

Taze Beton Özelliklerinin Optimizasyonu

Remzi ŞAHİN

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Böl., Erzurum (rsahin@atauni.edu.tr)

Mehmet Ali TAŞDEMİR

İTÜ İnşaat Fakültesi, Maslak, İstanbul

Rüstem GÜL

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Böl., Erzurum

Cafer ÇELİK

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Müh. Böl., Erzurum

Geliş Tarihi : 02.10.2006

ÖZET : Bu çalışmada; su-çimento oranı, çimento dozajı ve hava sürükleyici katkı maddesinden oluşan parametrelerin betonun taze haldeki özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney tasarımı aşamasında ve sonuçların istatistiksel analizinde Taguchi Yöntemi kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda betonun işlenebilirliği için çimento dozajı; birim ağırlık ve hava içeriği için ise hava sürükleyici katkı maddesi en önemli parametre olarak bulunmuştur. Genellikle betonun donma-çözölmeye karşı direncini artırması için kullanılan hava sürükleyici katkı maddesi, taze betonun akışkanlığını da artırmıştır. Deneylerde kullanılan Taguchi Yöntemi; deney sayısını azaltmış, her üç deney için geçerli olacak şekilde parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesini sağlamış ve yapılmayan deneylerin sonuçlarının kestirimini mümkün kılmıştır.

Anahtar kelimler: Taze beton, çökme, dozaj, birim ağırlık, hava içeriği, Taguchi Metodu

Optimization of Fresh Concrete Properties

ABSTRACT : In this study, the influence of water-cement ratio, cement dosage and air-entrainment admixture (AEA) on the properties of fresh concrete was investigated using Taguchi Method. The Method was used for both experimental design and statistical analysis of the results to optimize the parameters mentioned. The optimisation results showed that the most important parameter is cement dosage for the workability, is AEA for the unit weight and for the air content. AEA which is generally used to improve the resistance of concrete exposed to freezing and thawing increased the workability of fresh concrete. Taguchi Method decreased the number of experiments, enabled to determine the optimum levels of the parameters for all the three experiments and to estimate the results of not conducted experiments.

Keywords: fresh concrete, slump, dosage, unit weight, air content, Taguchi Method

GİRİŞ

Taze betonun özellikleri arasında en önemlisi “işlenebilirlik”dir. Onlarca yıldır bilim insanları ve mühendisler arasında tartışılmasına rağmen genel olarak işlenebilirlik; betonun karıştırma ve yerleştirme işleminin minimum enerji ile ve homojenliğini yitirmeden, ayrışmadan yapılması ve kalıbını boşluksuz doldurabilmesidir. Bu kavram; kıvam, akışkanlık, pompalanabilirlik ve sıkışabilirlik kavramlarını da kapsamaktadır. Günümüzde yapısal uygulamalar esnasında, mühendisler üzerinde tasarım şartlarını sağlayan en yüksek işlenebilmeyi seçmeleri üzerinde gittikçe artan baskılar vardır. Bu baskılar modern beton teknolojisi alanında son yirmi yıldır artan bir eğilim oluşturmuş ve “kendiliğinden yerleşen beton” adıyla yeni bir beton türünün gelişmesine yol açmıştır (Mutlu ve Sağlam 2000; Saak vd 2004; Roussel 2006). Beton teknolojisinde işlenebilirliğin ölçüsü yaygın olarak çökme (slump) deneyi ile belirlenmektedir.

Betonun kalitesini etkileyen diğer taze beton özellikleri ise hava içeriği ve birim ağırlıktır (Zain 1999). Betonda hava içeriği, biri beton yığının içinde

kendiliğinden oluşan diğeri de bir katkı maddesi yardımıyla sürükleme şeklinde oluşturulan iki farklı prosesin sonucudur. Birincisinin oluşması kaçınılmaz olup betonun dayanıklılığı (durabilitesi) ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. İkincisi olan hava sürükleme ise sertleşmiş betonda agregaları birbirine bağlayan matrisin bir parçası olacak olan küçük hava küreciklerini taze betona sürükleme işlemidir. Öncelikle betonun donma-çözölmeye direncini artırmak için kullanılan bu yöntem genellikle bir hava sürükleyici katkı maddesi (air-entraining admixture, AEA) kullanılarak gerçekleştirilir (Zhang 1996). Her iki proses sonucu oluşan boşlukların karakteri birbirinden farklıdır. Normal boşluklar kıvrımlı ve birbiri ile ilişkili iken sürükleme ile oluşturulan boşluklar küresel yapıda olup birbirlerinden bağımsızdırlar (Şahin 2003).

Birim ağırlık ise çok fazlı bir malzeme olan betonun bileşenlerinin özelliklerine ve beton içerisinde yer alan boşluk miktarına bağlıdır. Normal betonu oluşturan bileşenlerin yoğunlukları 1000 kg/m³ (su) ile 3200 kg/m³ (çimento) arasında değişmektedir. Bunun dışında agrega tane dağılımı,

sıkıştırma işleminin yapıp yapılmadığı ve sürüklenen hava miktarı da betonun birim ağırlığını etkilemektedir (Roussel 2006; Erdoğan 2003).

Bu çalışmanın amacı, ayrıntıları Kackar (1985), Taguchi (1987) ve Ross (1987)'de verilen, Taguchi Yöntemi'ni kullanarak daha az deneyle yeterli miktarda ve istatistiksel olarak analiz edilebilecek veri toplayarak taze beton özelliklerini etkileyen bazı parametrelerin optimizasyonunu yapmaktır.

MATERYAL VE METOT

Agrega

Beton üretiminde agrega olarak, dere kumu (K), kırmataş tozu (KT), orta (K1) ve iri (K2) kırmataş kullanılmıştır. Kırmataş olarak kullanılan agrega bazalt olup agregaların yoğunluk ve su emme değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Agreganın yoğunluk ve su emmesi

Fiziksel Özellik	K	KT	K1	K2
Yoğunluk (gr/cm ³)	2.48	2.55	2.62	2.61
Su emme(%)	3.9	3.4	2	2.3

Çizelge 3. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Özgül Kütle (g/ml)	3.03	Hacim Genişlemesi	Soğukta (mm)	3
Litre Kütle (g/l)	1180		Sıcakta (mm)	1
Priz Başlangıcı (saat)	3.00		Toplam (mm)	4
Priz Sonu (saat)	3.30	Basınç Mukavemeti (N/mm ²)	1 gün	9.4
			2 gün	15.6
			7 gün	32.1
			28 gün	44.0

Su ve katkı maddesi

Atatürk Üniversitesi şebeke suyunun kullanıldığı deneylerde katkı maddesi olarak ASTM C260-81'e uygun olarak üretilmiş 20°C'deki yoğunluğu yaklaşık 1 kg/l olan sentetik bazlı renksiz hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır.

Maksimum agrega çapı, agrega karışımının granülometrisi ve beton üretimi

Deneylerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı, çeper etkisi göz önünde bulundurularak, 16mm seçilmiştir. TS3530'a göre yapılan elek analizi sonuçlarından hareketle belirlenen agrega karışımının granülometrisi A16/B16 sınırları içinde olmakla birlikte B16'ya daha yakındır. Hacimsel olarak ince/iri agrega oranı ise 57/43'dir.

Üretim aşamasında mikserle ilk önce çimento konulmuş daha sonra katkısız betonlarda suyun tamamı katılarak bir dakika, katkılı betonlarda ise

Çimento

Deneylerde Aşkale Çimento Fabrikası'nın Normal Portland Çimentosu (CEM I 32.5) kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 2, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşen	Oran (%)	Bogue denklemlerine göre ana bileşenler (%)	
SiO ₂	21.00		
Al ₂ O ₃	5.29		
Fe ₂ O ₃	3.34	C ₄ AF	10.15
CaO	59.19	C ₃ A	8.37
MgO	3.16	C ₃ S	33.32
SO ₃	2.71	C ₂ S	35.07
Kızdırma Kaybı	3.81		
Serbest CaO	0.29		

suyun yarısı ile 30 saniye karıştırıldıktan sonra suyun diğer yarısına hava sürükleyici katkı maddesi katılarak 30 saniye daha karıştırılmıştır. Bundan sonra da önce ince, ardından iri agrega eklenerek 3 dakika daha karıştırma işlemi sürdürülmüştür.

Agregalar karışıma doğal nem durumunda konulmuş ancak, karışım hesapları doygun kuru yüzey (DKY) durumuna göre yapıldığından, gerektiği her durumda yüzey suyu ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 4'de her bir üretim grubundaki betonun bileşimi verilmiştir. Bu çizelgede, katkı maddesi hariç, bütün bileşenler birim ağırlık deneyi sonucuna göre bulunan gerçek miktarlar olup karışımdaki çimento miktarına oranlanarak verilmiştir. Hava sürükleyici katkı maddesi (AEA) ise nominal çimento dozajına göre yüzde olarak verilmiştir. Çizelgede çimento miktarı C (kg/m³), su/çimento oranı W/C, ince agrega/çimento oranı F/C ve iri agrega/çimento oranı ise L/C ile gösterilmiştir.

Çizelge 4. Karışım oranları

Numune		Karışım kompozisyonu					Numune		Karışım kompozisyonu				
No	Kodu	C	W/C	F/C	L/C	AEA	No	Kodu	C	W/C	F/C	L/C	AEA
1	55S300/0	296	0.50	3.46	2.72	0	16	60N400/0	409	0.60	2.21	1.74	0
2	55H300/5	293	0.55	3.46	2.72	0.05	17	60S400/5	396	0.60	2.21	1.74	0.05
3	55N300/10	290	0.55	3.46	2.72	0.10	18	60H400/10	391	0.60	2.21	1.74	0.10
4	55H350/0	354	0.55	2.78	2.18	0	19	50S300/0	285	0.50	3.54	2.77	0
5	55N350/5	348	0.55	2.78	2.18	0.05	20	50H300/5	291	0.50	3.54	2.77	0.05
6	55S350/10	332	0.55	2.78	2.18	0.10	21	50N300/10	286	0.50	3.54	2.77	0.10
7	55N400/0	407	0.55	2.27	1.79	0	22	50H350/0	351	0.50	2.86	2.25	0
8	55S400/5	399	0.55	2.27	1.79	0.05	23	50N350/5	348	0.50	2.86	2.25	0.05
9	55H400/10	391	0.55	2.27	1.79	0.10	24	50S350/10	337	0.50	2.86	2.25	0.10
10	60S300/0	301	0.60	3.39	2.67	0	25	50N400/0	406	0.50	2.35	1.85	0
11	60H300/5	295	0.60	3.39	2.67	0.05	26	50S400/5	395	0.50	2.35	1.85	0.05
12	60N300/10	286	0.60	3.39	2.67	0.10	27	50H400/10	388	0.50	2.35	1.85	0.10
13	60H350/0	350	0.60	2.71	2.14	0	28	50S400/10	382	0.50	2.35	1.85	0
14	60N350/5	347	0.60	2.71	2.14	0.05	29	60H350/5	351	0.60	2.71	2.14	0.05
15	60S350/10	340	0.60	2.71	2.14	0.10	30	55N300/0	296	0.55	3.46	2.72	0.10

Kodlama

Deneylerde seçilen kodların ilk iki rakamı yüzde olarak su/çimento oranını, ondan sonraki harf bu seri deneylerin devamında yapılacak olan sertleşmiş beton deneyleri için betonun maruz kalacağı kür ortamını (su S, plastik örtü N, laboratuvar ortamı H), bunu takip eden üç rakam çimento dozajını, / işaretinden sonra ise 1/10000 ölçeğinde olmak üzere hava sürükleyici katkı maddesinin dozajını (kullanılmamış=0, %0.05 oranında kullanılmış=5, %0.10 oranında kullanılmış =10) göstermektedir. Buna göre **50S300/0**; W/C =**0.50**, kür ortamı **Su**, çimento dozajı **300 kg/m³**, katkı maddesinin olmaması =**0** anlamına gelmektedir.

Seçilen parametreler ve deney planlaması

Bu çalışma betonun donma-çözülmesi ile ilgili yapılmış olan geniş kapsamlı bir araştırmanın ilk aşamasını içermektedir. Söz konusu çalışmada (Şahin 2003) Çizelge 5’de isimleri ve seviyeleri verilen 4

parametrenin etkisi incelenmiştir. Bu nedenle deney planlaması yapılırken 4 parametre de göz önünde bulundurulmuş ancak, taze beton deneyleri üzerinde bir etkisi olmadığından, deney planında belirtilen parametrelerden “kür şartı ve bununla ilgili bileşik etki sütunları” optimizasyon çalışmalarında deneysel hatanın hesabında kullanılmıştır.

Bütün parametrelerin seviyeleri ile birlikte göz önünde bulundurulduğu Tam Faktöriyel Deney Tasarımı’na göre, her biri üç seviyeli olan bu dört parametrenin etkisini incelemek için, $3^4=81$ farklı karışım üretmek gerekir. Bu çalışmada Taguchi Yöntemi kullanılarak deney sayısında azaltmaya gidilmiştir. Buna göre L_{27} deney modeli seçilerek 27 farklı kombinasyonlu bir deney planı oluşturulmuştur. Asıl ve bileşik etkilerin yerleşimi Çizelge 6’daki deney planı üzerinde gösterilmiştir. İstatistiksel analiz aşamasında bu çizelgedeki 8, 9 ve 10. sütunlara 11., 12. ve 13. sütunlar da eklenerek deneysel hata hesaplanmıştır.

Çizelge 5. Deneysel parametreler ve seviyeleri

	PARAMETRELER	Seviyesi		
		1	2	3
W/C	Su/çimento oranı	0.55	0.60	0.50
C	Çimento dozajı (kg/m ³)	300	350	400
AEA	Hava sürükleyici katkı maddesi (%)	0	0.05	0.10
CC	Kür şartları	Su (S)	Hava(H)	P.örtü(N)

Çizelge 6. Seçilen $L_{27}(3^{13})$ deney planı ile asıl ve bileşik etkilerin yerleşimi

Deney No	Parametreler ve Seviyeleri										Deney No	Parametreler ve Seviyeleri										
	W/C	C	W/C*C	AEA	W/C*AEA	CC	W/C*CC	1	2	3		4	5	6	7	8	9	10				
1	1	1			1			1				15	2	2			3			1		
2	1	1			2			2				16	2	3			1			3		
3	1	1			3			3				17	2	3			2			1		
4	1	2			1			2				18	2	3			3			2		
5	1	2			2			3				19	3	1			1			1		
6	1	2			3			1				20	3	1			2			2		
7	1	3			1			3				21	3	1			3			3		
8	1	3			2			1				22	3	2			1			2		
9	1	3			3			2				23	3	2			2			3		
10	2	1			1			1				24	3	2			3			1		
11	2	1			2			2				25	3	3			1			3		
12	2	1			3			3				26	3	3			2			1		
13	2	2			1			2				27	3	3			3			2		
14	2	2			2			3														

Taguchi Yöntemi'nde deneyler sonunda elde edilen verilerin analizi ile belirlenen optimum şartlarda doğrulama deneyleri yapılarak, beklenen sonucun elde edilip edilemediği kontrol edilir. Bu çalışmada beton üretim aşamasında 3 adet de ilave kombinasyon üretilerek, asıl deneylerle aynı anda dolayısı ile "aynı şartlarda" doğrulama deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler Çizelge 4'de 28, 29 ve 30 deney numarası ile verilmiştir. Bu şekilde bir doğrulama yönteminin seçilmesi ile ilk 27 deneyden elde edilen bilgilere dayalı olarak 28, 29 ve 30. deneylere karşı gelen tahmin ve güven aralıklarının hesaplanması ve elde edilen gerçek sonuçlar ile güven aralıklarının karşılaştırılıp deneysel sonuçların "doğrulanabilirliklerinin" belirlenmesi amaçlanmıştır.

Taguchi Yöntemi'nde deneylerden elde edilen veriler bir dizi formülasyon yardımıyla analiz edilir. Kackar (1985), incelenen probleme bağlı olarak kullanılabilir çok (60'dan fazla) sayıda performans istatistiği geliştirildiğini bildirmektedir. Bunlardan aşağıdaki formülle verilen ve "daha büyük daha iyi (higher is better)" durumu için geliştirilen performans istatistiği, optimizasyon kriteri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$Z_B = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (1)$$

Burada Z_B performans istatistiğini, n bir deneysel kombinasyonda yapılan tekrar sayısını ve Y_i ise i . deneyin performans değerini göstermektedir.

Taguchi Yöntemi'nde optimum çalışma

şartlarına karşı gelen deney çalışma süresince yapılmamış olabilir. Böyle durumlarda optimum şartlara karşı gelen performans değeri, aşağıdaki toplamsal modelden yararlanılarak tahmin edilebilir (Phadke vd 1983):

$$Y_i = \mu + X_i + e_i \quad (2)$$

Burada μ performans değerinin genel ortalaması, X_i i . deneydeki parametre-seviye kombinasyonunun sabit etkisi ve e_i ise i . deneydeki rassal hatayı göstermektedir. 2. eşitlik deneysel veriler kullanılarak hesaplanan bir nokta tahmini olduğundan, bu değer anlamlı olup olmadığını belirlemek için güven aralığı hesaplanmalıdır. Seçilen hata seviyesindeki güven aralığı aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Ross 1987):

$$Y_i \pm \sqrt{F_{\alpha,1,DF_{MSe}} * MS_e * \left(\frac{1+m}{N} + \frac{1}{n_r} \right)} \quad (3)$$

Burada F çizelge değeri, α hata seviyesi, DF_{MSe} hata kareler ortalamasının serbestlik derecesi toplamı, MS_e hata kareler ortalaması, m optimum çalışma şartlarının tahmininde kullanılan parametrelerin serbestlik dereceleri toplamı, N toplam deney sayısı ve n_r doğrulama deneyindeki tekrar sayısını göstermektedir.

Elde edilen deneysel veriler ANOVA TM paket programı ile istatistiksel olarak analiz edilerek parametrelerin optimizasyon kriterleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Taze beton deneylerine ait sonuçlar toplu olarak Çizelge 7’de, bu sonuçlardan hareketle her bir deney

çeşidi için yapılan optimizasyon sonucu ise izleyen alt bölümlerde verilmiştir.

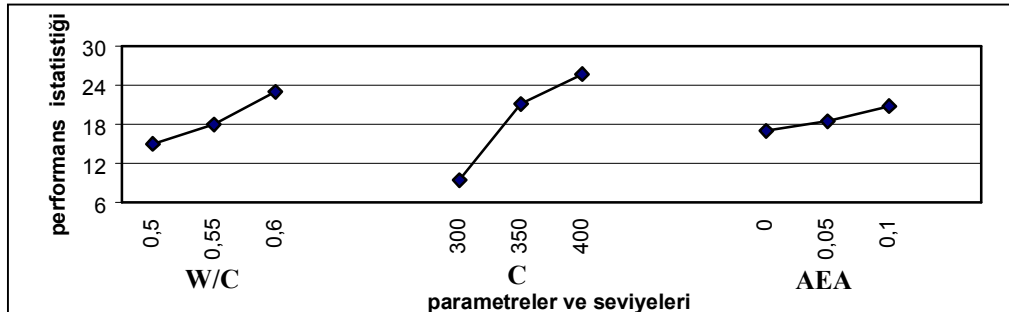
Çizelge 7. Taze beton deneyleri sonuçları

Numune		Taze Beton Deneyleri				Numune		Taze Beton Deneyleri			
No	Kodu	Çökme (cm)	Birim ağırlık (kg/m ³)	Hava miktarı (%)		No	Kodu	Çökme (cm)	Birim ağırlık (kg/m ³)	Hava miktarı (%)	
				H	Ö					H	Ö
1	55S300/0	2.5	2291	2.2	2	16	60N400/0	23.5	2268	0	0.5
2	55H300/5	2	2268	3.4	3.5	17	60S400/5	25	2197	1.9	2
3	55N300/10	3.5	2239	4.3	6	18	60H400/10	27	2170	3.2	3
4	55H350/0	10	2306	0.1	0.5	19	50S300/0	1	2228	6.0	4
5	55N350/5	10	2266	1.8	2.5	20	50H300/5	2	2276	3.9	3.5
6	55S350/10	14.5	2162	6.3	>6	21	50N300/10	3.5	2231	5.7	>6
7	55N400/0	16.5	2286	0	0.5	22	50H350/0	6	2320	0.6	1
8	55S400/5	20.0	2238	1.5	1.5	23	50N350/5	6.5	2299	1.4	2.5
9	55H400/10	22	2195	3.4	3.5	24	50S350/10	8	2226	4.6	6
10	60S300/0	3.5	2309	0.6	1	25	50N400/0	13	2312	0	0.5
11	60H300/5	5.5	2260	2.6	2.5	26	50S400/5	14.5	2254	2.4	2.5
12	60N300/10	7.5	2190	5.5	6	27	50H400/10	17	2211	3.9	6
13	60H350/0	17	2260	0.9	0.5	28	50S400/10	17	2178	5.6	>6
14	60N350/5	20	2235	1.9	2	29	60H350/5	19	2260	0.8	2
15	60S350/10	21	2192	4.0	4	30	55N300/0	2.5	2291	2.2	2

Çökme deneyi sonuçları

Çökme deneylerinde betonun daha fazla akışkan olması amaçlanmıştır. Bu nedenle optimizasyon “daha büyük daha iyi” durumuna göre yapılmış, elde edilen sonuçlar ise Şekil 1 verilmiştir. Şekil 1, parametrelerin (1) no.’lu formül yardımıyla bulunan performans istatistiği (S/N) üzerindeki etkisini göstermekte olup bu grafiklerde maksimum noktalar en iyi seviyeleri, doğruların eğimi ise etkinlik derecesini gösterir. Buna göre, Şekil 1’den, taze betonun çökmesi üzerinde en etkin parametrenin

çimento dozajı olduğu görülmektedir. Yapılan ANOVA çalışmasında bu parametrenin etkinlik derecesinin %76 olduğu belirlenmiştir. Çimento dozajı arttıkça betonun işlenebilirliğinin bir ölçüsü olan çökme de artmıştır. Nitekim, Çizelge 7’de verilen değerlerden aynı çimento dozajına sahip olan betonların ortalaması alınacak olursa; 300 dozlu betonların 3.4 cm ortalama çökme değerine sahip iken bu değer 350 ve 400 dozlarda, sırasıyla, 13.2 ve 19.6 cm’e çıktığı görülecektir.



Şekil 1. Çökme deneyinde parametrelerin performans istatistiği üzerindeki etkileri

Çizelge 8’de her üç taze beton deneyi için parametrelerin optimum değerleri ve etkinlik dereceleri ilgili bilgiler toplu olarak verilmiştir. Bu çizelgeden çökme deneyi için çimento dozajını W/C

oranının izlediği görülmektedir. Beklenildiği gibi, betonun W/C oranının artması çökmesini de artırmıştır.

AEA ise üçüncü derecede etkili parametredir. AEA katılmamış duruma oranla %0.05 oranında AEA katılmasıyla karışımın çökmesinde %30, %0.10 oranında AEA katılmasıyla ise %48 oranında bir artış olmuştur. Akışkanlık betonun yerine yerleştirilmesi ve kompakt bir yapı elde edilmesi bakımından çok önemli olduğundan hava sürükleyici katkı maddesinin taze betonun işlenebilme özelliği üzerindeki bu olumlu etkisi dikkate değerdir. Bu sonuç, Gifford ve Gillott (1996)'da varılan sonucu doğrular niteliktedir.

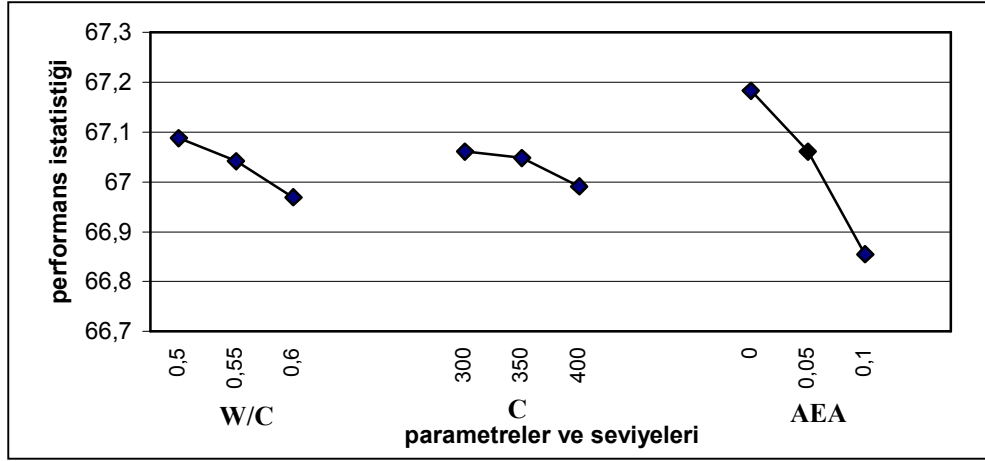
Çizelge 8. Taze beton deneylerinde parametrelerin optimum değerleri

	Parametreler		
	W/C	C	AEA
Çökme	0.60 ⁺	400*	0.10
Birim ağırlık	0.50 ⁺	300	0.00*
Hava içeriği	0.50	300 ⁺	0.10*
Üçlü optimizasyon	0.50	400	0.10 (%0)

*birinci, ⁺ikinci dereceden etkin

Birim ağırlık deneyi sonuçları

Birim ağırlık deneyi için de “daha büyük daha iyi” durumuna göre yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen parametrelerin performans istatistiği üzerindeki etki grafiği Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Birim ağırlık deneyinde parametrelerin performans istatistiği üzerindeki etkileri

Şekil 2’den taze betonun birim ağırlığı üzerinde en fazla etkinin hava sürükleyici katkı maddesi olduğu görülmektedir. Seri için yapılan ANOVA çalışmasında bu parametrenin etkinlik derecesinin ise %60 olduğu tespit edilmiştir. Karışıma AEA katmakla betonun birim ağırlığında önemli miktarda azalma olmuştur. Bu azalma, hava sürükleyicinin olmaması duruma göre, karışıma %0.05 ve %0.10 oranında AEA katılmasıyla, sırasıyla, %1.4 ve %3.8 oranındadır.

Bu parametreyi W/C oranı izlemektedir (Çizelge 8). W/C oranının artması, az da olsa, birim ağırlığı düşürmüştür. Çizelge 7’de verilen değerlerin ortalaması alınarak bu düşüşün, W/C=0.50 durumuna göre, W/C=0.55’de %0.02, W/C=0.60’da ise %0.9 oranında olduğu tespit edilmiştir.

Çimento miktarının ise çok fazla etkin bir parametre olmadığı Çizelge 8 ve Şekil 2’den görülmektedir. Bununla birlikte bu parametrenin etkisi, karışımda hava sürükleyici katkı maddesi

bulunup bulunmamasına göre değişmiştir. AEA katılmamış betonlarda dozajın artmasıyla birim ağırlıkta kısmî bir artış (300 dozlu betonun birim ağırlığına oranla 350 dozda %0.7, 400 dozda ise %0.4) olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, karışıma %0.05 oranında AEA katılmasıyla, yine 300 dozlu betonun birim ağırlığına oranla, 350 ve 400 dozlu betonlarda, sırasıyla, %0.1 ve %1.7; %0.10 oranında AEA katılmasıyla ise, yine aynı sıraya göre, %1.2 ve %1.4 oranlarında bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir. Aynı çimento dozajına sahip betonlar kendi aralarında değerlendirildiğinde ise yine hava sürükleyici katkı maddesinin artmasıyla birim ağırlıkta azalmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bu azalma, AEA katılmamış duruma göre karışıma %0.05 oranında AEA katılması ile 300, 350 ve 400 dozlu betonlar için, sırasıyla, %0.5, %1.3 ve %2.6 oranlarında iken %0.10 oranında katılmasıyla, yine sırasıyla, %2.6, %4.4 ve %4.4 oranlarında gerçekleşmiştir. Bütün bu verilenlerden hava

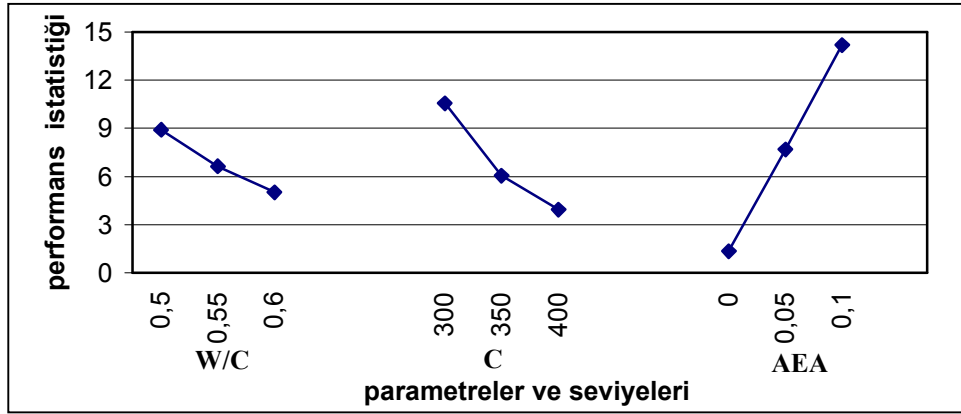
sürükleyici katkı maddesi kullanılmadığı zaman betonun birim ağırlığının çimento dozajı ile artacağı ancak söz konusu katkı maddesinin kullanılması durumunda ise çimento dozajının artmasıyla birim ağırlığın düşeceği sonucuna varılabilir.

Hava içeriği deneyi sonuçları

Deneylerde taze betonun hava içeriğini belirlemek için kullanılan cihazla hava içeriğinin %6'dan fazla olması durumunda okuma yapılamadığından Çizelge 7'de hem deneysel ölçüm yapılarak hem de birim ağırlık sonuçlarına göre hesapla bulunan hava miktarları verilmiştir. Bu çizelgede deneylerde ölçülen sonuçlar "Ö", hesaplanarak bulunan hava içerikleri ise "H" sütunlarında verilmiştir. Ölçüm yapılamayan karışımlar ise "Ö" sütununda >6 ile gösterilmiştir. Hava içeriği cihazla belirlenemeyen 3 karışım hariç diğer 27 karışım arasında bir karşılaştırma yapılacak

olursa, ± 0.5 tolerans aralığında, ölçülenle hesapla bulunan değerler %70 oranında birbirinin aynıdır. Diğer %30'luk dilimde kalanlarda ise genelde ölçülen değerler daha fazladır. Yapılan ön optimizasyon çalışmalarında her iki yöntem de paralel bilgiler verdiği için burada yalnızca ölçülen değerler esas alınarak yapılan optimizasyonun sonuçları verilmiştir.

Betonun hava içeriği ile ilgili yapılan optimizasyon çalışmalarında da bir sonraki aşama olan betonun don direnci göz önünde bulundurularak, "daha büyük daha iyi" durumuna göre optimizasyon yapılmıştır. Ancak, betonun daha az miktarda hava içermesinin istendiği çalışmalarda (örneğin mekanik özelliklerin geliştirilmesi istenen deneylerde), Kackar (1985)'de verilen formülden hareketle, "daha küçük daha iyi" durumuna göre optimizasyon yapılması gerekir. Sonuçlar Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Hava içeriği deneyinde parametrelerin performans istatistiği üzerindeki etkileri

Taze betonun hava içeriğinin artırılmasında hava sürükleyici katkı maddesi en fazla katkı sağlamıştır. Seri için yapılan ANOVA çalışmasında bu parametrenin etkisinin %70 olduğu belirlenmiştir. Nitekim, katkı maddesi katılmayan betonların ortalama hava içeriği %1.3 iken bu oranın %0.05 oranında AEA katılan betonlarda %2.2'ye, %0.10 oranında katılanlarda ise %4.7'ye çıktığı Çizelge 7'den hesaplanabilir.

Çimento dozajı ise ikinci derecede etkilidir (Çizelge 8). Çizelge 7'den 300 dozlu betonların %3.6, 350 dozlu betonların %2.3, 400 dozlu betonların ise %2.2 oranında ortalama hava içeriğine sahip olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlerden çimento miktarının artmasıyla taze betonun hava içeriğinde azalmanın olduğu anlaşılmaktadır. Aynı durum üçüncü derecede etkili olan W/C oranı için de geçerlidir. W/C oranı arttıkça taze betonun hava içeriğinde azalma olmuştur. W/C oranı 0.50, 0.55 ve

0.60 olan karışımların ortalama hava içeriği, sırasıyla, %3.4, %2.5 ve %2.1 olarak bulunmuştur. W/C oranı ve çimento dozajının en düşük seviyelerinde betonun daha fazla hava içermesinin nedeni karışımın işlenebilmesi ile ilişkilidir. Çökme deneyi sonuçlarında da belirtildiği gibi, W/C oranı ve çimento miktarı düşük olan betonların çökmeleri de düşüktür. Bu nedenle beton yerine iyi yerleşmemekte ve daha fazla boşluklu bir yapı kazanmaktadır. Örneğin, Çizelge 7'de 50S300/0 kod numarası ile verilen karışımda hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmadığı halde hava içeriği %6 olarak hesaplanmıştır. Bu karışımın çökmesine bakıldığı zaman ise oldukça katı kıvamda (1cm) olduğu görülecektir.

Taze beton deneyleri sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi (üçlü optimizasyon)

Çizelge 8'de her üç taze beton deneyi göz

önünde bulundurularak yapılmış olan üçlü optimizasyonun sonuçları da verilmiştir. Bu çizelgeden, W/C oranının düşürülmesi, çimento miktarının artırılması ve hava sürükleyici katkı maddesi kullanılması durumunda taze beton deneylerinde optimum sonuçların alınacağı sonucu çıkarılabilir. Ancak, burada şu hususu belirtmek gerekir: her bir taze beton deneyine ait optimizasyon sonuçları incelenecek olursa (Çizelge 8) seçilen parametrelerin her üç deney sonucunu farklı şekilde etkilediği görülecektir. Örneğin, W/C oranı ve çimento dozajının yüksek seviyeleri betonun çökmesini artırmışken, birim ağırlık ve hava içeriğini azaltmıştır. Buna karşın, AEA katılması çökme ve hava içeriğini artırmışken birim ağırlığı düşürmüştür. Optimizasyon çalışmaları parametrelerarası ödünleşmeleri içerdiğinden bu üçlü optimizasyon yapılırken, çökme üzerinde en etkili parametre olan çimento miktarının 400 kg/m³ seviyesi, diğer iki deney için ortak olmak üzere W/C'nin 0.50 seviyesi ile çökme ve hava içeriği için ortak olan AEA'nin %0.10 seviyesi alınmıştır. Ancak, birim ağırlık için AEA katılmamış durum birinci derecede etkin olduğundan betonun kullanım amacına göre AEA'nin %0 seviyesi de alınabilir.

Doğrulama deneyleri

Deneysel sonuçların doğrulanabilirliklerinin belirlenmesi amacıyla üretilen 3 adet ilave karışımdan elde edilen sonuçlar Çizelge 7'de 28, 29 ve 30 numaralı satırlarda verilmiştir. Bu karışımların performans değerleri 2 no.'lu eşitlik yardımıyla tahmin edilmiş, bu tahminlerin %5 hata düzeyindeki güven aralıkları ise 3 no'lu eşitlik yardımıyla hesaplanmış ve Çizelge 9'da verilmiştir. Bu çizelgede tahmin edilen değerler "tahmin", deneysel sonuçlar ise "gerçek" sütununda gösterilmiştir.

Çizelge 9'dan, rastgele seçilmiş 3 karışımdan alınan sonuçların genelde %95 güven aralığında tahmin edilen değerler arasında olduğu görülmektedir. Yalnızca, çökme deneyinde iki sonuç hava içeriği deneyinde ise bir sonuç üst sınırın biraz üzerinde okunmuştur. Bu durum deneyler esnasında çok hassas ölçüm yapılamaması ile açıklanabilir. Bu sonuçlar, seçilen deney planına göre elde edilen sonuçlardan hareketle yapılmayan deneylerin sonuçlarının da kestirilebileceğini ve Taguchi Yöntemi'nin doğrulanabilir ve güvenilir bir deney tasarım yöntemi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 9. Taze beton deneyleri için doğrulama deneyleri sonuçları

Karışım Kodu	Çökme			Birim Ağırlık			Hava İçeriği		
	Tahmin	Güven aralığı	Gerçek	Tahmin	Güven aralığı	Gerçek	Tahmin	Güven aralığı	Gerçek
50S400/10	17.667	16.495 - 18.839	17	2205.0	2172.3 - 2237.7	2178	4.197	2.811 - 5.583	6
60H350/5	17.056	15.884 - 18.228	19	2242.3	2209.6 - 2275.0	2260	1.652	0.266 - 3.038	2
55N300/0	1.111	0.000 - 2.283	2.5	2296.0	2263.3 - 2328.7	2291	2.174	0.788 - 3.560	2

SONUÇLAR

Betonun çökmesi W/C oranı, çimento dozajı ve hava içeriğinin artmasıyla artmıştır. Hava sürükleyici katkı maddesi katılmamış, W/C oranı düşük ve çimento dozajı fazla olan betonların birim ağırlıklarının da fazla olacağı söylenebilir. Yüksek dozajda hava sürükleyici katılması, çimento miktarının ve su/çimento oranının düşürülmesi ise betonun hava içeriğini artıracaktır. Hava içeriğinin fazla olması durumuna göre her üç taze beton deneyi göz önünde bulundurularak yapılmış olan üçlü optimizasyon ise W/C oranının düşürülmesi, çimento miktarının artırılması ve hava sürükleyici katkı maddesi kullanılması durumunda taze beton

deneylerinde optimum sonuçların alınacağını göstermiştir.

Geleneksel deney tasarım yöntemlerine alternatif olarak Taguchi Yöntemi kullanılarak yapı malzemesi deneyleri hem daha düşük maliyetle yapılabilir hem de parametrelerin etkinlik dereceleri ile aralarında bileşik etki olup olmadığı belirlenebilir.

KAYNAKLAR

Erdoğan, T.Y., 2003. Beton. ODTU Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara

- Gifford, P.M. and Gillotte J.E., 1996. Freeze- Thaw Durability Of Activated Blast Furnace Slag Cement Concrete. *ACI Materials Journal*, 93 (3):242- 245.
- Mutlu, M., Sağlam, A.R., 2000. Taze betonda işlenebilmenin ölçülmesi ve deney aletlerinin irdelenmesi. *SİKA Teknik Bülten*, 4:11-17
- Kackar, R.N., 1985. Off-Line Quality Control, Parameter Design and Taguchi Method. *J. Quality Eng.*, 17:176-209.
- Phadke, M.S., Kackar, R.N., Speeney, D.V. and Grieco M.J., 1983. Off-Line Quality Control In Integrated Circuit Fabrication Using Experimental Design. *The Bell Sys. Tech. Journal*, 62 (5):1273-1309.
- Ross, P.J., 1987. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw-Hill, New York.
- Roussel, N., 2006. A theoretical frame to study stability of fresh concrete. *Materials and Structures*, 39:81-91.
- Saak A.W., Jennings, H.M., Shah, S.P., 2004. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. *Cement and Concrete Research* 34:363–371
- Şahin, R., 2003. Normal Portland Çimentolu Betonların Don Direncinin Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu ve Hasar Analizi. Doktora tezi, Atatürk Üniv., Erzurum
- Taguchi, G., 1987. System of Experimental Design. *Quality Resources*, 1:108-115.
- Zain, M.F.M., Safiuddin, M., Yusof, K.M., 1999. A study on the properties of freshly mixed high performance concrete. *Cement and Concrete Research* 29:1427–1432
- Zhang, D.S., 1996. Air Entrainment in Fresh Concrete with PFA. *Cement and Concrete Composites* 18:409-416.