

ÇEŞİTLİ BASINÇ DAYANIM FORMÜLLERİNİN YÜKSEKAKIŞKANLAŞTIRICI VE MİNERAL KATKI İÇEREN BETONLARA UYGULANABİLİRLİĞİ

Mustafa TOKYAY
O.D.T.Ü.
Ankara

ÖZET

Betonun basınç dayanımını bileşimine bağlı olarak ifade edebilmek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından bazı formüller geliştirilmiştir.

Değişik miktarlarda (1) melamin formaldehid esaslı yüksekakışkanlaştırıcı, (2) yüksek kireçli uçucu kül, (3) düşük kireçli uçucu kül ve (4) silis dumanı içeren yüksek dayanımlı betonlara, Bolomey, Graf ve Feret formüllerinin uygulanabilirliği araştırılmış, bu formüllere gerekli değişiklikler önerilmiş ve katsayıları belirlenmiştir.

1. GİRİŞ

1.1. GENEL

Betonun basınç dayanımının kullanılan beton bileşenlerinin özellikleri, karışım oranları, bakım yöntemleri, v.b. bilgiler kullanılarak önceden tahmini için bir çok araştırmacı çeşitli formüller önermişlerdir (1). Bu formüllerin tümünün orijinal halleri betonun yalnızca su, ince ve kaba agrega ve çimentodan oluştuğu durumlar için çıkarılmıştır. Oysa, günümüzde betonda kimyasal ve mineral katkı kullanımı son derece yaygınlaşmıştır. Artık, üretilen betonların önemli bir kısmında yukarıda belirtilen üç bileşenin dışında çeşitli katkılar kullanılmaktadır.

1.2. AMAÇ VE KAPSAM

Yüksek dayanımlı betonlar üzerinde yapılan geniş kapsamlı bir çalışmanın (2) deneysel verileri kullanılarak, yüksekakışkanlaştırıcı ve mineral katkı içeren betonlar için bazı basınç dayanım tahmin formüllerinin uygulanabilirliğinin araştırılması bu çalışmanın amacını oluşturmuştur. Bolomey, Graf ve Feret tarafından önerilen formüllerin orijinal halleri başlangıç olarak alınarak ve deneysel sonuçların istatistiksel yöntemlerle regresyon analizleri yapılmak suretiyle bu formüllere bazı değişiklikler önerilmiştir.

Bu amaçla, değişik miktarlarda (1) melamin formaldehid esaslı, etken madde konsantrasyonu farklı iki yüksekakışkanlaştırıcı, (2) yüksek kireçli bir uçucu kül, (3) düşük

kireçli bir uçucu kül ve (4) silis dumanı içeren yüksek dayanımlı betonlardan elde edilmiş olan dayanım deney sonuçları kullanılmıştır.

2. DAYANIM FORMÜLLERİYLE İLGİLİ BİLGİLER

Dayanım tahmin formüllerinin hemen hepsinde su-çimento (S/Ç) oranı değişken olarak ele alınmıştır. Uygulanabilirlikleri için genel sınırlamalar

- betonun kompasitesinin yüksek olması,
 - kıvamının kuru olmaması ve
 - çimento miktarının 250-400 kg/m³ beton olması
- olarak özetlenebilir (1).

2.1. BOLOMEY FORMÜLÜ

Bolomey formülü aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

$$\sigma = K \left(\frac{C}{S} - 0.5 \right)$$

Bu formüldeki K katsayısı

- Çimento dayanımı,
- Agrega granülometrisi,
- Agrega geometrisi,
- Sıkıştırma yöntemi,
- Ortam koşulları ve
- Numune boyut ve geometrisine bağlıdır.

Çimento miktarı 300-350 kg/m³ arasında değişen 28 gün yaşındaki betonlar üzerinde yapılan deneylerde K katsayısının 16.3-23.4 MPa arasında değiştiği saptanmıştır (1).

2.2. GRAF FORMÜLÜ

Graf formülü aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

$$\sigma = \frac{r_c}{b} \left(\frac{C}{S} \right)^2$$

Bu formüldeki r_c çimentonun dayanımı, b ise bir katsayıdır. b katsayısının çok geniş bir aralıkta (4.3-12.4) arasında değişmekte olduğu daha önce yapılmış olan deneylerle saptanmıştır (1).

2.3. FERET FORMÜLÜ

Feret formülünün değişik yazılış biçimleri bulunmakla birlikte kullanım kolaylığı açısından aşağıdaki hali verilmiştir:

$$\sigma = K \left(\frac{1}{1 + \frac{S}{C} \delta_c} \right)^2$$

Bu formüldeki K katsayısı da Bolomey formülündeki katsayının etkilendiği faktörlerin etkisi altındadır. 28 günlük basınç dayanımı 32.5 MPa olan çimentolar kullanıldığı takdirde, K'nın kırmataş agregası kullanılarak üretilen betonlar için ortalama 223 MPa, çakıl kullanılarak üretilen betonlar içinse ortalama 148 MPa olduğu daha önce yapılan deneysel çalışmalarla saptanmıştır (1).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. KULLANILAN MALZEMELER

Araştırmanın deneysel kısmında KÇ 32.5 çimento, kireç taşı kırma kaba agregası, dere kumu, melamin formaldehid esaslı yüksekakışkanlaştırıcı, Soma-B Termik Santrali'nden temin edilen yüksek kireçli uçucu kül (SB), Tunçbilek Termik Santrali'nden temin edilen düşük kireçli uçucu kül (TB) ve Etibank Antalya Elektrometalurji Tesisleri'nden temin edilen silis dumanı (MS) kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 1-7'de, sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Özellik	Ortalama Değer	TS 10156 Sınırları
7-G Bas. Day. (MPa)	21.43	21.0
28-G Bas. Day. (MPa)	31.88	32.5
İlk priz (dak.)	251.67	min. 60
Son priz (dak.)	438.67	maks. 600
Blaine (m ² /kg)	312.33	min. 2800
Öz. Ağ. (kg/m ³)	2955	

Çizelge 2. Kullanılan Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu

Oksit	Ortalama Değer	TS 10156 Sınırları
CaO	50.05	-
SiO ₂	27.29	-
Al ₂ O ₃	8.59	-
Fe ₂ O ₃	3.70	-
MgO	1.36	5
SO ₃	1.91	3.5
K.K.	1.33	4
Ç.K.	5.62	-

Çizelge 3. Kullanılan Kumun Özellikleri

Özellik	Ortalama Değer	TS 706 Sınırları
Kuru Öz. Ağ. (kg/m ³)	2450	-
DYK Öz. Ağ. (kg/m ³)	2540	-
Su Emme (%)	3.55	-
Dona Dayanıklılık (%)	4.08	maks. 12.00

Çizelge 4. Kullanılan Kırmataşın Özellikleri

Özellik	Ortalama Değer	TS 706 Sınırları
Kuru Öz. Ağ. (kg/m ³)	2676	-
DYK Öz. Ağ. (kg/m ³)	2697	-
Su Emme (%)	0.29	-
Dona Dayanıklılık (%)	1.08	Maks. 10.00
Los Angeles Ağ. Kaybı (%)	24.4	Maks. 50.0

Çizelge 5. Kullanılan Yüksekakışkanlaştırıcı Katkının Özellikleri

Görünüm	Şeffaf sıvı
Aktif Madde Oranı (%)	20 ve 33
Çözücü	Su
Yoğunluk (g/cm ³)	1.1-1.2
pH	7-9

Çizelge 6. Kullanılan Mineral Katkıların Kimyasal Kompozisyonları

Oksit (%)	SB	TB	MS
SiO ₂	39.9	56.0	85.75
Al ₂ O ₃	23.2	23.4	2.51
Fe ₂ O ₃	4.1	10.5	2.11
S+A+F	67.2	89.9	90.37
CaO	24.5	2.1	1.53
MgO	1.9	3.3	3.67
SO ₃	4.8	0.5	-
K ₂ O	0.4	0.3	-
Na ₂ O	0.1	0.6	-
TiO ₂	0.6		-
K.K.	0.4	1.1	-
C			0.84
S			0.34
Cr ₂ O ₃			0.89

Çizelge 7. Kullanılan Mineral Katkıların Fiziksel Özellikleri

Özellik	SB	TB	MS
Blaine (m ² /kg)	321	337	uygulanmadı
Öz. Ağ. (kg/m ³)	2420	1990	2280
P.A.İ. (%)	94.5	72.5	97.0

3.2. BETON KARIŞIM ORANLARI

Yalnızca yüksekakışkanlaştırıcı katkı içeren betonlarda TS 706'da D_{maks}=16mm için verilen tane dağılım eğrisi sınırlarına uygun bir karışım üç boy agregası (0/3mm, 3/7mm,

7/15mm) kullanılarak elde edilmiştir. Başlangıçta, her hangi bir katkı kullanılmadan 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı 40 MPa olacak şekilde üç değişik karışım (çökme değerleri 1-3, 5-7 ve 10-12 cm) için hesaplar yapılmıştır. Daha sonra, katkı üreticisinin öngördüğü minimum, maksimum ve bunlar arasında iki değer (çimento ağırlığının %1, 3, 5 ve 7'si) olmak üzere dört ayrı dozajda yüksekakışkanlaştırıcı kullanmak suretiyle katkılı numuneler üretilmiştir. Bu numunelerde de yukarıda belirtilen çökme değerleri sabit tutulmuş buna karşılık karışımlardaki su miktarı ayarlanmıştır.

Mineral katkılı betonlarda, önce çimentonun ağırlıkça %7'si oranında yüksekakışkanlaştırıcı kullanılarak 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı 60 MPa olacak şekilde mineral katkı içermeyen bir kontrol betonu karışım hesabı yapılmıştır. Daha sonra her üç mineral katkı çimentonun ağırlıkça %10 ve 20'si oranlarında üç değişik şekilde karışıma ilave edilmiştir:

- (a) Doğrudan çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere,
- (b) Doğrudan ince agreganın bir kısmı yerine ve
- (c) Toplam agreganın bir kısmı yerine.

3.3. DENEY SONUÇLARI

Yukarıda belirtilmiş olan betonlardan hazırlanmış standart silindir numuneler 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanım deneylerine tabi tutulmuştur. Her yaş için her bir seri betondan altı adet numune test edilmiştir. Tüm numuneler deney gününe kadar standart rutubetli bakım koşullarında tutulmuştur. Basınç dayanım deney sonuçları yüksekakışkanlaştırıcı ve mineral katkı içeren betonlar için, sırasıyla, Çizelge 8 ve 9'da verilmiştir.

Çizelge 8. Yüksekakışkanlaştırıcı İçeren Betonların Basınç Dayanımları

net S/Ç	7-G Dayanım (MPa)	28-G Dayanım (MPa)
0.368	27.3	40.0
0.328	30.3	43.4
0.240	35.0	50.4
0.238	38.1	55.3
0.376	32.1	45.9
0.304	41.1	53.1
0.237	49.6	63.2
0.210	55.7	63.8
0.370	26.7	39.6
0.327	28.9	42.3
0.253	33.9	49.1
0.192	37.6	62.2
0.372	29.7	40.7
0.281	46.1	56.9
0.220	52.3	63.5
0.191	57.9	69.9
0.383	24.9	37.8
0.333	29.2	41.8
0.276	33.5	47.4
0.218	40.5	56.5
0.387	28.2	39.1
0.269	49.8	59.2
0.222	53.7	65.9
0.202	54.4	69.4

Çizelge 9. Mineral Katkı İçeren Betonların Basınç Dayanımları

S/Ç (net)	S/(Ç+MK) (net)	7-G Dayanım (MPa)	28-G Dayanım (MPa)
SB İçeren Betonlar			
0.300	0.269	46.1	64.1
0.262	0.238	45.8	62.3
0.265	0.241	45.7	62.4
0.351	0.277	32.4	55.1
0.262	0.218	42.1	61.2
0.273	0.227	40.9	60.8
TB İçeren Betonlar			
0.283	0.253	39.7	61.2
0.273	0.248	45.5	59.1
0.289	0.263	37.1	53.3
0.385	0.300	31.1	45.8
0.280	0.233	43.7	51.4
0.295	0.245	38.4	48.3
MS İçeren Betonlar			
0.269	0.241	42.4	60.7
0.222	0.202	46.7	63.5
0.229	0.208	51.4	70.1
0.268	0.211	38.2	65.5
0.181	0.152	49.2	70.7
0.189	0.158	45.0	65.3

4. DAYANIM FORMÜLLERİNDE KATSAYILARIN BULUNMASI

Bolomey, Graf ve Feret formüllerinin en genel halleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılmış

$$\sigma = K \left(\frac{\bar{C}}{\bar{S}} - 0.5 \right)^n$$

$$\sigma = \frac{r_c}{b} \left(\frac{\bar{C}}{\bar{S}} \right)^n$$

$$\sigma = K \left(\frac{1}{1 + \frac{\bar{S}}{\bar{C}} \delta_c} \right)^n$$

daha sonra bu eşitliklerin her iki tarafının logaritmaları alınarak doğru denklemleri elde edilmiş deneysel sonuçların bu denklemlerde yerine konulması ve regresyon analizleri sonucunda eğim ve ordinatlardan katsayılar hesaplanmıştır.

Elde edilen formüller bu halleriyle yeterli hassasiyeti sağlamamıştır. Yüksekakışkanlaştırıcı dozajı ile dayanım arasında daha önce (3) bulunmuş olan logaritmik bağıntı göz önünde bulundurularak formüllere bu etkiyi sağlayan bir terim ilave edilmiştir. Öte yandan, mineral katkı içeren betonlarda (S/Ç) yerine mineral katkıların etkisini de dikkate alan daha uygun bir terim kullanılmıştır.

Sonuçta Bolomey, Graf ve Feret formüllerinden yola çıkarak elde edilen yeni formüller aşağıda verilmiştir.

4.1. BOLOMEY FORMÜLÜ İÇİN ÖNERİLEN DEĞİŞİKLİK

4.1.1. Yalnız Yüksekakışkanlaştırıcı İçeren Betonlar

Yalnızca yüksekakışkanlaştırıcı içeren betonlar için Bolomey formülündeki değişiklik önerisi

$$\sigma = Ke^{-\alpha \left(\frac{Y}{C} \right)} \left(\frac{C}{S} - 0.5 \right)^n$$

şeklindedir. Burada,

σ : basınç dayanımı,

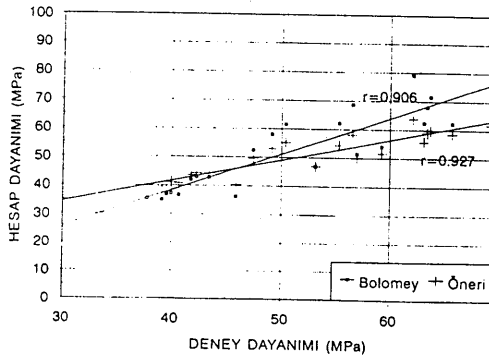
Y: yüksekakışkanlaştırıcı katkı miktarı,

Ç: çimento miktarı,

S: su miktarı,

K, α ve n: katsayılardır.

Bu çalışmadaki deneysel veriler kullanılarak, 7 günlük basınç dayanımı için $K=14.4$, $\alpha=1.11$ ve $n=0.84$; 28 günlük basınç dayanımı içinse $K=24.0$, $\alpha=1.07$ ve $n=0.67$ bulunmuştur. Öte yandan, önerilen formülle Bolomey formülünün orijinal hali arasında bir karşılaştırma yapabilmek için, yine deneysel veriler kullanılarak, Bolomey formülü katsayıları $K_7=12.2$ ve $K_{28}=16.8$ olarak bulunmuştur. Şekil 1'de bu karşılaştırma gösterilmiştir.



Şekil 1. Yüksekakışkanlaştırıcı içeren Betonlarda Bolomey formülü ve değişiklik önerisinin karşılaştırılması.

4.1.2. Mineral Katkı İçeren Betonlar

Mineral katkı içeren betonlar için Bolomey formülünde yapılan değişiklik önerisi

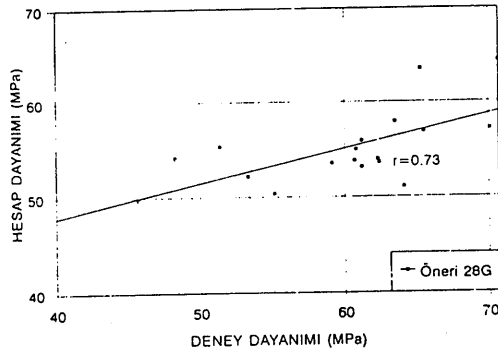
$$\sigma = Ke^{-\alpha \left(\frac{Y}{\bar{C}} \right)} \left(\frac{\delta_m \bar{C} + \delta_{\bar{C}} M}{\delta_{\bar{C}} \delta_m S} - 0.5 \right)^n$$

şeklindedir. Burada,

δ_m ve $\delta_{\bar{C}}$: sırasıyla, mineral katkı ve çimentonun özgül ağırlığı,

$\bar{C}$ ve M : sırasıyla, mineral katkı ve çimentonun ağırlığıdır.

Bu çalışmadaki deneysel veriler kullanılarak, 7 günlük basınç dayanımı için $K=41.7$, $\alpha=1.11$ ve $n=0.3$; 28 günlük basınç dayanımı içinse $K=59.4$, $\alpha=1.07$ ve $n=0.28$ bulunmuştur. Önerilen formülün deneysel sonuçlara uygunluğu Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Mineral katkılı betonlarda Bolomey formülü değişiklik önerisinin deneysel sonuçlara uygunluğu.

4.2. GRAF FORMÜLÜ İÇİN ÖNERİLEN DEĞİŞİKLİK

4.2.1. Yalnız Yüksekakışkanlaştırıcı İçeren Betonlar

Yalnızca yüksekakışkanlaştırıcı içeren betonlar için Graf formülündeki değişiklik önerisi

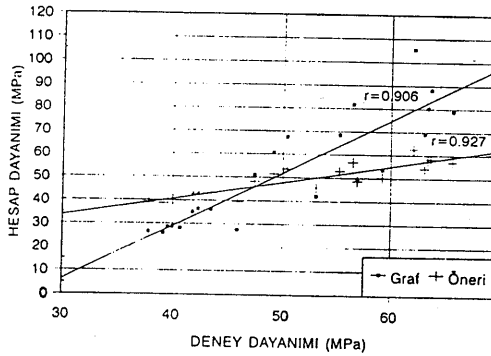
$$\sigma = \frac{r_{\bar{C}}}{b} e^{-\alpha \left(\frac{Y}{\bar{C}} \right)} \left(\frac{\bar{C}}{S} \right)^n$$

şeklindedir. Burada,

$r_{\bar{C}}$: çimento dayanımı,

b , α ve n : katsayılarıdır.

Bu çalışmadaki deneysel veriler kullanılarak, 7 günlük basınç dayanımı için $b=2.03$, $\alpha=1.11$ ve $n=0.98$; 28 günlük basınç dayanımı içinse $b=1.71$, $\alpha=1.07$ ve $n=0.78$ bulunmuştur. Öte yandan, önerilen formülle Graf formülünün orijinal hali arasında bir karşılaştırma yapabilmek için, yine deneysel veriler kullanılarak, Graf formülü katsayıları $b_7=7.6$ ve $b_{28}=8.2$ olarak bulunmuştur. Şekil 3'de bu karşılaştırma gösterilmiştir.



Şekil 3. Yüksekakışkanlaştırıcı içeren betonlarda Graf formülü ve değişiklik önerisinin karşılaştırılması.

4.2.2. Mineral Katkı İçeren Betonlar

Mineral katkı içeren betonlar için Graf formülünde yapılan değişiklik önerisi

$$\sigma = \frac{r_c}{b} e^{-\alpha \frac{Y}{C}} \left(\frac{\delta_m C + \delta_c M}{\delta_c \delta_m S} \right)^n$$

şeklindeir.

Bu çalışmadaki deneysel veriler kullanılarak, 7 günlük basınç dayanımı için $b=0.61$, $\alpha=1.11$ ve $n=0.41$; 28 günlük basınç dayanımı içinse $b=0.63$, $\alpha=1.07$ ve $n=0.4$ bulunmuştur. Önerilen formülün deneysel sonuçlara uygunluğu Şekil 4'de gösterilmiştir.

4.3. FERET FORMÜLÜ İÇİN ÖNERİLEN DEĞİŞİKLİK

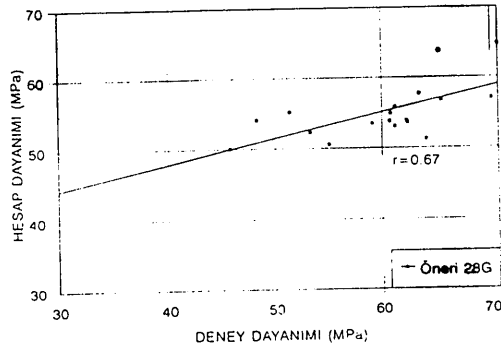
4.3.1. Yalnız Yüksekakışkanlaştırıcı İçeren Betonlar

Yalnızca yüksekakışkanlaştırıcı içeren betonlar için Feret formülündeki değişiklik önerisi

$$\sigma = Ke^{-\alpha \frac{Y}{\zeta}} \left(\frac{1}{1 + \frac{S}{\zeta} \delta_{\zeta}} \right)^n$$

şeklindedir.

Bu çalışmadaki deneysel veriler kullanılarak, 7 günlük basınç dayanımı için $K=137.3$, $\alpha=1.11$ ve $n=2.16$; 28 günlük basınç dayanımı içinse $K=144.3$, $\alpha=1.07$ ve $n=1.72$ bulunmuştur. Öte yandan, önerilen formülle Feret formülünün orijinal hali arasında bir karşılaştırma yapabilmek için, yine deneysel veriler kullanılarak, Feret formülü katsayıları $K_7=125.7$ ve $K_{28}=172.6$ olarak bulunmuştur. Şekil 5'de bu karşılaştırma gösterilmiştir.



Şekil 4. Mineral katkılı betonlarda Graf formülü değişiklik önerisinin deneysel sonuçlara uygunluğu.

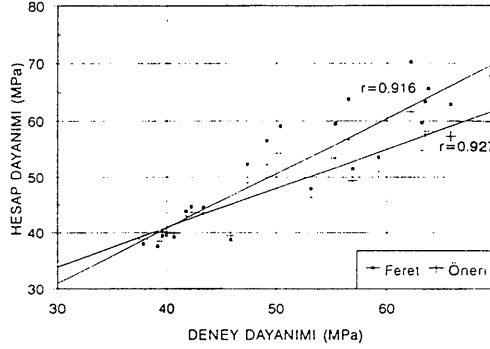
4.3.2. Mineral Katkı İçeren Betonlar

Mineral katkı içeren betonlar için Feret formülünde yapılabilecek değişikliklerle ilgili çalışmalar henüz bir sonuca ulaştırılamamıştır.

5. SONUÇLAR

Yüksekakışkanlaştırıcı içeren betonlar için toplam 288, mineral katkı içeren betonlar için toplam 216 numune kullanılarak elde edilen dayanım deneyi sonuçları kullanılarak Bolomey, Graf ve Feret formüllerinde önerilen değişiklikler bu formüllerin katkılı betonların dayanımlarının tahmininde de kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak, bu çalışmada elde edilen sonuçların genelleştirilebilmesi için farklı özelliklere sahip diğer

kimyasal ve mineral katkıların kullanıldığı betonlardan elde edilen deneysel sonuçlara uyarlanabilirliği araştırılmalıdır.



Şekil 5. Yüksekakışkanlaştırıcı içeren betonlarda Feret formülü ve değişiklik önerisinin karşılaştırılması.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan deneysel sonuçlar yazarın TÜBİTAK İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu tarafından desteklenmiş olan İNTAG-601 numaralı "Yüksek Dayanımlı Betonların Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi" Araştırma Projesinden alınmıştır. Yazar TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR

1. POSTACIOĞLU, B., Beton C.2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 1987, s. 255-263.
2. TOKYAY, M., "Yüksek Dayanımlı Betonların Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi", TÜBİTAK, İNTAG-601, Ankara, 1995, 116s.
3. TOKYAY, M. ve RAMYAR, K., "YDB'larda Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkinliği", İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı, C.1, Gazimağusa, 1993, s.601-610.

