

# AKIŞKANLAŞTIRICI KATKILI PUZOLAN ÇİMENTOLU HAZIR BETON BİLEŞİMİ OPTİMİZASYONU

Abdurrahman GÜNER  
Gaziantep Üniversitesi

## ÖZET

Süperakışkanlaştırıcısız çökmesi 60-80 mm ve su/çimento oranları BS 14 ilâ BS 30 betonlarına tekabül eden betonların ağırlıkça % 0.25 ilâ % 5.00 sodyum-lignosülfonat esaslı melamin sülfonatla modifiye süperakışkanlaştırıcı içeriklerinde bileşimleri, toplam maliyetleri ve dayanımları belirlendi. Betonlarda tane boyutu dağılımı pompalanabilme için 0.50 mm'de % 30 - % 33, 16 mm'de ise % 75 - % 80 yapıldı. Bileşim oranları ve sıvı içeriği aynı kalmak üzere süperakışkanlaştırıcı dozajının çökmeye etkisi de incelendi. Deney sonuçları nitelik denetleme ve yerinde sıkıştırma maliyetini de içeren parça-parça-doğrusal bir optimizasyon modeliyle değerlendirilerek en uygun bileşim için dayanım-su gereksinimi-çimento dozajı-süperakışkanlaştırıcı içeriği-koni çökme bağıntıları belirlendi. Her beton sınıfında çeşitli süperakışkanlaştırıcı içeriği ve çökme değerlerine karşı gelen en düşük maliyet ve nitelik denetleme düzeyleri bulundu.

**Anahtar kelimeler:** hazır beton, katkılı çimento, süperakışkanlaştırıcı, pompalanabilme, işlenebilme, sıkıştırma, nitelik denetim düzeyi, optimizasyon, bileşim belirleme.

## 1. GİRİŞ

### 1.1. KATKILI ÇİMENTOLARLA HAZIR BETON ÜRETİMİ

Tras veya puzolanlı, inceliği yüksek çimentolarla üretilmiş hazır betonlarda, özellikle sıcak mevsimde, istenen işlenebilme ve dayanımı en küçük maliyetle sağlayacak optimum akışkanlaştırıcı dozajının veya bileşimin bilinmesi gerekmektedir. Yüksek oranlarda puzolan ve yüksek fırın cürufu içeren Katkılı Çimentolu BS 14 ve BS 16 betonlarında dayanıklılık sorunlarına yol açan [1] yüksek su içeriğinin ve işlenebilme kaybının azaltılması için akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı

maddeleri bazan birlikte kullanılmaktadır. Nisbeten pahalı olan melamin sulfonat formaldehid ve naftalin sulfonat formaldehid süperakışkanlaştırıcılar priz geciktirici yan etkileri günümüzde artırılarak ortadan kaldırılan sodyum ve kalsiyum lignosulfonatlar ile seyreltilmektedir [2]. Katkılı çimentolardan beklenen özellikler ekonomik yönden uygun süperakışkanlaştırıcılar kullanılarak sağlanabilir [3].

## **1.2. BETON BİLEŞİMİ BELİRLENMESİ - OPTİMUM BİLEŞİM**

Beton bileşimi belirlenmesinde amaç elde bulunan personel, araç ve malzemelerle istenen dayanım ve dayanıklılığı sağlamak koşuluyla yerine yerleşmiş ve sıkıştırılmış betonun maliyetini bir en aza indirmektir [4], [5]. Sadece karışıma giren malzemelerin toplam maliyetinin bir en aza indirilmesini amaçlayan "en-iyileme" yöntemleri istenen özellikleri sağlamak koşuluyla tane boyutu dağılımını en iri sınıra çekerek karma suyu gereksinimini ve çimento dozajını en aza indirmektedir [6], [7]; bu ise yerleştirilmiş, sıkıştırılmış beton için her zaman en düşük maliyet değeridir.

Diğer yandan betonun istenen bir özeliğini, örnek olarak dayanımını ve işlenebilir özeliğini bileşim ve sıcaklığın fonksiyonu olarak en az sayıda deneyle elde etmek amacıyla yönelik yöntemler geliştirilmiştir [8]. Beton bileşimindeki tüm katıların tane boyutu dağılımını ve çeper etkisini gözönünde bulunduran "Faury yöntemi" [9, s. 242, 243] ve yüksek nitelikli beton bileşimi belirlenmesi için "bulamaç yöntemi" [10] uygulanmaktadır. Nihâî ürünün niteliği üretim aşamalarından birindeki en düşük nitelik denetleme düzeyine bağlıdır. Beton bileşenlerinin fiyatı yükseldikçe aşamaların tümünde nitelik denetim düzeyinin artırılması gerekmektedir. Başka bir deyişle, ancak toplam nitelik denetleme düzeyi (NDD) yükseltildiğinde "beton özelliklerinin" istenen değerlerden "sapması" ve bu yoldan dozaj ve maliyet azaltılabilmektedir. Fakat nitelik denetleme işleminin ek maliyeti nedeniyle BS 14'te en düşük NDD'den başlayarak BS 25'te en yüksek NDD'de maliyetin en küçük olduğu görülmüştür [4]. İşlenebilir ve dayanım sabit tutularak priz geciktirici etkisi olmayan akışkanlaştırıcı veya süperakışkanlaştırıcı dozajı artırılması halinde de çimento dozajı ve yine maliyet azaltılabilmektedir.

Beton sınıfı ve yapımda kullanılacak araç, gereç ve yöntemlerin proje bütünlüğü içinde seçilmesi gerekir. Mühendislik açısından anlamlı bir beton bileşimi optimizasyonu ancak yapının tümü için üretim aşamasından başlayarak yararlı ömrü boyunca toplam yıllık maliyet-fayda bağıntısı belirlenerek yapılabilir [11].

## **1.3. KIVAM, İŞLENEBİLME, POMPALANABİLME, SIKIŞTIRILABİLME**

Hazır betonun işlenebilir ve akıcı olması yanında "pompalanabilir" olması da gerekmektedir. Betonun reolojik davranışı dilatant ve tiksotropik özellik gösteren bir

Bingham cismi ile temsil edilebilmektedir [12], [13], [14]. Kıvam ve işlenebilmenin ölçülmesi [15, pp. 203-220] ve pompalanabilirliğin sağlanması için çeşitli yöntemler ve ölçütler uygulanmaktadır [15, p. 209 ff] .

### 1.3.1. Hazır Betonda Pompalama ve Uzun Karıştırma Süresi

En iyi pompalar 1960'lı yıllarda 75 m düşey ve 305 m yatay uzaklıklara 5 MPa basınçla saatte 35 m<sup>3</sup>/saat beton basabilirken günümüzde 22 MPa'dan fazla pompa basıncı altında 425 m'den daha fazla düşey yüksekliğe ve 130 m<sup>3</sup>/sa'at'ın daha fazla debi ile pompalanabilmektedir [16]. 'Boom'ların boyu 52 m kadar olabilmektedir. Tek 400 hp (298 kW) güçlü, çift ramli 7" pompa ile 316 m düşey uzaklığa 9.6 MPa pompa basıncıyla ve O-ring contalı sızdırmaz birleşimli 5" çaplı 13 mm cidar kalınlıklı borularla 46 m<sup>3</sup>/saat debi ile BS 20 ve BS 25 betonu pompalanması olağandır [17]. Bu betonlarda su gereksinimini azaltıcı ve hava sürükleyici katkıları kullanılmış, üretim, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma hızları bekleme gerektirmeyecek şekilde düzenlenmiştir. Bekleme gerekmesi halinde süperakışkanlaştırıcı ile birlikte uygun priz geciktirici katılmakta, beton sıcaklığının 32°C'tan yüksek olmaması halinde 1 - 1½ saat yerine 4 saate kadar nitelik kaybı olmaksızın karıştırılarak bekletilebilen betonlar yapılabilmektedir [18]. Tekrarlı dozlama uygulamasıyla betonun ASTM C143 çökme konisi ve DIN 1048 sarsma tablası ile ölçülen eşdeğer işlenebilmesi başlangıçta 180 mm iken gerekli en az 100 mm değerinin üzerinde tutulabilmektedir [19].

### 1.3.2. Hazır Betonda Kıvam ve İşlenebilme Ölçülmesi

Alışlagelmiş ve yaygın kullanılan yerinde işlenebilme ölçme aracı Abrams çökme konisidir. Al-Manaaseer ve arkadaşları K-çökme (K-slump tester) deneyinin kolay uygulanabilmesi ve plastik kıvamlı betonun olduğu kadar "akıcı" betonun da kıvam ve işlenebilmesini iyi temsil eden sonuçlar verdiğini, zamanla Abrams konisinin yerini alacağını bildirmektedirler [20]. "Kıvam" betonun akıcılığı ve kohezyonu, "işlenebilme" ise ayrışmaksızın yerine yerleştirilip sıkıştırılabilmesi için gerekli enerji ile ilgili özellikler olarak tanımlanmaktadır ve betonun pompalanabilirliğini etkilerler. Betonun pompalanabilir olması için pompa basıncı altında ayrışmayacak kadar kıvamlı ve boruda sürtünme nedeniyle tıkanma oluşturmayacak kadar akıcı olması gerekmektedir [15, p. 239]. Pompalama ve sıkıştırma işçilik ve enerji maliyeti bu özelliklerin fonksiyonu olarak kestirilebilir [21], [22].

## 2. AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışma pompalanabilir, yerine yerleştirilmiş, sıkıştırılmış hazır betonarme betonunun toplam maliyeti esas alınarak beton sınıfı ve çökme ile ölçülen işlenebilmeye

bağlı olarak her süperakışkanlaştırıcı içeriğinde en düşük maliyetler ve nitelik denetleme düzeylerinin belirlenmesi amacıyla yapıldı. Toplam maliyet 1 m<sup>3</sup> beton için yatırım, genel idari işletme, beton santrali ve taşıma araçları işletme, malzeme, nitelik denetleme ve sıkıştırma maliyetlerinin toplamı olarak alındı.

**Tablo 1 Portland Çimentosu, Katkılı Çimento ve Puzolanın Kimyasal Bileşim ve Fiziksel Özellikleri.**

(a) Kimyasal Bileşim, ağırlık % (TS 697 [24], ve TS 25 [25])			
Oksit Bileşen	Cimento: PÇ 400	Cimento: KÇ 32.5	Puzolan Katkı <sup>1)</sup>
SiO <sub>2</sub> (çözünen)	20.72	20.40	43.69(top-
Çözünmeyen kalıntı	0.30	4.09	lam)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51	6.54	13.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.90	3.68	12.66
CaO	63.00	57.42	15.97
MgO	2.68	2.40	4.05
SO <sub>3</sub>	2.59	2.69	-
Kızdırma kaybı	0.57	2.16	-
TOPLAM	98.68	99.41	98.91
Serbest kireç	1.13	1.69	-
CaCO <sub>3</sub>	-	-	13.64
(b) Fiziksel ve Mekanik Özellikler (TS 24, [26])			
Yoğunluk, Mg/m <sup>3</sup>			
Parafinde	3.03	2.996	-
Suda	3.12	3.045	-
Özgül Yüzey			
Blaine, m <sup>2</sup> /kg	262.7	379.2	-
İncelik, # elekte kalan %			
90 µm	3.60	3.53	-
200 µm	0.00	0.21	-
Normal Kıvam (SA= %0.00 <sup>2)</sup>	28	29.5	-
Suyu, ağırlık %			
%1.00	-	26.3	-
%1.50	-	26.2	-
%2.00	-	26.5	-
Priz Süreleri, sa-dak			
Başlangıç	02-00	02-11	-
Son	03-15	02-57	-
Hacim Sabitliği, LeChatelier	4	3	-
Dayanımlar, MPa			
Eğme			
2 günlük	4.1	3.4	-
7 günlük	5.7	5.0	-
28 günlük	7.9	7.1	-
Basma			
2 günlük	21.2	15.0	-
7 günlük	34.6	28.1	-
28 günlük	48.5	41.5	-

<sup>1)</sup> Volkanik tüf, İslahiye, Gaziantep.

<sup>2)</sup> Süperakışkanlaştırıcı miktarı.

Özellikleri Tablo 1'de verilen KÇ-32.5 çimentosu [23] ile Tablo 2'de verilen sodyum lignosulfonat esaslı melamin sulfonatla modifiye süperakışkanlaştırıcı beton katkı maddesi, şehir suyu ve agregalar kullanılarak Abrams konisi ile ölçülen çökmesi

süperakışkanlaştırıcısız 60 - 80 mm ve Su/Çimento oranları BS 14, 16, 20, 25, ve 30 betonlarına tekabül eden, çimento ağırlığına oranla % 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00, 3.00, 4.00 ve 5.00 süperakışkanlaştırıcı içeren taze ve sertleşmiş deneyler için betonlar üretildi. Düşük dozajlı BS 14 ve BS 16 betonlarında çökmenin kayarak yıkılma şeklinde değil, pompalanabilirliğin bir göstergesi sayılabilecek olan kohezyonlu bir kütle halinde oturma şeklinde olmasını sağlayacak oranlarda ince kum kullanıldı. Ayrıca SA (süperakışkanlaştırıcı) oranının çökmeye etkisi bazı betonlarda toplam sıvı içeriği ve bileşim sabit tutulup SA miktarı değiştirilerek incelendi.

**Tablo 2 Bileşenlerin Mühendislik Özellikleri [27], [28].**

Malzeme	Çimento (kullanılan)	Agregalar <sup>1)</sup>				Su	Beton Katkı Mad.		
		No. 0	No. 1	No. 2	No. 3				
Tür	KÇ 32,5	İnce	İnce	Orta	İri	Şehir, 24°Fr	SüperAkışk		
Bağıl Fiat , 10 <sup>-3</sup> kg ç/kg malzeme	1'000.	125	72.67	47.48	47.48	3.58	15'000.		
Yoğunluk <sup>2)</sup> , Mg/m <sup>3</sup>	3.045	2.715	2.717	2.714	2.698	0.9982	1.198		
Tane Boyutu Dağılımı <sup>3)</sup>									
Elek Göz Boyutu, mm	Geçen. % Çi- mento	Agregalar				Beton Karış		Sınırlar	
		No. 0	No. 1	No. 2	No. 3	Alt	Üst	Alt	Üst
31.5	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
16.0	100.	100.	100.	100.	21.	77.	81.	68.	90.
8.00	100.	100.	100.	43.	0.6	63	68	56	75
4.00	100.	100.	90.	2.8	0.5	53	59	47	62
2.00	100.	100.	64.	1.4	0.4	43	46	38	51
1.00	100.	97.	55.	1.2	0.4	35	39	31	42
0.500	100.	93.	47.	1.0	0.2	27	32	25	33
0.250	100.	58.	19.	0.4	0.1	21	26	20	26
0.200	100	-	-	-	-	-	-	-	-
0.180	100	-	-	-	-	-	-	-	-
0.125	96.	9.8	5.0	0.1	0.05	15.	20.	14	19
0.090	93.7	-	-	-	-	-	-	-	-
0.075	92.3	-	-	-	-	-	-	-	-
0.063	76.9	1.3	-	-	-	-	-	-	-

1) Birecik, Fırat; Diyarbak, piroklastik tuf, mileritik kalker. 2) Su içerisinde. 3) Kuru eleme.

### 3. BETON BİLEŞİMİ OPTİMİZASYON YÖNTEMİ

Amaç fonksiyon olarak bileşen malzemeler, tüm hazır beton tesisi, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri ile ilgili personel ve işletme maliyetlerinin toplamı alındı. Maliyetler yörede kurulu hazır beton üretim işletmelerinden dört tanesi üzerinde anketle belirlendi [27]. Her bir nitelik denetim düzeyine tekabül eden beton dayanımı standard sapması yörede yerinde ve hazır pompa betonlarından alınan her biri en az 6 adet silindir numuneden oluşan 40 grup C 14, C 16 ve C 20 denetleme betonu örnekleri üzerinde yapılan değerlendirme ile sınıandı ve Tablo 3'te verildi [28], [29].

**Tablo 3 Karakteristik Dayanım ve Nitelik Denetleme Düzeylerine (NDD) Tekabül Eden Standard Sapma (SS) Değerleri [27], [28].**

Karakteristik Dayanım, $f_{ck}$ MPa	Standard Sapma (SS), MPa					
	Nitelik Denetleme Düzeyi					
	Mükemmel 1	Çok İyi 2	İyi 3	Orta 4	Zayıf 5	Denetimsiz 6
14	1.61	2.03	2.49	2.98	3.51	4.09
16	1.83	2.32	2.85	3.41	4.02	4.67
20	2.29	2.91	3.56	4.26	5.02	5.84
25	2.87	3.63	4.45	5.33	6.28	7.30
30	3.33	4.24	5.22	6.26	7.39	8.60
35	3.77	4.82	5.95	7.16	8.46	9.86
Bağıl NDD Maliyeti, → kg ç/m <sup>3</sup> beton	45.2	33.6	24.9	14.7	2.4	0.5

### 3.1 NİTELİK DENETLEME DÜZEYİ VE STANDARD SAPMA

Dayanımların Tablo 3'te görülen standard sapma, SS, değerleri

$$SS(FCK, VM) = \frac{FCK \times VM}{1 - Z \times VM} \quad (1)$$

bağıntısıyla hesaplandı. Burada VM, dayanımların varyasyon katsayısıdır [26] ve

$$VM(FCK, NDD) = FND \times [1 - U(FCK - FCK0) \times (M / FNDD) \times (FCK - FCK0)]$$

$$U(FCK - FCK0) = \begin{cases} FCK \leq FCK0 \text{ ise } 0 \\ FCK > FCK0 \text{ ise } 1 \end{cases}$$

$$FND = 0.0775 + 0.0225 NDD$$

$$NDD = [\text{Mükemmel} = 1, \text{Çok iyi} = 2, \text{İyi} = 3, \text{Orta} = 4, \text{Zayıf} = 5, \text{Denetimsiz} = 6]$$

$$FCK0 = 40 \text{ MPa, varyasyon katsayısı } FCK \leq FCK0 \text{ için sabit,}$$

$$FCK > FCK0 \text{ için } M = 0.05435 \%/\text{MPa eđimle doğrusal azalmaktadır.}$$

### 3.2. HACİM VE KÜTLELER TOPLAMI - EŞİTLİKLER

Bileşenlerin Kütleleri Toplamı = Betonun Birim Hacminin Kütleşi

$$\sum_i X_i = \Delta \Rightarrow \zeta + S + SA + \sum_i A_i = \Delta \quad (2)$$

Bileşenlerin Hacımları Toplamı = Birim Hacım:

$$\sum_i X_i / d_{X_i} = 1.000 \text{ m}^3 \Rightarrow \zeta / d_{\zeta} + S / d_S + SA / d_{SA} + \sum_i A_i / d_{A_i} + V_{Hava} = 1.000 \text{ m}^3 \quad (3)$$

şeklinde yazıldı. Burada

$\zeta, S, SA$  ve  $A_i$  = Çimento, Su, SüperAkışkanlaştırıcı ve Aggregaların miktarları,  $\text{kg}/\text{m}^3$  beton,  
 $d_{\zeta}, d_S, d_{SA}$  ve  $d_{A_i}$  = Tane yoğunlukları,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  
 $\Delta$  = Taze betonun birim hacim kütlesi,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .  
 $V_{Hava}$  = Hava hacmi  $\geq 0.005$ ,  $\text{m}^3/\text{m}^3$  beton;

### **3.3 KISITLAR - EŞİTSİZLİKLER**

#### **3.3.1. Karma Suyu Gereksinimi - İşlenebilme ve Pompalanabilirlik**

İşlenebilme koşulu olarak SüperAkışkanlaştırıcı (SA 'lı) Karma Suyu Gereksinimi,

$$SSA \geq S0 \times (1 - WR) \quad (4.1)$$

şeklinde yazıldı. Burada  $S0$ , SA'sız betonun su gereksinimidir; su gereksiniminde SA kullanımının sağladığı bağıl azalma,  $WR$ , süperakışkanlaştırıcı oranı,  $R_{SA}$  değerinin fonksiyonu olarak deneysel verilerden [28],

$$WR(R_{SA}) = 0.33(1 - e^{-20.88R_{SA}}) \quad (4.2)$$

ve  $\zeta$  çimento dozajı,  $k_{bk9}$  betonun incelik modülü,  $A_i$  agrega miktarları,  $\zeta A$  mm cinsinden Abrams çökmesi olmak üzere SA'sız hâlde  $S0$  karma suyu gereksinimi,

$$S0 \geq 0.245 \zeta + (0.1755 - 0.0341 k_{bk9}) \left( \sum_i A_i \right) + 0.1373 \zeta A \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edildi.

#### **3.3.2. En Küçük Çimento İçeriği**

Dayanıklılık veya doluluk sağlanması için,  $D$ , milimetre cinsinden en büyük tane boyutu olmak üzere, en küçük bağlayıcı madde veya çimento dozajı,  $\zeta$ ,

$$\zeta \geq \frac{550}{\sqrt[5]{D}} \Rightarrow \zeta \geq 275 \text{ kg}_{\zeta} / \text{m}^3 \text{ beton} \quad (5)$$

Dayanım koşulu basit Graf formülünden elde edilen

$$KG \times (\zeta / S)^2 \geq FCA = FCK + Z \times SS(NDD) \Rightarrow \zeta \geq SSA \times [(FCK + Z \times SS) / KG]^{0.5} \quad (6)$$

bağıntısı kullanıldı. Burada

$KG = 5.045$  MPa (deneysel [28]),

$FCA =$  Amaç dayanım, MPa,  $FCK =$  Karakteristik dayanım, MPa

$Z = 1.28$  (%90 güvenlik düzeyi persantil değeri)dir.

### 3.3.3. Tane Boyutu Dağılımı ve Pompalanabilirlik

En büyük tane boyutu ve L/D ile gösterilen çeper etkisine bağlı olarak  $m^3/m^3$  beton cinsinden toplam en küçük boşluk hacmi,  $V_B$  [9, s. 243] için

$$V_B = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{L/D - 0.75} \quad (7.1)$$

bağıntısında K katsayısı deneysel sonuçlardan itibaren belirlendi ve pompalanabilirlik ölçütü olarak da kullanıldı. Bu bağlamda

L = Betonun dolduracağı hacmin eşdeğer çapı, mm,

(Pompa boru çapı  $\emptyset$  ise  $L = \emptyset/4$ ;  $\emptyset = 100$  mm için  $L = 25$  mm)

D = Betonun (kare delikli örgü eleklerle belirlenen büyük tane boyutu

(bu çalışmada 31.5), mm,

K = Kıvam, yerleştirme araçları ve agregaların tane biçimi ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı deneysel olarak belirlenen bir katsayı [9, s. 243];  $K \geq 0.24$

K' = 0.002-0.003 arasında bir katsayıdır; K' = 0.002 alındı.

Üretilen 70~100 mm çökmeli betonlarda  $V_B \approx 0.165 \sim 0.195$  olduğu görüldü.

Pompalanabilirlik için ayrıca çimento hacmi,  $V_C$ , ve silt boyutlu agrega fraksiyonu  $V_A < 0.2$  mm hacimlerinin toplamı olarak alınan mutlak hacim cinsinden "toplam ince malzeme (<200  $\mu m$ ) miktarı"nı,  $P_{k \leq 0.2}$  ise beton katıları karışımının 0.2 mm elekten geçen oranını göstermek üzere  $V_B$  boşluk hacmine bağlı olarak

$$V_C + V_{A \leq 0.2mm} = 1.625 V_B - (0.084 \pm 0.060) \\ \Rightarrow V_C + P_{k \leq 0.2} V_A \geq 1.625 V_B - 0.144 \quad (8)$$

$$\Rightarrow V_C + P_{k \leq 0.2} V_A \leq 1.625 V_B - 0.024 \quad (9)$$

sınırları uygulandı [15, p. 241, Fig 4.22].

Tane boyutu dağılımı için,  $P_{dj}$  betonun tane boyutu dağılımı ve  $P_{dj,alt}$  ve  $P_{dj,üst}$  alt ve üst sınırlar olmak üzere Tablo 2'de belirtilen genel sınırlar, Faury yöntemi ile

$$P_{D/2} = A + B\sqrt[5]{D} + \frac{C_1}{L/D - C_2} \quad (10.1)$$

referans tane boyutu dağılımı bağıntısında  $A = 0.28$ ,  $B = 0.17$ ,  $C_1 = 0.015$  ve  $C_2 = 0.70$  alınarak  $P_{k16} \approx 0.79$

$$d_j \leq D/2 \text{ için beton karışımında } P_{d_j} = P_{D/2} \frac{\sqrt[5]{d_j} - 0.365}{\sqrt[5]{D} - 0.365} \quad (10.2)$$

$$P_{d_j,alt} \leq P_{d_j,k} \leq P_{d_j,üst} \quad (10.3)$$



ve  $d_j = 16.0$  mm ve  $d_j = 0.500$  mm boyutlu elekler de pompalanabilme için sırasıyla,

$$0.75 \leq P_{k16.0} \leq 0.81 \quad (10.4)$$

$$0.27 \leq P_{k0.50} \leq 0.33 \quad (10.5)$$

yazılarak ve bunlardan da üst ve alt sınır bağıntıları

$$-0.91\zeta - A0 - A1 - A2 + 3.174A3 \geq 0 \quad (10.6)$$

$$3.793\zeta + A0 + A1 - 1.732A2 - 1.795A3 \geq 0 \quad (10.7)$$

şeklinde elde edildi.

### **3.4 HAZIR BETON MALİYETLERİ VE AMAÇ FONKSİYON**

Toplam Malzeme Maliyeti, MTM, her bir bileşenin üreticiye hazır beton tesisindeki  $M_i$  maliyeti nin  $1m^3$  betondaki  $X_i$  miktarı ile çarpımlarının toplamı olarak

$$MTM = \sum_i M_i X_i \Rightarrow$$

$$MTM = 1 \zeta + 15 SA + 0.00358 S + 0.125 A0 + 0.07267 A1 + 0.04748 (A2 + A3) \quad kg_{çimento} / m^3 beton \quad (11)$$

bağıntısı ile hesaplandı.

Taşıma, Pompalama ve Yerleştirme Maliyeti, MTPY ortalama 10 km kamyonla taşıma ve 100 mm çaplı boruda ortalama 16 m düşey ve 16 m yatay pompalama dahil, çökmesi 140 mm olan beton için pompalama ve yerleştirme işlemleri işletme ve işçilik maliyeti MTPY'nin % 44 kadarı olduğu gözönünde bulundurularak [27] betonun milimetre cinsinden  $\zeta A$  çökmesi ile ölçülen işlenebilmesine bağlı

$$MTPY(\zeta A) = 5.992 + 71.785 e^{-0.01946 \zeta A} \quad kg_{çimento} / m^3 beton \quad (12)$$

sıkıştırma maliyeti, MS, ise yine anket verilerine dayanarak,

$$MS(\zeta A) = 0.7560 + 9.0569 e^{-0.01946 \zeta A} \quad kg_{çimento} / m^3 beton \quad (13)$$

ve toplam taşıma yerleştirme ve sıkıştırma maliyeti, MTPYS( $\zeta A$ ), ise (12) ve (13) toplanarak

$$MTPYS(\zeta A) = 6.748 + 80.8442 e^{-0.01946 \zeta A} \quad kg_{çimento} / m^3 beton \quad (14)$$

bağıntısı ile,  $kg_{çimento}/m^3$  beton cinsinden hesaplandı.

Nitelik Denetleme Maliyeti, MND, NDD, Nitelik Denetleme Düzeyine bağlı olarak [4], [5] Tablo 3'ten

$$MND(NDD) = \begin{cases} NDD = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ için} \\ = 45.2, 33.6, 24.9, 14.7, 2.4, 0.5 \text{ kg}_{\text{çim}} / m^3 \text{ beton} \end{cases} \quad (15)$$

olarak alındı.

Betonun Toplam Bağlı Maliyeti, MT, veya amaç fonksiyon,

$$MT = MTM(X_i, BM_i) + MTPYS(\text{ÇA}) + MND(NDD) \text{ kg}_{\text{çimento}} / m^3 \text{ beton} \quad (16)$$

şeklinde yazıldı.

Yukarıdaki optimizasyon formülasyonu uygulanarak her beton sınıfı için her bir süperakışkanlaştırıcı içeriğinde değişik çökme değerleri ve nitelik denetleme düzeylerine tekabül eden minimum maliyetli beton bileşimleri ve maliyetleri bulundu. Bunlar arasından beton sınıfı ve süperakışkanlaştırıcı içeriği için belirli çökme değerlerinde en küçük maliyet ve tekabül eden nitelik denetleme düzeyleri Tablo 4'te verildi.

#### 4. OPTİMİZASYON BAĞINTILARININ VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Bileşimin fiziksel yönü ile ilgili bağıntılar deneysel olarak sınanabildi. Bağıntılarda fiatlar ve maliyetler 1 kg katkı çimento fiatına oranı olarak hesaplanan "kg çimento/birim miktar" birimindeki bağlı fiat ve maliyetler esas alınarak zaman etkisinden olabildiğince bağımsız değerler elde edilebildi. Buna karşılık özellikle işletme ve işçilik maliyetlerinin betonun akıcılığı ile değişen bölümünde belirsizlikler bulunmaktadır. Kira, amortisman ve hurda değerleri için kesin bilgi elde edilememiştir. Yörede hazır beton sanayiinin ancak 8-10 yıllık bir geçmişi olmasından kaynaklanan bu belirsizlik minimum maliyetleri ve elde edildiği nitelik denetleme düzeylerini etkileyecek en düşük fiatlı betonların % 0.25 - % 0.50 süperakışkanlaştırıcı dozajlarında verecek mertebede olabilir.

Genelde SA oranı ve çökme yükseldikçe minimum maliyetler yükselmektedir. Yüksek SA içeriklerinde minimum maliyetler daha düşük nitelik denetleme düzeylerinde ve düşük işlenebilmelerde elde edilebilmektedir.

Model uygulanarak 140 mm çökme veren, SA'sız BS 14 ve BS 16 betonlarının, Mayıs 1994 sonu itibariyle, minimum bağlı maliyetleri Tablo 4'ten enterpolasyonla 421 ve 451 kg çimento/m<sup>3</sup>beton ve mukabil nitelik denetleme düzeyleri 5 (zayıf) bulunmuştur. Aynı tarihte BS 14 ve BS 16 satış fiyatları ise (KDV hariç) 517 ve 570 kgçimento/m<sup>3</sup>beton'dur. Satış fiatı tahmin edilen minimum bağlı maliyetin % 19 ve % 21 üstünde görünmektedir. Nisan 1994 sonunda yapılan bir karşılaştırmada ise bu fark yaklaşık % 15 bulunmuştur. Aradaki farkın zamanla değişkenliği dikkat çekicidir. Bu

**Tablo 4 Betonların Nitelik Denetleme Düzeyleri (NDD) ve Minimum Toplam Bağlı Maliyetleri (MT<sub>min</sub>) [23].**

Ka- rakt Da- ya- nım,	Sü- per- ak. do- zajı	Çökme, mm		Bağlı Maliyeti 9.818+ , kg <sub>cim</sub> /m <sup>3</sup> beton																
		50	60	80	100	125	150	175	200	250	0.714	0.587	0.398	0.270	0.166	0.102	0.063	0.039	0.015	
f <sub>ck</sub> , MPa	r <sub>SA</sub> %	1) 2) N M		N M		N M		N M		N M		N M		N M		N M		N M		
		D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T	D T
14	0.00	6 432	6 427	6 420	5 416	5 418	5 423	5 430	5 437	5 452										
(S/Ç	0.25	6 442	6 437	6 430	6 425	5 422	5 428	5 435	5 442	5 457										
=0.5-	0.50	6 452	6 448	6 440	6 435	6 432	5 432	5 439	5 447	5 462										
0.51)	0.75	6 463	6 458	6 450	6 445	6 441	5 440	5 443	5 451	5 467										
	1.00	6 473	6 468	6 461	6 456	6 452	6 449	5 449	5 456	5 472										
	2.00	6 514	6 509	6 501	6 496	6 492	6 490	6 488	6 487	5 490										
	5.00	6 636	6 631	6 624	6 619	6 615	6 612	6 611	6 610	6 609										
16	0.00	5 441	5 439	5 439	5 442	5 447	5 453	5 461	5 469	5 486										
(S/Ç	0.25	5 445	5 443	5 443	5 446	5 451	5 458	5 466	5 474	5 492										
=0.5-	0.50	5-6 455	5 451	5 448	5 450	5 455	5 462	5 470	5 479	5 497										
0.48)	0.75	6 464	6 459	5 458	5 454	5 460	5 467	5 475	5 483	5 502										
	1.00	6 474	6 469	6 462	5 459	5 464	5 471	5 479	5 488	5 507										
	2.00	6 515	6 510	6 503	6 498	6 494	5 493	5 497	5 506	5 526										
	5.00	6 638	6 633	6 626	6 621	6 616	6 614	6 612	6 612	6 611										
20	0.00	5 494	5 494	5 496	5 510	2 507	2 514	2 523	2 532	2 551										
(S/Ç	0.25	5 499	5 498	5 500	5 504	2-5 511	2 519	2 528	2 537	2 557										
=0.47-	0.50	5 503	5 502	5 504	5 503	2-5 516	2 524	2 533	2 542	2 562										
0.48)	0.75	5 506	5 506	5 508	5 513	5 520	2 528	2 537	2 547	2 567										
	1.00	5 410	5 510	5 512	5 517	5 524	2 533	2 542	2 552	2 572										
	2.00	5 526	5 526	5 528	5 533	2 541	2 550	2 560	2 570	2 592										
	5.00	6 640	6 635	6 628	6 623	6 619	5 618	5 621	4 633	2 653										
25	0.00	2 560	2 560	2 563	2-1 568	1 576	1 586	1 597	1 608	1 631										
(S/Ç	0.25	2 564	2 564	2 567	2-1 572	2-1 581	2-1 591	1 601	1 613	1 637										
=0.4-	0.50	2 568	3 568	2 571	2-1 577	2-1 585	1 595	1 606	1 618	1 642										
0.38)	0.75	2 572	2 572	2 575	2-1 581	2-1 590	2-1 600	1 611	1 623	1 647										
	1.00	2 576	2 576	2 579	2-1 585	2-1 594	2-1 604	1 616	1 627	1 652										
	2.00	2 591	2 592	2-1 596	2-1 602	2-1 611	1 622	1 634	1 646	1 672										
	5.00	5 649	4-5 651	3 653	2 657	2-1 667	1 680	1 693	1 708	1 737										
30	0.00	1 625	1 626	1 630	1 637	1 647	1 659	1 673	1 686	1 717										
(S/Ç	0.25	1 628	1 629	1 634	1 641	1 651	1 664	1 677	1 691	1 719										
=0.38-	0.50	1 632	1 633	1 638	1 645	1 655	1 668	1 681	1 695	1 724										
0.35)	0.75	1 636	1 637	1 641	1 648	1 659	1 672	1 686	1 700	1 729										
	1.00	1 639	1 640	1 645	1 652	1 664	1 676	1 690	1 704	1 734										
	2.00	1 654	1 656	1 661	1 669	1 680	1 694	1 708	1 723	1 753										
	5.00	1 706	1 708	1 715	1 724	1 738	1 753	1 770	1 787	1 821										

1) NDD: Nitelik Denetleme Düzeyi.

2) MT: Minimum Toplam Bağlı Maliyet.

farkın % 5 - % 10 kadar bir bölümünün hesaba katılmamış bulunan etmenlerden, işçilik ve malzeme kayıpları ve atıklardan kaynaklandığı söylenebilir.

İşlenebilirliği düşük betonların pompalama ve sıkıştırma işlemlerinde oluşabilecek fazla yüklerin karşılanabilmesi için gerekli ek iskele ve kalıp maliyetleri en düşük

maliyetli çözümleri beton sınıfı yükseldikçe daha yüksek işlenebilmelere ve süperakışkanlaştırıcı içeriklerine doğru değiştirebilir. Yüksek dayanımlı çimento kullanılması ve/veya yüksek dayanımlı beton üretilmesi halinde de en düşük maliyetler daha yüksek süperakışkanlaştırıcı içeriklerinde elde edilebilir

## 5. SONUÇLAR

Hazır beton bileşiminin belirlenmesinde yararlanılabilecek, malzeme, işletme, işçilik, nitelik denetleme ve taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma maliyetlerini hesaba katarak istenen işlenebilme ve dayanıma sahip betonlarda maliyeti en aza indiren süperakışkanlaştırıcı içeriklerinin belirlenebildiği bir yöntem geliştirildi ve uygulama ile karşılaştırılarak şu sonuçlara varıldı:

- Katkılı çimentolu hazır betonlarda işlenebilme ve süperakışkanlaştırıcı içeriği arttıkça minimum maliyetler artmaktadır.
- C 14 ve C 16 betonlarında minimum maliyet düşük süperakışkanlaştırıcı içeriklerinde 80 - 100 mm çökmede, yüksek SA içeriklerinde ise giderek daha yüksek çökme değerlerinde elde edilmektedir.
- Beton bileşimi optimizasyonunda yerine yerleşmiş, sıkıştırılmış betonun toplam maliyetinin hesaba katılması uygulama açısından anlamlı ve geçerli sonuçlar vermektedir.
- Hazır beton işletmesinin üretimi sırasında deneysel parametrelerin ve bağıntıların düzeltilmesi, iyileştirilmesi yolu ile uygulama yönünden anlamlı en iyi bileşim elde edilebilir

**Teşekkür:** Bu araştırmada Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapı Malzemesi, Makina Malzeme ve Meslek Yüksek Okulu Yapı Malzemesi laboratuvar olanaklarından yararlandı. Agregalar ve çimentonun bir bölümü Atmaz Hazır Beton A.Ş., süperakışkanlaştırıcı Balpa Pazarlama A.Ş., çimento kimyasal ve fiziksel analizleri Gaziantep Çimento Fabrikası tarafından sağlandı.

## KAYNAKLAR

1. Güner, A., "High pozzolan and slag content reduces freeze-thaw resistance," Proc of the US-Turkey Workshop on "Fly-Ash Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete", Ed. V. Ramakrishnan and M. S. Akman, South Dakota School of Mines and Technology, USA/Istanbul Technical University, Türkiye, 9 May, 1992, pp. 26-33.

2. Rixom, M. R. and Waddicor, J., "Role of lignosulphonates as superplasticizers," Developments in the Use of Superplasticizers, Publication SP-68, American Concrete Institute, Detroit, (2nd print), 1987, pp. 359-380.
3. Mather, B., "Cements users' expectations with regard to blended cements," Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete, Publication SP 79, Ed. V. M. Malhotra, Vol I SP 79-12, ACI, Detroit, 1983, pp. 255-265.
4. Güner, A. and Dawod, A. M., "Function of control standard in optimized mix design of concrete," Proc of the Second International RILEM/CEB Symposium - Quality Control of Concrete Structures, E & FN Spon, 1991, pp. 105-112.
5. Güner, A., Dawod, A. M. and Çanakçı, H., "Yüksek dayanımlı beton bileşimi optimizasyonunda nitelik denetleme düzeyi," 2. Ulusal Beton Kongresi 'Yüksek Dayanımlı Beton', 27-30 Mayıs, 1991, pp 444-454.
6. Haktanır, T., "Computer aided mix design, " Doğa Dergisi, TÜBİTAK, Cilt 11, Sayı 2, 1987, s. 206-223.
7. Özturan, T., Özturan, M., "Bilgisayar yardımıyla karışım hesabı ve karışım optimizasyonu," İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı Sempozyumu, Bildiriler Kitabı Cilt II, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul 1988, s. 360-369.
8. Abbasi, A. F., Ahmad, M., Wasim, M., "Optimization of concrete mix proportioning by reduced factorial experimental technique," ACI Materials Journal, Title No 84-M8, Jan-Feb. 1987, pp. 55-63.
9. Postacıoğlu, B., "Yapı Malzemesi Dersleri -Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton," İ.T.Ü. Teknik Okulu Yayınları Sayı:73, İstanbul 1969, 328 s.
10. Larrard, F. de, Puch, C., "Formulations des bétons a hautes performances: la methode des coulis," Les Bétons a Hautes Performances - du Matériau à l'Ouvrage, Press de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1990, pp. 51-59.
11. Frenckner, F., "General Report 2: Economic aspects of durability, including life-cycle cost analysis," Proc. of the Third International Conference on the Durability of Building Materials, Vol. 4, Espoo 1984, pp. 41-63.
12. Legrand, C., "Les comportements rheologiques du mortier frais, " Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 1, 1972, pp. 17-31.
13. van Wazer, J. R., et al. "Viscosity and Flow Measurement - A Laboratory Handbook of Rheology," Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1966, pp. 406.
14. Caron, C., "Évolutions des bétons en cours de prise influence des retardateurs de prise," Annals de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, No 195-196, Mars-Avril 1964, pp. 386-391.
15. Neville, A. M., Properties of Concrete, Longman Scien. & Tech., Avon, 1983. 779 pp.
16. Hubbard J. R., "Concrete pumping comes of age," ACI Concrete International, Oct 1989, p.24.
17. Dooley, T., "Concrete pumped 1'038 ft in single lift," ACI Concrete International, October 1989, pp. 25-27.

18. Kozelisky, F. A., "Extended mix-time concrete," ACI Concrete International, Nov 1989, pp. 22-26.
19. Ravina, D. and Mor, A., "Consistency of concrete mixes - Effects of superplasticizers," ACI Concrete International, July 1986, pp. 53-55.
20. Al-Manaseer, A. A., Nasser, K. W. and Haug, M. D., "Evaluating the K-slump tester - consistency and workability of flowing concrete," ACI Concrete International, Oct 1989, pp. 40-44.
21. Rajgelj, S., "Cohesion aspects in rheological behaviour of fresh cement mortars," Matériaux et Constructions, Vol. 18-No. 104, pp. 109-114.
22. Lama, P. de, Tavano, S., "Vibration energy optimization in prefabricated concrete casting," Developments in the Use of Superplasticizers, Publication SP-68, American Concrete Institute, Detroit, (2nd print), 1987, pp. 307-318.
23. ----, Çimentonun Kimyevî Analiz Metodları (TS 697), TSE, Ekim 1985.
24. ----, Tras (TS 25), TSE, Nisan 1975.
25. ----, Çimentoların Fizikî ve Mekanik Deney Metodları (TS 24), TSE, Eylül 1985.
26. ----, Çimentolar - Katkılı Çimentolar (TS 10156), TSE, Nisan 1992.
27. Güven, İ., "Optimum Superplasticizer Content of Ready-Mixed Concrete (Hazır Betonda Optimum Süperakışkanlaştırıcı İçeriği)," Graduation Project, Dept of Civil Engng, Gaziantep University, June 1994. 87 s.
28. ----, "Simplified Version of the Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results, ACI 214-3R-88," ACI Materials Journal, July -Aug. 1988, pp. 272-279.
29. Güner, A., Akkan, S. ve Sönmez, M., "Gaziantep Şehrinde Üretilen Bina Betonlarının Dayanım ve Nitelikleri," Teknik Rapor (yayınlanmadı), Gaziantep İnşaat Mütcahhitleri Derneği, 1990, 8 s.
30. Çelebi, H., "Water Requirement of Superplasticized Ready-Mixed Concrete (Süperakışkanlaştırıcı Hazır Betonda Su Gereksinimi)," Graduation Project, Dept of Civil Engng, Gaziantep University, June 1994. 78 s.