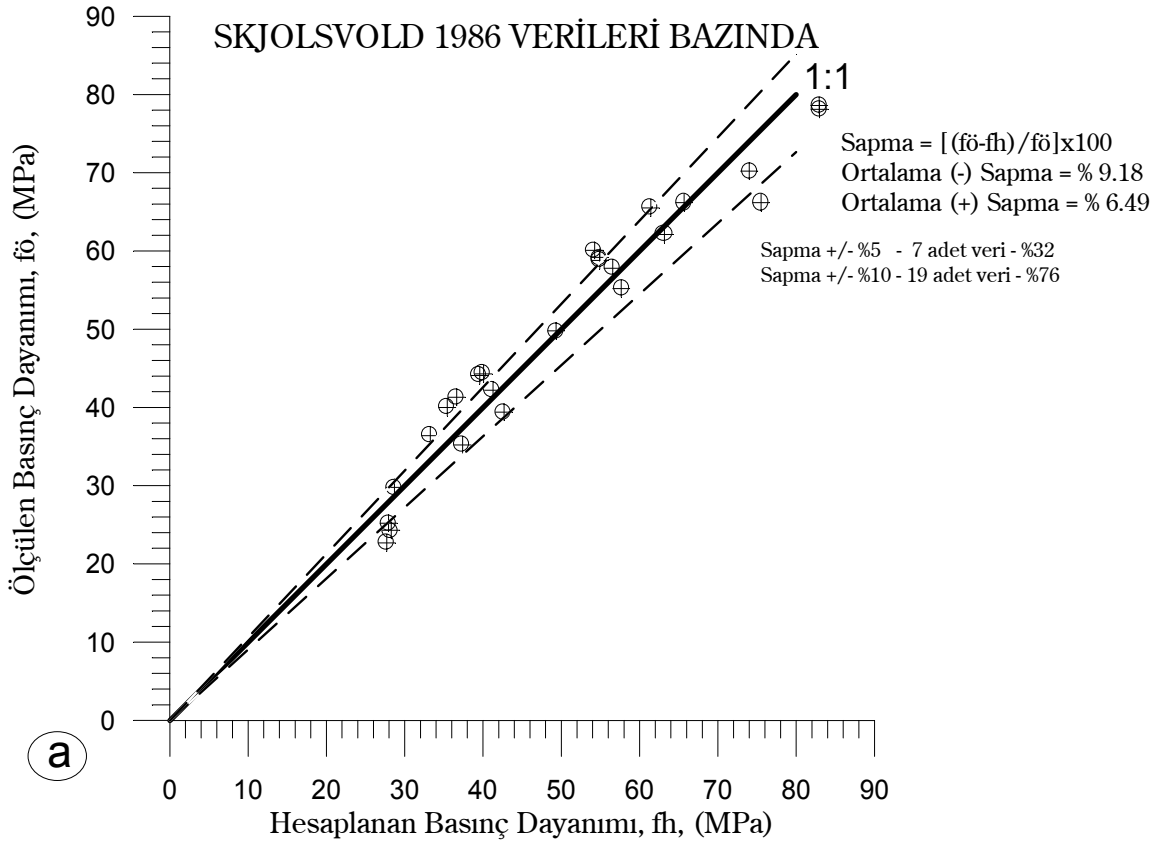
4. KARIŞIM YÖNTEMİNİN KESTİRİM KAPASİTESİNİN TAHKİK EDİLMESİ

4.1. 28 Günlük Basınç Dayanımı Büyüklüğü Açısından Tahkik Edilmesi

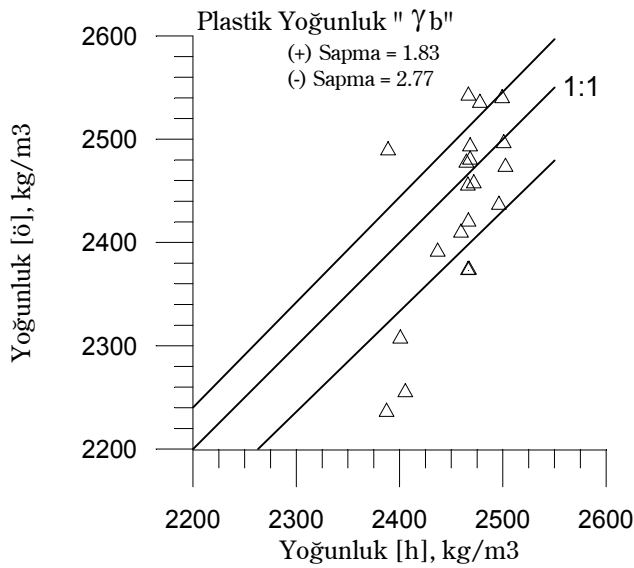
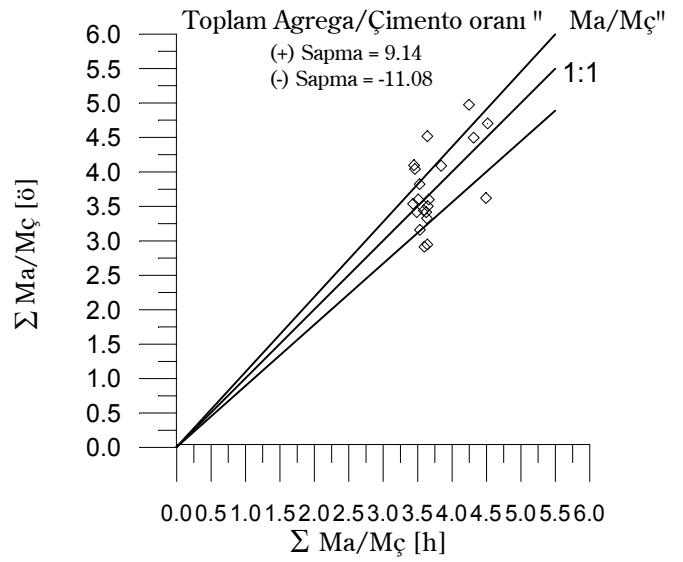
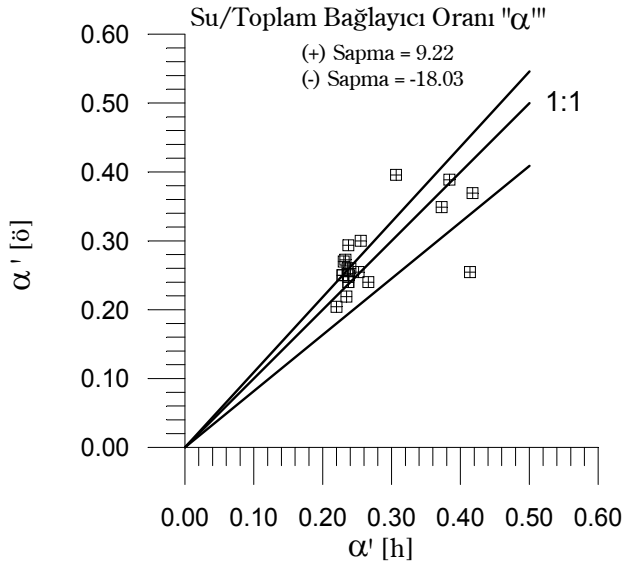
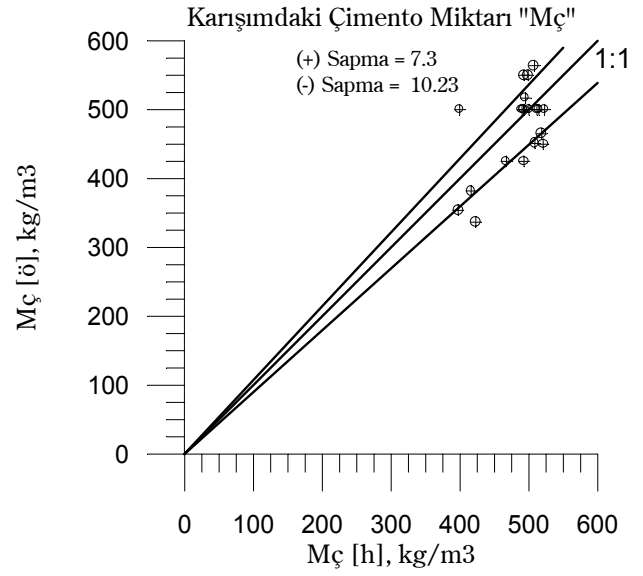
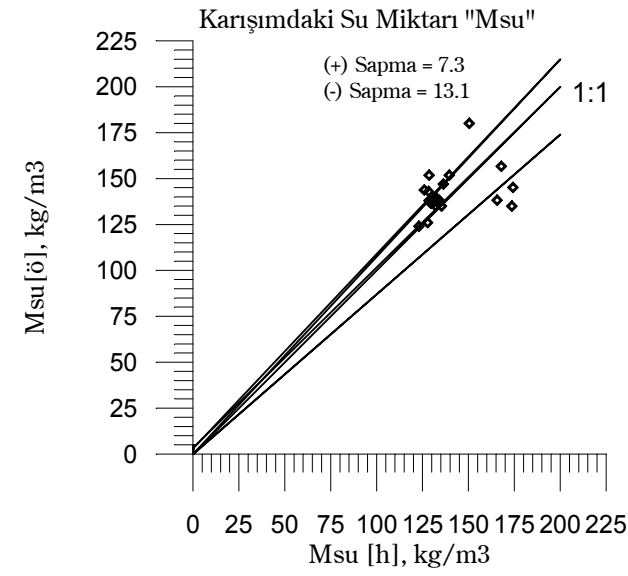
3.1. bölümde çıkartılan basınç dayanımı – su/toplam bağlayıcı madde ilişkisinin (1 Bağıntısı) deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil-3’de : tekniği ile incelenmiştir. İlkın, Şekil 3.a’da Skjolsvold 1986 [15] deneysel verilerine dayandırılan (1) ifadesinin deneysel değerlerden sapmaları gösterilmiştir. Açıkta ki kaynak bazında bakıldığında (1) ifadesinin ortalama sapması %10’un altında kalmıştır. Kısaca, verilen çimento norm dayanımı ve aynı silika füme etkinlik faktöründe (1) ifadesinin kestirim kapasitesi çok yüksektir: $n = 131$ adet deneysel veri kullanımı ile elde edilen dayanım = $f(\alpha')$ (1 bağıntısı) bağıntısının deneysel değerlerden sapmaları ise Şekil 3.b’de belirtilmiştir. Anılan şekil yakından incelendiğinde, ortalama sapmanın $\pm \%20$ düzeyinde kaldığı farkedilmektedir. Toplam datanın kabaca %30’u, $\pm \%10$ sapma bandı içinde kalırken toplam datanın %55’i $\pm \%20$ bandı içinde yer almaktadır. Bu

* Süperplastikleştiriciler, beton endüstrisinde yüksek etkili su azaltıcı plastikleştirici, akışkanlaştırıcı polinaftalin sülfanatlar, polimelamin sülfanatlar gibi değişik isimlerle bilinmektedir. Su/bağlayıcı madde oranını düşük olduğu karışımlarda, süperplastikleştiriciler taneler arasında elektrostatik itme kuvvetleri yaratarak tanelerin dağılmasını sağlamakta böylece, çimento taneciklerinin zincir gibi birbiriyle kenetlenmesi sonucunda hapsolan suyun açığa çıkmasını kolaylaştırarak karışımı “akışkan” hale getirir. (Aitcin, Jolicoeur, MacGregor, 1994) Kullanılacak süperplastikleştiricinin çimentoya “reolojik uygunluğu”nun olup olmadığı karışım tasarımı aşamasında kesinlikle “Marsh Konisi Deneyi” ile tahkik edilmelidir. Çimento süperplastikleştirici karışımlarının performansına etki eden belli başlı faktörler şunlardır: şerbetin su/çimento oranı, çimentonun inceliği, C₃A miktarı, sülfat konsantrasyonu ve sülfatların çözünme oranı. Süperplastikleştirici solüsyondan gelen su miktarı bağıntısından belirlenebilir.

$$M_{su,sp} = \omega \cdot (M_c + M_{sf}) \cdot \left(\frac{1-k}{k} \right) \text{ Lt/m}^3$$



Şekil 3. Kaynak [14] (Skjolsvold, 1986) ve tüm veriler ($n = 131$) bazında ölçülen ve hesaplanan basınç dayanımlarının 1:1 tekniği ile değerlendirilmesi.



$$\Delta = \frac{\ddot{O} - H}{\ddot{O}} \times 100, \%$$

Δ = Sapma Miktarı, %

Ö = Ölçülen büyüklük

H = Hesaplanan büyüklük

Şekil 4. Regresyon Analizine Girmemiş (N = 20) Deneysel Karışım Verilerinin Bu Çalışmadaki Yöntemle Hesaplanan Değerlerin 1:1 Tekniğiyle Karşılaştırılması.

ölçüde bir “sapma”, birbirinden farklı malzemelerin kullanıldığı (özellikle çimento ve silika füme) dikkate alındığında, kabul edilebilir düzeyde olduğu, ileri sürülebilir. Ayrıca, $f_{28} \geq 80-100$ MPa dayanım düzeylerinde yukarıda belirtilen faktörlere ek olarak dayanımı denetleyen bir diğer etkili faktör ise iri agreganın “tek eksenli basınç dayanımı”dır. Anılan büyüklüğün artması durumunda 28 günlük beton dayanımı da aynı çimento norm dayanımı, α' ve silika füme kimyasal bileşimi -inceliği de- belirgin ölçüde artmaktadır [21]. Kısaca beton gibi heterojen bir malzemenin verilen α' oranı için “ f_{28} ” büyüklüğünün (1) ifadesinden $\pm \%20$ sapma ile kestirilmesi, ilk mühendislik yaklaşımlarında rahatlıkla kabul edilebilir.

4.2. Karışım Bileşenleri (Çimento, Su, Silika Füme, Agreg) Açısından Karışım Tasarımı Yönteminin Kestirim Kapasitesinin Tahkik Edilmesi

Yöntem, verilen “ f_{28} ” dayanımına karşı gelen karışım bileşenleri bazında regresyon analizinde kullanılmamış $n = 20$ adet (değişik kaynaklardan) deneysel veri için tahkik edilmiştir. Karşılaştırmada şu temel karışım büyüklükleri esas alınmıştır:

Toplam su miktarı “ M_{su} ”, çimento miktarı “ M_c ”, su/toplam bağlayıcı madde oranı “ α ” – ağırlıkça-, toplam agrega/çimento oranı “ M_a/M_c ”, ve plastik (taze) yoğunluk “ γ_b ”. 1:1 tekniği ile yapılan karşılaştırmanın ayrıntılı sonuçları Şekil 4’de görülmektedir. Her bir bileşen büyüklüğünde hesaplanan ortalama \pm sapma miktarları anılan şekiller üzerinde keza gösterilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, hesaplanan sapma miktarları yaklaşık %15’in altında kalmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma çerçevesinde incelenen konulardan elde edilen bellibaşlı sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- Yüksek dayanımlı betonların karışım tasarımında verilen dayanım düzeyi için toplam su miktarının “ M_{su} ” analitik şekilde belirlenmesi önemli bir konudur. Bu amaca yönelik olarak 28 günlük basınç dayanımı $f_{28} = f(\alpha')$ “su/toplam su miktarı” –ağırlıkça- ($20 \text{ MPa} \leq f_b \leq 120 \text{ MPa}$; $0.19 \leq \alpha' \leq 0.90$; $n = 131$ veri sayısı) ve $f_{28} = f(M_{su})$ temel bağıntılar ($120 \text{ kg/m}^3 \leq M_{su} \leq 220 \text{ kg/m}^3$) $n = 131$ adet çeşitli kaynaklarda rapor edilen ham deneysel verinin kullanıldığı regresyon analizi yardımıyla elde edilmiştir (Şekil 2). Bu çalışmada çıkarılan $f_{28} = f(M_{su})$ ilişkisinin tanımladığı “ M_{su} ” değerlerinin Mehta-Aitcin, 1990 kaynağında önerilen maksimum “ M_{su} ” değerleriyle iyi uyum içinde oldukları görülmektedir.
- $n = 131$ deneysel veri için çimento hamuru hacmi (çimento + silika füme + su + hava içeriği) “ V_h ” ile 28 günlük basınç dayanım büyüklüğü “ f_{28} ” arasında ilinti (Şekil 1a) araştırıldığında anılan büyüklüğün basınç dayanımından bağımsız olduğu görülmüştür. Ortalama çimento hamuru hacmi ($f_{28} \geq 40 \text{ MPa}$ için) yaklaşık $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Bu büyüklükten ($V_h = 0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$) hareketle kabul edilen silika füme kullanım oranı ve hava içeriği, hesaplanan toplam su miktarı “ M_{su} ”ya karşı gelen hacmi veya çimento miktarı “ M_c ” sayısal olarak belirlenebilmektedir. Keza $V_h = 0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ kabulü sonucunda karışımda kullanılacak toplam agrega hacmi $\Sigma V_a = 0.67 \text{ m}^3/\text{m}^3$ olarak elde edilmektedir. Pratikte üretilen beton karışımları yakından incelendiğinde kullanılan toplam agreganın oldukça küçük sınırlar (değişkenlik katsayısı %9) içinde değiştiği ortaya çıkmaktadır.
- Yukarıda açıklanan sonuçların pratik mühendislik uygulaması bir karışım tasarımı örneği yapılarak gösterilmiştir (3.2. bölüm). Silika füme içeren beton karışımları için geliştirilen karışım tasarımı regresyon analizinde kullanılmamış $n = 20$ adet deneysel veri için karışım

bileşenleri (toplam su miktarı, çimento miktarı, su/bağlayıcı madde oranı, toplam agrega/çimento oranı, plastik yoğunluk) bazında kestirim kapasitesi tahkik edilmiştir (Şekil 4). \pm %15 ortalama sapma içeren yöntem, silika fümeli betonların ilk deneme karışımlarının tasarımında başarı ile uygulanabilir. Yöntemin en belirgin yararı mühendise istenen yüksek dayanım düzeyini \geq 40 MPa gerçekleştiren ön karışımlarının sayısını azaltması, sonuçta zaman ve para ekonomisi sağlamasıdır.

• Karışım tasarımında silika fümenin kimyasal bileşimi (SiO_2 , NaO_2 , KO_2 , C, ateş zayıyatı), inceliği ve agreganın basınç dayanımı özenle değerlendirilmesi gereken diğer önemli parametrelerdir. İlerde geliştirilecek daha kapsamlı karışım modellerinde anılan parametrelerin etkileri analitik şekilde dikkate alınmalıdır.

TEŞEKKÜR

Yazar, Türk mühendislik literatüründe yüksek beton dayanımı projesini ilk defa ülkemizde (1989) başlatan Yapı Merkezi A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı, Sayın Dr. Müh. Ersin ARIOĞLU'na katkılarından dolayı teşekkür eder.

Ayrıca, bildirim yazımında emeği geçen Dr. Müh. Orkun AKKOL'a (Yapı Merkezi AR-GE Bölümü) açık teşekkürlerini ifade eder. Çalışmada ileri sürülen sonuçlar sadece yazara aittir.

KAYNAKÇA

- [1] Abrams, D.A., "Design of Concrete Mixtures", Bulletin-1 Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Dec. 1918.
- [2] Murdock, L.J., Brook, K.M., Dewar, J.D., Concrete, Materials and Practice, Sixth Edition, Edward Arnold, London, 1991.
- [3] ACI Committee 211: "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1.91)", ACI, Detroit, 1991, pp 38.
- [4] Mehta, P.K., Aitcin, P.C., "Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High-Strength Concrete", SP 121-14 High Strength Concrete, 2. International Symposium, 1990, pp.266-286.
- [5] Domone, L.J., Soutsos, M.N., "An approach to the Proportioning of High-Strength Concrete Mixture", Concrete International, Vol. 16, No. 10, October 1994, pp. 26-31.
- [6] Neville, A.M., Properties of Concrete, Fourth Edition, 1995, Longman Group Limited, England.
- [7] Mehta, P.K., Aitcin, P.C., "Principles Underlying Production of High Performance Concrete", Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, Vol 12, No.2, Winter 1990, pp.70-78.
- [8] Bolomey, J., "Durcissement des Mortiers et Betons" Bulletin Tech. Suisse Romande No 16, 22 and 24, 1927.
- [9] 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.
- [10] Arioğlu, Ergin, Akkol, O., "Silika Füme İçeren Betonlar İçin İstatistiksel Dayanım Bağlılıkları", Hazır Beton Birliği Dergisi, Eylül 1997.
- [11] Arioğlu, Ergin, "Maden Galerilerinin Takviyesi İçin İnşa Edilen Ramble Duvarlarının İmalinde Kullanılan Anhidrid Karışımlarının Teknik Özellikleri", İTÜ Dergisi, Cilt 33, Yıl 33 Sayı 5, 1975.
- [12] Arioğlu, Ergin, Yüksel, A., "Mix Design of Shotcrete For Underground Structural Support", Journal of Mines, Metals and Fuels, January-February 1986, pp.84-87.

- [13] 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.
- [14] Holland, T.C., Krysa, A., Luther, M.D., Liu, T.C., "Use of Silica-Fume Concrete to Repair Abrasion-Erosion Damage in the Kinzua Dam Stilling Basin", ACI SP-91, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 2. Int. Conf. Madrid, 1986, pp.841-863.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Yamato, T., Emoto, Y., 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.
- [18] 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.
- [19] Gjørsv, O.E., Monteiro, P.J.M., Mehta, P.K., "Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond" ACI Materials Journal V87 No. 6, November-December 1990, pp. 573-580.
- [20] Chin, M.S., Mansur, M.A., Wee, T.H., "Effects of Shape, Size, and Casting Direction of Specimens on Stress-Strain Curves of High-Strength Concrete", ACI Materials Journal, Technical Paper, May-June 1997, pp. 209-219.
- [21] Arıoğlu, Ergin, Köylüoğlu, Ö.S., "Yüksek Dayanımlı Betonların-Endüstriyel Ölçekte-Karışım Tasarım İlkeleri, Yöntemleri ve Örnekleri" Yapı Merkezi – AR/GE Bölümü, Yayın No: YM/ARGE/96-14 Ağustos 1996, s. 1-86.
- [22] Aitcin P.C., Laplante, P., Bedard, C., "Development and Experimental Use of a 90 MPa Concrete" ACI SP-87, ACI, Detroit, 1985, pp.51-70.
- [23] Imam, M., Vandewalle, L., Mortelmans, F., "Are Current Concrete Strength Tests Suitable for High Strength Concrete?", Materials and Structures, 1995, V. 28, pp. 384-391.
- [24] Read, P., Carette, G., Malhotra, V.M., "Strength Development Characteristics of High Strength Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials", Proceedings, Symposium on Utilisation of High Strength Concrete, Berkeley, CA, May 1990.
- [25] Lessard, M., Chaallal, O., Aitcin, P.C., "Testing High-Strength Concrete Compressive Strength", ACI Materials Journal, July-August 1993.
- [26] Torii, K., Kawamura, M., "Mechanical and Durability-Related Properties of High Strength Concrete Containing Silica Fume", High Performance Concrete, SP-149, ACI, 1994.
- [27] Marusin, S.L., "Chloride Ion Penetration in Conventional Concrete Containing Condensed Silica Fume", ACI SP-91, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 2. Int. Conf. Madrid, 1986, pp.1119-1133.
- [28] Aitcin, P.C., Shirlaw, M., Fines, E., "High Performance of Concrete: Removing the Myths", in Concrecere, Newsletter of the High-Performance Concrete Network of Centres of Excellence (Canada), 6 March 1992.