

Mineral katkılı betonlarda bileşimin basınç dayanımı ve geçirimliliğe etkisi

Ünal Anıl DOĞAN*, M. Hulusi ÖZKUL

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Betonda dayanıklılığın (dürabilite) en az dayanım kadar önemli olduğu son yıllarda daha iyi anlaşılmaya başlamıştır. Dayanıklı beton üretmek için düşük su/çimento oranının yanında puzolan (mineral katkı) kullanımının da gerekli olduğu bilinmektedir. Bu deneysel çalışmada farklı oranlarda uçucu kül veya silis dumanı mineral katkıları içeren iki seri beton üretilmiştir. 'Merkezi Kompozit Tasarım' adındaki deneysel tasarım ve analiz yapan istatistiksel yöntem kullanılarak her seride karışım parametrelerinden toplam bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı ve puzolan/bağlayıcı oranı bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Değişken sınırları puzolan özelliklerine ve betonların belirli bir kıvamda bulunması koşuluna göre belirlenmiştir. Her seride, kullanılan istatistiksel programın belirlediği 20 adet karışım hazırlanmıştır. Betonların basınç dayanımı ve klorür geçirimliliğini ölçmek üzere alınan numunelerin yarısı laboratuvar ortamında havada diğer yarısı da kirece doygun su içerisinde 90 gün boyunca saklanmıştır. Basınç dayanımının yanında ASTM C 1202 standardına uygun olarak hızlı klorür geçirimliliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm deney sonuçları varyans analizi ile değerlendirilmiş ve her iki kür koşulu için ölçülen beton özelliklerinin karışım parametreleri cinsinde ayrı ayrı modelleri belirlenmiştir. Betonun seçilen bileşim parametrelerinin (toplam bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı ve puzolan/bağlayıcı oranı) basınç dayanımı ve klorür geçirimliliği üzerine etkisi elde edilen istatistiksel modellere dayanılarak değerlendirilmiştir. Hızlı klorür geçirimliliği deneyinin havada saklanan betonların karşılaştırılmasında kullanılabileceği ancak su kürü uygulamasında mineral katkılı betonlarla katkısız betonların karşılaştırılmasında hatalı sonuçlara neden olabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, silis dumanı, kür koşulları, istatistiksel analiz, merkezi kompozit tasarım.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ünal Anıl DOĞAN. adogan@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 69.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Beton bileşim parametrelerinin geçirimlilik özellikleri ve gömülü çelik donatı korozyonuna etkisi" adlı doktora tezinin hazırlanmıştır. Makale metni 18.12.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 16.01.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Effect of mixing proportions on the compressive strength and permeability of concretes containing mineral admixtures

Extended abstract

Concrete is a material which contains different amounts of pores in various sizes. On this account, penetration of liquid and/or gas into the concrete occurs by diffusion, absorption under pressure or capillary sorption through the pores. In no matter what way the transfer of liquid and gas occurs, the phenomenon is called as permeability. Permeability depends on amount, distribution, size and connectivity of pores within concrete for as much as rate of penetration of aggressive substances into concrete mainly related to the continuity of the pores and their shape and distance.

It has been widely accepted for many years that mechanical strength of concrete is adequate enough for a structure and little maintenance would be sufficient to overcome any problem occurred during the service life. However, in recent years it is well known that in order to obtain a durable concrete, which shows the expected performance throughout its service life, selection of suitable materials in accordance with environmental conditions, the best proportion of concrete mixture and sufficient curing after casting are the most important steps to pay attention.

Ingredients of concrete should be selected according to their participation in durability. Pozzolanic materials, most of which are by products of industries, are widely used in concrete production, especially to increase the durability properties. Pozzolanic materials react with $\text{Ca}(\text{OH})_2$, generated during the hydration of C_3S and C_2S components of cement, to form calcium silicate hydrate (C-S-H), hence reduce a weak part of concrete against durability. Furthermore, pozzolans improve the impermeability of concrete which is the main parameter affecting the durability of concrete.

In this experimental research, two series of concrete incorporated with fly ash and silica fume were produced. The statistical program of 'Central Composite Design' was used to design experiments and to analyze the testing results. In each series, total binder content, water/binder ratio and poz-

zolan/binder ratio were chosen as independent variables and the ranges of the variables were adjusted according to the properties of pozzolanic material and to obtain certain workability for all concretes. The range of the factors were selected between 300-400 kg/m^3 for binder content, 0.48-0.58 (when silica fume was used) or 0.46-0.60 (when fly ash was used) for water/binder ratio and 0.03-0.12 for silica fume/binder ratio or 0.10-0.40 for fly ash/binder ratio. For each series of concretes, the total number of batches was 20. Lime saturated water curing was applied over the half of the specimens, cast to measure compressive strength and permeability, while the remaining ones were stored in air at laboratory conditions for 90 days. In addition to the compressive strength test, rapid chloride permeability test was conducted in accordance with ASTM C 1202. Test results were analyzed and evaluated by using ANOVA (Analysis of Variance). Statistical models are derived for each measured concrete property in two curing conditions by means of three independent components of concrete. Influence of selected mixture parameters on compressive strength and chloride permeability was evaluated by using the test results.

It has been found that total binder content of fly ash added concretes was not influential on the compressive strength and chloride penetration. On the other hand, increasing binder content reduced the overall performance of silica fume added concretes because of the higher porosity of cement paste than that of aggregate. It was also seen that the optimum supplementary cementing material contents determined to obtain the minimum chloride permeability are shifted to higher values for the fly ash added concretes under the proper curing conditions rather than storing in air. However, the optimum percentages of the silica fume added concretes cured under both conditions are not changed. Besides, it is found that RCPT method can be employed to make comparisons for all of the air stored concretes produced with or without supplementary cementing material (SCM). However, for water cured SCM added specimens this method can be used for only internal comparisons, it is not appropriate to compare the chloride permeability of OPC concretes with those of pozzolan added concretes.

Keywords: Fly ash, silica fume, curing conditions, statistical analysis, central composite design.

Giriş

Beton, sadece binalarda değil, köprü, liman, açık-deniz platformları gibi ağır çevre koşulları altında bulunacak yapıların da inşasında kullanılan temel bir yapı malzemesidir. Bundan dolayı, birçok uygulamada yaklaşık yüz yıllık bir hizmet süresi sağlayan dayanıklı betonlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde inşaat teknolojisinin sürdürülebilmesi için yüksek oranlarda puzolanik malzeme kullanılması gerektiği genel olarak kabul edilmiştir (Mehta, 1997). Betonda mineral katkıların kullanılmasıyla hidrasyon ısısı azalır, ileri yaşlarda dayanım artar, işlenebilirlik gelişir (silis dumanı dışında), dayanıklılık artar ve atık malzemeler kullanıldığı için hem çevresel açıdan hem de maliyet bakımından önemli derecede fayda sağlanır.

Büyük bir çoğunluğu endüstriyel yan atık ürünlerden oluşan puzolanlar, betonların özellikle dayanıklılık özelliklerinin geliştirilmesi için yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Doğal puzolanların yanında, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı beton teknolojisinde olduğu gibi çimento üretiminde de en çok kullanılan puzolanlardır. Beton ve çimento teknolojisinde puzolan kullanımı, kazandırdığı tüm özelliklerin yanında CO₂ emisyonunun da azalmasını, böylece kalkınmanın sürdürülebilirliğini sağlamaktadır.

Bilindiği gibi, çimentonun C₂S ve C₃S bileşenlerinin hidrasyonu sırasında esas hidrasyon ürünü kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) yanında, betonun en zayıf kısmını oluşturan Ca(OH)₂ de açığa çıkar. Puzolanlar işte bu zayıf kısım ile reaksiyona girerek hem kendi bağlayıcılık özelliğini kazanır, hem de daha yoğun ve dayanıklı beton elde etme olanağı sağlar.

Betonun kürl edilmesi (bakımı) dayanım ve dayanıklılık özelliklerini etkilemektedir. Neville'e (1993) göre beton içerisindeki bağıl nem % 80'in altına inerse çimento ile su arasındaki reaksiyon sonlanmaktadır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalardan birinde, 6 ay boyunca su içerisinde kür edilen Tip I çimento ile üretilmiş betonların bu süre içerisinde havada tutulması durumunda ba-

sınç dayanımlarında % 58 azalma görüldüğü belirtilmiştir (Price, 1951). Bir başka çalışmada ise yine tip I çimento kullanılarak üretilen ve 5 yıl boyunca su içerisinde saklanan numunelerde sürekli bir dayanım artışı görülürken, su kürü uygulanmayan betonlar 5 yılın sonunda 28 günlük dayanımlarında kalmışlardır (Wood, 1991). Aitcin ve diğerleri (1994) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise 1 yaşındaki havada saklanmış numunelerden elde edilen dayanımların suda saklananlara göre % 17-22 arasında daha düşük olduğu görülmüştür.

Puzolan ilave edilerek veya puzolanik çimentolar kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımına kür koşullarının etkisinin daha fazla olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bunlardan birinde, hava ve su küründe tutulmuş, % 25 yüksek fırın cürufu ikamesiyle üretilen betonların basınç dayanımlarında % 38, % 50 cüruf veya en az % 25 uçucu kül ikame edilerek üretilenlerin dayanımlarında ise % 50'ye kadar azalma görülmüştür (Ramezianpour ve Malhotra, 1995). Bir diğer çalışmada ise, iki ay boyunca su içinde saklanan ve normal portland çimentosu kullanılarak üretilen betonların dayanımlarına traslı çimento ile sadece ilk 14 gün su içerisinde kür edilerek ulaşılmıştır (Özer ve Özkul, 2004).

Beton içerisine klorür iyonu girişi genellikle deniz suyu veya buz çözücü tuzlar nedeniyle gerçekleşir. Beton paspayının karbonatlaşmasının yanında, klorür iyonlarının gömülü çelik donatıya kadar ulaşarak üzerindeki pasivasyon tabakasına hasar vermesi korozyona neden olur. Mineral katkıların çimentonun bir bölümü yerine kullanılmasının klorür girişine karşı sağladığı faydalarla ilgili olarak birçok çalışma yayınlanmıştır. Gu ve diğerleri (2000), % 55 oranında yüksek fırın cürufu ve özellikle % 10 oranında silis dumanı içeren betonların klorür geçirimliliklerinin toplam geçen akım cinsinden önemli ölçüde azaldığını göstermişlerdir.

Malzemeler ve deney yöntemi

Çimento olarak CEM I 42.5 normal portland çimentosu, uçucu kül olarak Tunçbilek külü ve ELKEM marka silis dumanı kullanılmıştır.

Tunçbilek uçucu külü TS EN 197-1 sınıf V (silisli uçucu kül) sınırlarını, % 10'dan küçük olan reaktif CaO ve % 25'ten fazla olan reaktif SiO₂ içeriği ile karşılamaktadır. Bunun yanında, toplam % 70'den fazla SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ içermesinden dolayı ASTM C 618 (2003) F tipi uçucu külü sınıfına girmektedir. Silis dumanı, yoğunlaştırılmış (densified) şeklinde olduğundan görünen inceliği düşüktür. Çimento, uçucu kül ve silis dumanının özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimento, uçucu kül ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

		Çimen- to	Uçucu kül	Silis dumanı
Fiziksel özellikler	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.17	2.24	2.24
	45µ'dan geçen	91.6	93.4	25.0
	İncelik (%)			
	Özgül yüzey (cm ² /g)	3560	5350	1010 (20100)
	Basınç Dayanımı (MPa)	28.6	-	-
	7-gün	44.0	-	-
	28-gün	55.2	-	-
	Priz süresi (s:dak)	2:37	-	-
	Bitme	3:08	-	-
	Dayanım aktivite indeksi (%)	-	101.3	-
		113.8	-	
Kimyasal özellikler	Silisyumdioksit (SiO ₂)	20.41	59.29	92.48
	Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)	4.72	16.76	0.38
	Ferrik oksit (Fe ₂ O ₃)	3.70	10.97	0.69
	Kalsiyum oksit (CaO)	65.08	3.06	0.77
	Magnezyum oksit (MgO)	0.92	5.43	1.16
	Sülfür trioksit (SO ₃)	2.56	0.60	0.21
	Sodyum oksit (Na ₂ O)	0.34	0.74	0.85
	Potasyum oksit (K ₂ O)	0.81	1.80	0.78
	Serbest kireç	1.20	0.00	0.00
	Kızdırma kaybı (%)	1.39	0.02	2.11
	Bogue karna oksitleri			
	C ₃ S	60.57	-	-
	C ₂ S	12.91	-	-
C ₃ A	6.26	-	-	
C ₄ AF	11.26	-	-	

İnce agrega olarak, sırasıyla 2.60 kg/dm³ ve 2.70 kg/dm³ tane yoğunluklarına sahip doğal ve kırma kum, iri agrega olarak 25 mm maksimum boyutlu ve 2.72 kg/dm³ tane yoğunluklu kırma taş I ve II kullanılmıştır. Kimyasal katkı olarak polikarboksilat esaslı bir süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Agrega karışım oranları ve taze beton kıvamları sabit tutulmuş, kıvamı sağlamak için kimyasal katkı dozajları değiştirilmiştir.

Bu çalışmada "Merkezi Kompozit Tasarım" (MKT) adında bir istatistiksel yöntem kullanılmıştır. Karışım parametrelerinden toplam bağlayıcı miktarı (x_1), su/bağlayıcı oranı (x_2) ve uçucu kül(veya silis dumanı)/bağlayıcı oranı (x_3) olmak üzere üç adet bağımsız değişken seçilmiştir. Üretilen betonların özellikleri havada ve suda kür edilmesi durumu için ayrı ayrı incelenmiştir. Bağımsız değişkenlerin sınırları sırasıyla x_1 ; 300 kg/m³ – 400 kg/m³, x_2 ; uçucu kül kullanıldığında 0.46 – 0.60, silis dumanı kullanıldığında 0.48 – 0.58, x_3 ise uçucu kül için 0.10 – 0.40, silis dumanı için 0.03 – 0.12 olarak belirlenmiştir. Sayısal değişkenlerin aralıkları ve kodlanmış değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Araştırmada üretilecek karışımların sayısı şu kurala göre belirlenir; k=3 adet bağımsız değişken için her değişkenin sınır değerlerinin tüm kombinasyonlarını temsil eden $2^k=8$ adet faktöryal nokta, her bir değişkenin merkez noktasından $\pm\alpha$ kadar uzaklıkta iken diğerlerinin merkezde olduğu $2k=6$ adet "eksen" noktası ve deneysel hatanın belirlenmesi amacıyla merkez noktasının 6 kere tekrarlanmasından meydana gelen toplam 20 adet karışımdan oluşur.

Tüm karışımlar rastgele sıralandıktan sonra her bir karışım 40 dm³ hacmindeki karıştırıcıda hazırlanmıştır. Yeterli işlenebilirlik için 16±2 cm çökme değeri esas alınmış ve akışkanlaştırıcı katkı dozajı buna bağlı olarak değiştirilmiştir. Yerleştirilirken vibrasyon uygulanan numuneler kalıplardan söküldükten sonra iki gruba ayrılarak yarısı 23±2°C sıcaklığındaki kirece doymun su içerisinde, diğer yarısı laboratuvar koşullarında (% 65±5 B.N. ve 22±2°C sıcaklıkta) havada 90 gün boyunca saklanmıştır. Numuneler klorür geçirimsizliği deneyleri için 10 x 20 cm'lik silindir, basınç dayanımı deneyleri için 15 x 15 x 15 cm boyutlu küp şeklinde hazırlanmıştır. ASTM C 1202 standardına göre hızlandırılmış klorür geçirimsizlik deneyleri uygulanmıştır. Toplam 6 saat süren deney sonunda numuneden geçen toplam akım, akım-zaman grafiği altında kalan alan hesaplanarak (Coulomb) belirlenmiştir.

Deney sonuçları ve değerlendirme

Deneylerde ölçülen 90 günlük basınç dayanımı ve toplam geçen akım miktarı (ASTM C 1202)

Tablo 2. Silis dumanı ve uçucu kül katkılı betonlar için belirlenen değişkenler ve değişim aralıkları

Değişken		Kodlanmış değerler				
		-1.68	-1	0	1	1.68
x_1	Toplam bağlayıcı (kg/m ³)	266	300	350	400	464
x_2	S/B silis dumanlı karışımlarda	0.45	0.48	0.53	0.58	0.61
	S/B uçucu küllü karışımlarda	0.41	0.46	0.53	0.60	0.65
x_3	SD/B (%)	0	3	7,5	12	15
	UK/B (%)	0	10	25	40	50

S: Su, SD: Silis dumanı, UK: Uçucu kül

için regresyon denklemleri; toplam bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı ve puzolan/bağlayıcı oranı olarak belirlenen bağımsız değişkenler cinsinden bulunmuştur. Bu çalışmada, istatistiksel tasarım ve analiz için hazır bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Kullanılan istatistiksel analiz programı, değişkenlerin, özellik üzerinde anlamlı bir etkisinin olup olmadığını varyans analizi (ANOVA) yaparak belirlemede, ayrıca her bir ölçülen özelliğin bileşim parametreleri cinsinden yüzey denklemlerini çıkararak grafiklerini çizmektedir.

Silis dumanı içeren karışımlar

Havada ve suda saklanan karışımlara ait bileşim parametreleri ve deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Kalıptan çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında açıkta saklanan numunelerin hızlı klorür geçirimsizliklerinin, 90 gün süresince suda saklanan numunelere kıyasla 1.04 – 3.4 kat yükseldiği ve 90 günlük basınç dayanımlarının % 2.4 – % 13.4 oranında azaldığı anlaşılmaktadır. Hızlı klorür geçirimsizliklerinin diğer beton özelliklerine nazaran kür koşullarına daha duyarlı olması, su kürünün boşluk miktarı ve yapısını olumlu anlamda geliştirmesinin yanında – özellikle puzolan katkılı betonlarda – betonun elektriksel direncinin de önemli oranda artmasından kaynaklanmaktadır (Shi vd., 1998; Shi, 2004).

Su kürü uygulanan karışımlarda incelenen özellikler büyükten küçüğe sıralandığında, üretilen karışımlardan silis dumanı içermeyen betonun basınç dayanımı 44.7 MPa ile tüm karışımlar arasında orta değer üzerinde yer alırken aynı betonun geçirimsizlik değerleri ve toplam boşluk oranı ya en kötü ya da en kötülerden biri olarak göze çarpmaktadır. Başka bir deyişle, basınç dayanımı silis dumanı içermeyen betondan dü-

şük olan birçok SD katkılı betonun geçirimsizliği daha yüksek elde edilmiştir. Buna göre, dayanıklı bir beton üretmek için mutlaka yüksek dayanıma sahip olması gerektiği veya her yüksek dayanıma sahip betonun dayanıklı olmayabileceği burada bir daha ortaya çıkmıştır.

Tablo 3. SD katkılı beton karışımlarına ait bileşim, 90 günlük basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları

	Karışım bileşenleri			Deney sonuçları			
	Bağlayıcı (kg/m ³)	S/B	SD/B	90 gün dayanım (MPa)		HKG (Coulomb)	
				hava	su	hava	su
1	350	0.45	0.075	49.0	50.9	448	431
2	350	0.53	0.075	37.6	42.1	2033	783
3	350	0.61	0.075	37.5	41.3	3966	1168
4	434	0.53	0.075	49.6	53.2	1848	719
5	350	0.53	0.075	39.0	42.0	2154	736
6	400	0.58	0.03	40.0	44.1	4295	2488
7	400	0.48	0.12	47.4	49.9	1224	424
8	350	0.53	0.15	39.5	42.7	1063	361
9	300	0.58	0.03	37.9	40.9	4829	1784
10	350	0.53	0.075	38.4	41.8	2179	710
11	400	0.58	0.12	41.1	42.4	2403	957
12	350	0.53	0.075	42.4	44.9	2259	776
13	300	0.58	0.12	41.6	43.9	1330	431
14	400	0.48	0.03	45.1	48.1	2804	1755
15	350	0.53	0.075	40.4	43.0	2120	701
16	350	0.53	0.075	41.1	42.2	2159	792
17	350	0.53	0	38.7	44.7	4501	3188
18	266	0.53	0.075	52.1	53.4	778	378
19	300	0.48	0.12	47.7	49.2	644	256
20	300	0.48	0.03	48.1	51.4	1569	686

HKG: Hızlı Klorür Geçirimsizliği ASTM C 1202

İstatistiksel değerlendirme- Laboratuvar ortamında havada tutulan, kür uygulanmayan SD katkılı betonların varyans analizi sonuçları Tablo 4'te görülmektedir. Tabloda verilen varyans analizinde hesaplanan Prob>F değerinin

0.05'ten küçük olması halinde o değişkenin anlamlı, yani deney sonucu üzerinde etkili olduğu anlaşılmalıdır. Anlamlı değişkenler tabloda koyu renkte yazılmıştır. Modellerde anlamlı olmayan parametreler modelin anlamlılığını artırmak amacıyla denklemden çıkarılmıştır; ancak kendi başına anlamlı olmasa da diğer parametrelerle etkileşim içerisinde olanlara dokunulmamıştır.

Kür koşullarının beton özellikleri üzerinde anlamlı parametre sayısını ve çeşidini bir istisna dışında değiştirmedeği Tablo 4'te görülmektedir. Varyans analizi sonuçlarına göre, toplam bağlayıcı miktarı (x_1) klorür geçirimsizliği üzerinde tek başına ve doğrusal olarak etkili iken basınç dayanımı üzerinde ikinci dereceden (x_1^2) etkili olmuştur. Su/bağlayıcı oranı (x_2) beklendiği üzere iki özellik üzerinde de birinci derecede ve yüksek oranda etkili bulunmuş ($Prob>F < 0.0001$), buna ek olarak ikinci derece halinin basınç dayanımı üzerinde etkisi saptanmıştır. Bundan başka, S/B oranının HKG üzerinde, silis dumanı/bağlayıcı oranı (x_3) ile birlikte etkileşim halinde etkisi görülmüştür.

SD/B oranının basınç dayanımı üzerinde etkisiz fakat HKG üzerinde hem birinci hem de ikinci derece halleriyle çok yüksek düzeyde etkili olduğu belirlenmiştir. Puzolan miktarının HKG deneyi üzerinde görülen ve diğer geçirimsizlik özelliklerine oranla yüksek olan etkisinin, beton boşluk suyu kimyasında yaptığı değişikliklerden kaynaklandığı bilinmektedir (Lui ve Beaudoin, 2000). Ayrıca yine aynı deneyde havada sakla-

nan betonlarda silis dumanının etkisinin azalmaması, silis dumanının yüksek reaktivitesi nedeniyle çimentonun hidrasyon reaksiyonunu – silis dumanı içermeyenlere kıyasla – hızlandırmasından kaynaklandığı söylenebilir (Diamond, 1983; Christensen vd., 1992).

Beton bileşenlerinin anlamlılıklarını belirlemede varyans analizi sonuçları son derece faydalı olsa da beton özelliğini ne yönde değiştirdiği anlaşılammaktadır. Diğer taraftan elde edilen regresyon denklemlerindeki faktörlerin farklı mertebelerde olması nedeniyle katsayılara bakarak etkinliklerini değerlendirmek de doğru olmayacaktır.

Bu nedenle beton bileşenlerinin etkinliklerinin dereceleri ve yönlerini birlikte değerlendirmek için Tablo 4'te verilen varyans analizi sonuçlarıyla Tablo 5'te verilen modellerin katsayılarının bir arada göz önüne alınması en doğru yaklaşım olacaktır. Buna göre, toplam bağlayıcı miktarının artışı (ikinci dereceden ve ikili etkileri de hesaba katılınca) beton özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. İncelenen beton dayanımlarının çok yüksek sınıflarda olmaması nedeniyle agrega fazına göre (boşluk yapısı, geçirimsizliği ve dayanımı açısından) daha düşük düzeyde olan matris fazı miktarındaki artışının beton özelliklerini olumsuz şekilde etkilemesi anlaşılabilir.

S/B oranındaki artışların beklendiği üzere toplam bağlayıcı miktarından çok daha yüksek dere-

Tablo 4. SD katkılı betonlar için varyans analizi sonuçları

Değişken	Basınç Dayanımı				HKG			
	Hava kürü ($R^2=0.88$)		Su kürü ($R^2=0.88$)		Hava kürü ($R^2=0.93$)		Su kürü ($R^2=0.90$)	
	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F
Model	37.25	< 0.0001	36.10	< 0.0001	42.54	< 0.0001	45.15	< 0.0001
x_1	1.02	0.3289	0.052	0.8223	10.87	0.0058	11.93	0.0035
x_2	64.63	< 0.0001	64.47	< 0.0001	98.94	< 0.0001	18.43	0.0006
x_3	-	-	-	-	117.86	< 0.0001	114.05	< 0.0001
x_1^2	80.49	< 0.0001	77.90	< 0.0001	7.40	0.0175	-	-
x_2^2	6.24	0.0246	4.81	0.0445	-	-	-	-
x_3^2	-	-	-	-	9.56	0.0036	36.17	< 0.0001
$x_1 * x_2$	-	-	-	-	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	8.96	0.0104	-	-

ceden olumsuz etkisi görülmüştür. Bağlayıcı içerisindeki silis dumanı miktarının artış etkisi ise biraz karmaşıktır. Basınç dayanımı üzerinde hiçbir etkisi görülmediğinden dolayı ilgili modelden çıkarılmıştır. HKG deneyinde ise silis dumanı artışı her bir kür koşulunda birbirine zıt şekilde etki göstermiştir. Havada saklanan numunelerde puzolanik reaksiyonun tamamlanmamasından dolayı artan silis dumanının S/B oranı mertebesinde etkisi varken aynı betonların suda saklananlarında S/B oranının etkisi beşte birine (katsayılarıdaki değişim) düşmüş, SD/B oranı etkisi merite değiştirmeden yön değiştirmiştir. Yani, su kürü uygulanan betonlarda SD/B oranındaki artışın HKG deneyinde belirlenen toplam geçen akım miktarlarını önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür.

Tablo 5. SD katkılı beton karışımlarına ait 90 günlük basınç dayanımı ve HKG modellerinden elde edilen fonksiyon katsayıları

Değişken	Basınç Dayanımı		HKG	
	Hava	Su	Hava	Su
Sabit	377.9	337.6	-25497	-1585
x_1	-1.051	-0.95	74.15	4.45
x_2	-508.37	-420.45	30378	5533
x_3	-	-	42255	-42993
x_1^2	1.5×10^{-3}	1.4×10^{-3}	-0.097	-
x_2^2	414.6	336.6	-	-
x_3^2	-	-	1.4×10^5	1.8×10^5
$x_1 * x_2$	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-1.6×10^5	-

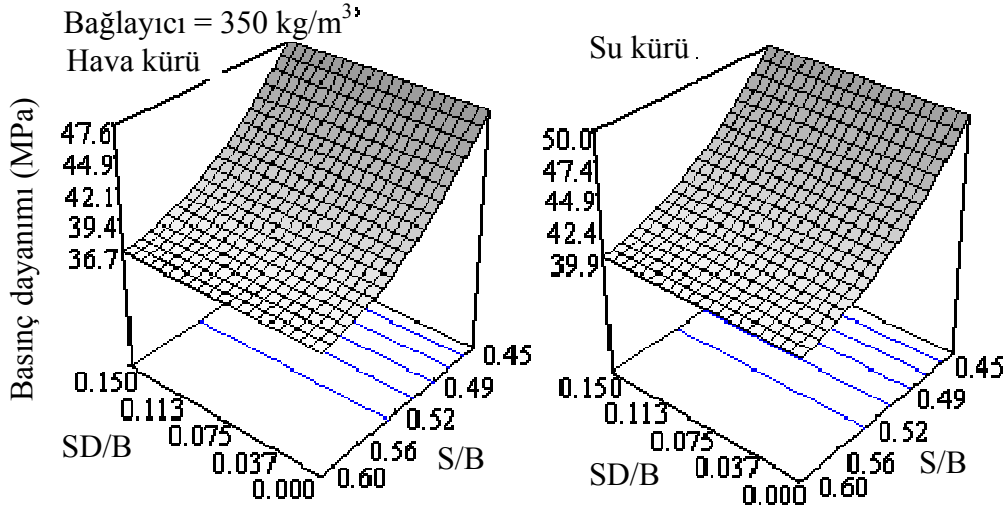
Basınç dayanımı- Kür koşullarının silis dumanı katkılı betonların 90 günlük dayanımları üzerindeki etkisi Şekil 1'de görülmektedir. Her iki kür koşulunda da dayanım yüzeylerinin karakteri birbirine benzemektedir; ancak su küründe dayanım düzeyleri daha yüksektir. Havada saklanan ve S/B oranı 0.60 olan betonlara su kürü uygulandığında basınç dayanımları bağlayıcı miktarına bağlı olarak yaklaşık % 6.4-9 oranında artarken S/B oranı 0.45 seviyesine düşürüldüğünde dayanım artışı % 3-5'e kadar düşmüştür. Yüksek dayanıma sahip, düşük S/B oranı ile üretilen betonlarda dökümden itibaren ilk birkaç günde kazanılan dayanımın nihai dayanıma oranının, düşük ve normal dayanımlı betonların oranlarına göre daha yüksek olduğu

bilinmektedir. Düşük dayanımlı betonlarda 7/28 günlük basınç dayanım oranı yaklaşık % 70 iken yükselen basınç dayanımıyla birlikte bu oranın ortalama % 80 seviyesine çıkması hatta çok yüksek dayanımlı betonlarda daha da artması buna örnek olarak verilebilir. Düşük S/B oranlı (yüksek dayanımlı) betonlarda bu nedenle hem erken dayanım yüksekliği, hem de bu yüksek dayanımlı betonların yoğun ve boşluksuz yapısının beton karma suyunun buharlaşmasını engellemesi nedeniyle, yüksek S/B oranlılara kıyasla daha fazla suyun hidrasyonda kullanılarak suda saklananlarla havada tutulanlar arasındaki dayanım farkının azalması beklenen bir sonuçtur. Buna ek olarak düşük S/B oranlı betonlarda çimento tanelerinin yüksek S/B oranlılara göre daha yakın bulunması ve havada tutulan betonların kuruma sırasında gerçekleşen hidrasyonda daha kısa sürede dolu bir yapı oluşturması, yetersiz kür uygulanan betonlarda S/B oranının etkisini arttıran bir başka unsurdur. Bu nedenle havada tutulan betonlarda S/B oranındaki azalma dayanımda daha dik bir artışa neden olarak yüksek dayanımlı betonlarda hava kürü ile su kürü uygulanan betonların basınç dayanım oranlarını azaltmaktadır. Ayrıca Şekil 1'e bakıldığında silis dumanı/bağlayıcı oranının dayanım üzerinde neredeyse etkisinin olmadığı, kür koşullarının ve su/bağlayıcı oranının esas olarak etkin olduğu anlaşılmaktadır.

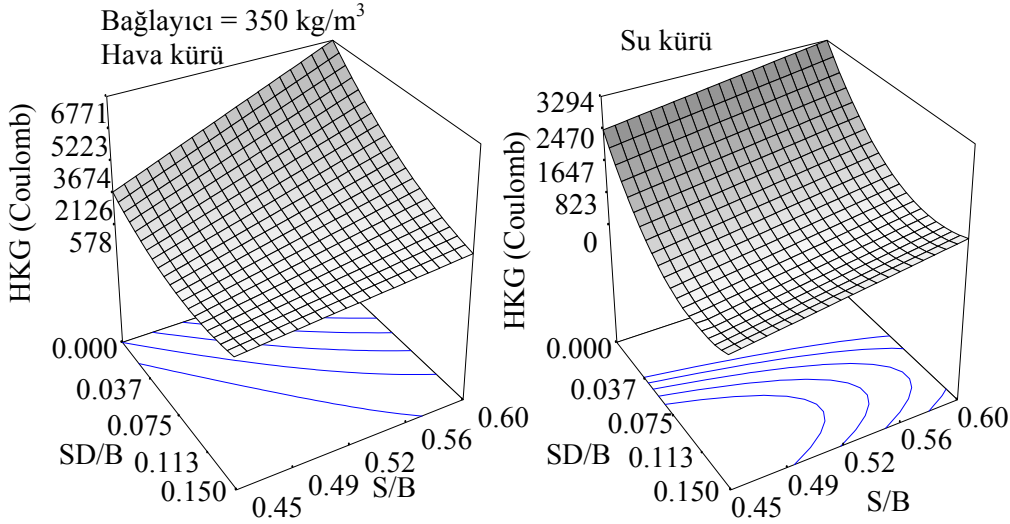
Hızlı klorür geçirimliliği- Tablo 5'te katsayıları verilen modeller aracılığı ile 350 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonlar için çizilen grafikler ise Şekil 2'de görülmektedir.

Varyans analizi sonuçlarında da görüldüğü gibi hızlı klorür geçirimliliği deneyinde silis dumanının etkisi hem bağlayıcı miktarı, hem de S/B oranı etkisinden çok daha yüksek bulunmuştur. Su/bağlayıcı oranının en etkili görüldüğü betonların havada saklanan ve silis dumanı içermeyen karışımlar olduğu, Şekil 2'de görülen grafiğin eğiminden de anlaşılmaktadır.

Suda saklanan ve SD içermeyen betonlarda S/B oranının 0.60'tan 0.45'e düşürülmesi halinde toplam geçen akım değerleri yaklaşık % 25 oranında azalırken havada saklananlarda azalma % 70'lere ulaşmaktadır. Bu durum, yukarıda da



Şekil 1. İki kür koşulunda 350 kg/m^3 bağlayıcı içeren silis dumanı katkılı betonların SD/B ve S/B oranlarının basınç dayanımına etkisi



Şekil 2. İki kür koşulunda 350 kg/m^3 bağlayıcı içeren silis dumanı katkılı betonların SD/B ve S/B oranlarının klorür geçirimsizliğine etkisi

anlatıldığı gibi düşük S/B oranına sahip betonların daha yavaş kuruması dolayısıyla, hidrasyon reaksiyonu nispeten daha hızlı olan sadece portland çimentosu ile üretilen betonlarda kuruma süresince daha fazla hidrate ürün ve bunun sonucu olarak daha boşluksuz içyapı oluşmasından kaynaklanmaktadır.

Silis dumanlı betonlarda ise SD miktarının etkili olduğu, özellikle su kürü uygulanan betonlarda bir optimum değere kadar artan silis dumanının S/B oranından bağımsız bir şekilde hızla Coulomb değerlerini düşürdüğü görülmektedir.

Suda saklanan betonlarda görülen yaklaşık % 11-12 seviyesindeki optimum SD/B oranının havada saklananlarda % 15'lere kadar belirgin bir şekilde görülmemesi, puzolanik reaksiyon sonucu sağlanan beton iç yapısındaki doluluğun doldurma etkisiyle temin edilmeye çalışılmasına dayandırılabilir. Diğer taraftan HKG deney yönteminin beton elektriksel direncinden yola çıkarak klorür geçirimsizliğini belirlemesi nedeniyle, beton içerisindeki iyon konsantrasyonu deney sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir (Scanlon ve Sherman, 1996). Hatta bazı çalışmalarda (Feldman vd., 1994) elektrik akımını

mutlaka klorür iyonlarının taşınmasına gerek olmadığı, farklı çözeltilerle de benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır. Bu noktadan yola çıkarak 350 kg/m³ bağlayıcı içeren ve 90 gün boyunca havada saklanan betonlardan 0.45 S/B oranına sahip, SD içermeyen numunelerle 0.60 S/B oranına sahip numunelerin aynı miktarda akım geçirilmesi için toplam bağlayıcının % 13'ü oranında SD gerekliken aynı kriterler suda saklanan numunelere uygulandığında % 2.3 silis dumanının yeterli olduğu görülmüştür. Bu durum, özellikle silis dumanı olmak üzere genelde tüm puzolanların uygun şekilde kür edilmesi halinde beton elektriksel direncini büyük oranda düşürerek HKG deney sonuçlarını azalttığını göstermektedir.

Uçucu kül içeren karışımlar

Tablo 6'da verilen deney sonuçlarına göre, kaptan çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında havada saklanan numunelerin, hızlı klorür geçirimsizliklerinin, 90 gün süresince suda saklanan numunelere kıyasla, 1.5–15 kat yükseldiği, 90 günlük basınç dayanımlarının ise % 2.0–% 14.4 oranında azaldığı anlaşılmaktadır. Uçucu külün reaktivitesinin silis dumanına göre daha düşük olması nedeniyle sağladığı fayda büyük oranda ileri yaşlarda gerçekleşen puzolanik reaksiyonla ortaya çıkmaktadır. Puzolanik reaksiyonun da ortamın nemine son derece duyarlı olmasından dolayı suda saklanan numunelerle havada saklanan numuneler arasındaki farkların daha çok arttığı görülmüştür. Özellikle HKG deneyinde, iki farklı kür koşulunda saklanan ve bağlayıcı miktarının yarısını uçucu külün oluşturduğu betonlarda bu fark 15 kata kadar çıkabilmektedir.

İstatistiksel değerlendirme- Varyans analizi sonuçlarına göre (Tablo 7), laboratuvar ortamında açıkta saklanan betonların toplam bağlayıcı miktarları (x_1), tek başına ve doğrusal olarak etkisiz, ikinci derece hali basınç dayanımı üzerinde etkili olmuştur. Ayrıca, aynı parametrenin sadece S/B oranı ile etkileşim içinde basınç dayanımına etki ettiği görülmüştür.

Su/bağlayıcı oranı (x_2) incelenen beton özelliklerini seçilen diğer bileşim parametreleri arasında en yüksek oranda ($Prob>F < 0.0001$) doğrusal olarak etkilemiştir (ikinci derece etki göz-

lenmemiştir). Uçucu kül/bağlayıcı oranının (x_3) ise basınç dayanımını daha çok doğrusal ama aynı zamanda ikinci dereceden, HKG'yi sadece ikinci dereceden etkilediği belirlenmiştir.

Tablo 6. UK katkılı beton karışımlarına ait bileşim, 90 günlük basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları

Karışım bileşenleri				Deney sonuçları			
Bağlayıcı (kg/m ³)	S/B	SD/B	90gün da- yanım (MPa)	HKG (Coulomb)			
				hava	su	hava	su
1	300	0.46	0.40	56.2	58.0	1133	207
2	350	0.53	0.25	46.9	50.2	2874	527
3	350	0.53	0.25	47.7	51.2	2637	456
4	350	0.53	0.25	46.7	53.4	2346	527
5	266	0.53	0.25	51.8	53.5	2448	554
6	434	0.53	0.25	55.5	58.6	1612	460
7	300	0.60	0.10	43.3	45.9	3567	1103
8	400	0.60	0.40	39.6	42.8	4869	622
9	300	0.46	0.10	57.3	59.5	959	662
10	300	0.60	0.40	40.9	45.6	4251	406
11	400	0.46	0.10	54.2	63.3	2719	985
12	350	0.65	0.25	43	47.7	5122	709
13	350	0.53	0.25	50.1	53.7	2327	480
14	400	0.46	0.40	50.2	52.3	1421	229
15	350	0.41	0.25	62.2	63.5	693	260
16	350	0.53	0.25	51	57.2	2829	500
17	350	0.53	0.25	51.1	56.5	2651	507
18	350	0.53	0.00	50.1	51.8	4271	2020
19	350	0.53	0.50	41.5	45.6	3877	258
20	400	0.60	0.10	50.2	51.6	4663	1316

HKG: Hızlı klorür geçirimsizliği ASTM C 1202

Su içerisinde tutulan betonlarda da toplam bağlayıcı miktarı (x_1) basınç dayanımı üzerinde doğrudan etkili olmazken UK/B oranı (x_3) ile birlikte ikili etkinliği ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan havada tutulan betonların basınç dayanımında etkin görünen x_1^2 , su kürü uygulandığında ortadan kaybolmuştur. Varyans analizi sonucunda elde edilen modellerin katsayıları Tablo 8'de verilmiştir.

Basınç dayanımı- Uygun kür koşulları sağlanamayan betonlarda UK/B oranının 90 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi Şekil 3'te sunulmuştur. Hem yalın betonda hem de yüksek oranda UK içeren betonda 400 kg/m³ bağlayıcı kullanılması durumunda, S/B oranında gerçekleşecek birim değişimin basınç dayanımı üzerinde

Tablo 7. UK katkıli karışımlar için varyans analizi sonuçları

Değişken	Basınç Dayanımı				HKG			
	Hava kürü ($R^2=0.87$)		Su kürü ($R^2=0.86$)		Hava kürü ($R^2=0.84$)		Su kürü ($R^2=0.92$)	
	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F
Model	16.75	< 0.0001	24.13	< 0.0001	34.87	< 0.0001	70.29	< 0.0001
x_1	0.12	0.7385	1.39	0.2588	-	-	-	-
x_2	91.78	< 0.0001	82.22	< 0.0001	90.56	< 0.0001	20.93	0.0003
x_3	16.76	0.0018	15.50	0.0015	0.21	0.6520	144.36	< 0.0001
x_1^2	5.20	0.0435	-	-	-	-	-	-
x_2^2	2.64	0.1322	-	-	-	-	-	-
x_3^2	6.84	0.0240	13.18	0.0027	13.83	0.0019	29.29	0.0008
$x_1 * x_2$	5.83	0.0343	-	-	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	3.33	0.0955	8.36	0.0119	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	-	-	-	-

300 kg/m³ bağlayıcı içeren betonlar kadar etkili olmadığı Şekil 3'te görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0.60'tan 0.45'e düşürülmesiyle 400 kg/m³ bağlayıcı içeren betonların basınç dayanımları % 16 – 19, 300 kg/m³ bağlayıcı içerenlerin basınç dayanımları ise % 37 – 39 oranında yükselmiştir. Beton karma suyunun bir miktarının agrega yüzeyini ıslatmak için kullanıldığı düşünüldüğünde ve 300 kg/m³ bağlayıcı betonlarda daha fazla agrega bulunması nedeniyle daha fazla suyun bu amaçla kullanıldığı hesaba katıldığında, düşük dozajlı betonlardaki S/B oranı değişiminin basınç dayanımı üzerinde görülen yüksek orandaki etkinliği anlaşılabilir.

Tablo 8. UK katkıli beton karışımlarına ait 90 günlük basınç dayanımı ve HKG modellerinden elde edilen fonksiyon katsayıları

Değişken	Basınç Dayanımı		HKG	
	Hava	Su	Hava	Su
Sabit	287.08	62.37	-6247	606
x_1	-0.59	0.089	-	-
x_2	-462.85	-77.17	19422	2217
x_3	81.80	135.74	-11829	-7625
x_1^2	5.17×10^{-4}	-	-	-
x_2^2	188.12	-	-	-
x_3^2	-65.88	-92.74	22782	9816
$x_1 * x_2$	0.525	-	-	-
$x_1 * x_3$	-0.185	-0.3	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-

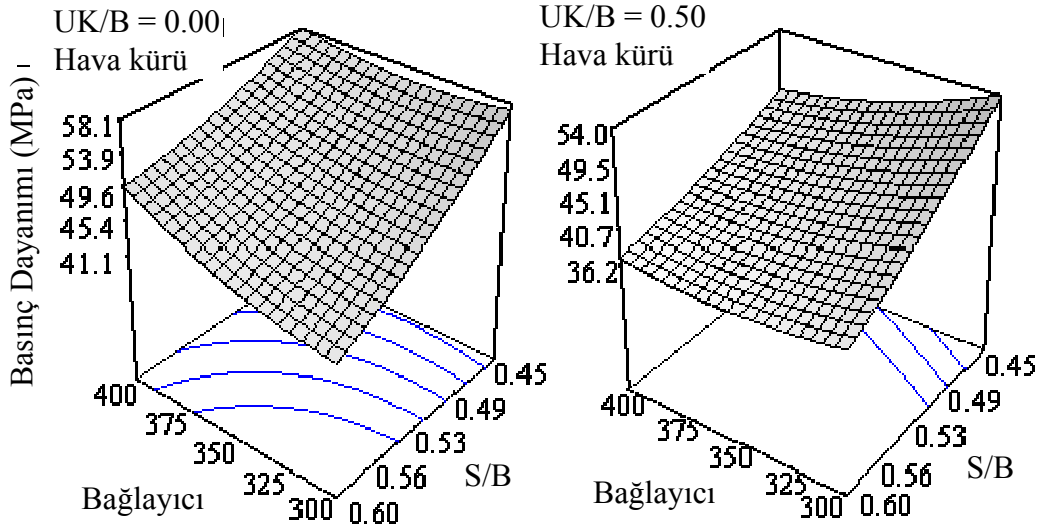
Diğer taraftan, yüksek S/B oranına sahip betonlarda bağlayıcı fazın agregaya göre daha boşluklu olması nedeniyle artan bağlayıcı miktarının

basınç dayanımını düşürmesi beklenen bir durumdur. Düşük S/B oranı ile üretim yapıldığında bu etki Şekil 3'teki yalın betonlarda görüldüğü gibi kaybolabilmektedir. Ancak, toplam bağlayıcının yarısı UK'dan meydana geliyorsa, hidrate olmamış UK miktarının en az olduğu durum, yani en düşük bağlayıcı miktarı ile üretim yapmak basınç dayanımı açısından en uygun çözüm olacaktır.

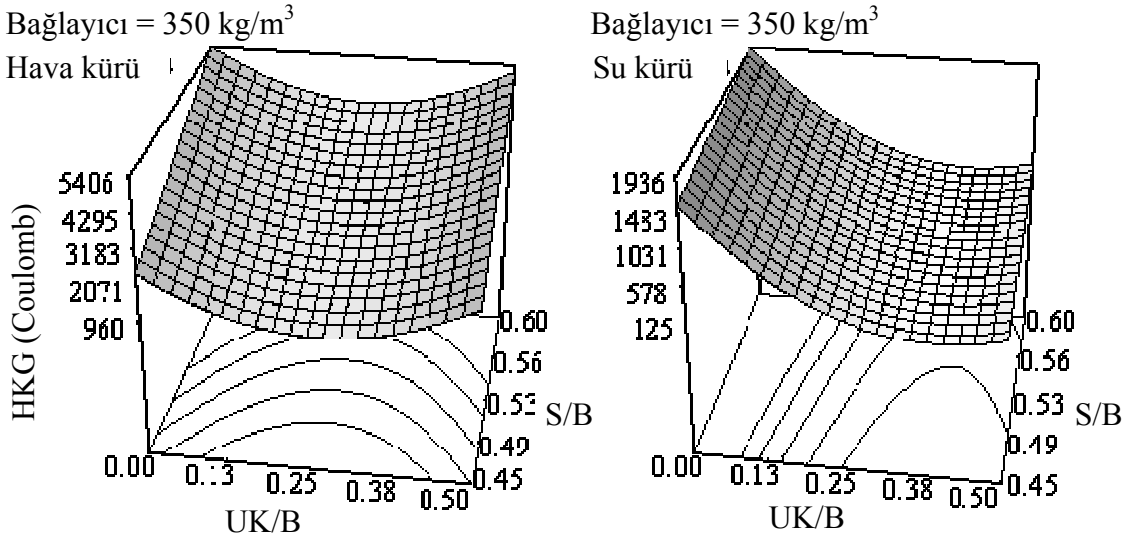
Hızlı klorür geçirimsizliği- Havada tutulan betonlarda S/B oranı, 0.60'tan 0.45'e düşürüldüğünde toplam geçen akım miktarını 3000 Coulomb düşürecek kadar etkili bir bileşen iken, suda saklanan betonlarda sadece 300 – 400 Coulomb düşüş görülmüştür (Şekil 4). Beton içindeki UK miktarının etkisi incelendiğinde, su kürü uygulanmayan yalın betonların çimentosunun UK ile yer değiştirilmeye başlanmasıyla toplam geçen akım miktarlarının düşmeye başladığı, UK/B oranı 0.26'ya ulaştığında yaklaşık 1500 Coulomb civarında bir azalma meydana getirecek minimum değere ulaştığı görülmüştür (S/B oranından bağımsız olarak). Bu noktadan sonra artan UK/B oranı olumsuz yönde etkilemeye başlamıştır. Suda kür edilen betonlarda aynı işlem tekrarlandığında minimum Coulomb değerine UK/B oranı 0.388'e vardığında ulaşılabilmektedir.

Sonuçlar

Bu deneysel çalışmadan elde edilen genel sonuçlar özetle aşağıda sıralanmaktadır:



Şekil 3. Açıkta tutulan betonların 0 ve %50 UK/B oranları için elde edilen basınç dayanımı tepki yüzeyleri



Şekil 4. İki kür koşulunda 350 kg/m^3 bağlayıcı içeren uçucu kül katkılı betonların UK/B ve S/B oranlarının klorür geçirimsizliğine etkisi

- Toplam bağlayıcı miktarı UK katkılı betonların basınç dayanımı ve klorür geçirimsizliği üzerinde etkili değildir. SD katkılı betonlarda ise artan bağlayıcı miktarı, çimento hamurunda boşluk miktarının agregadakinden daha fazla olması nedeniyle beton özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir.
- En düşük klorür geçirimsizliği için gerekli optimum uçucu kül/bağlayıcı oranı su kuru uygulanmasıyla daha yüksek değerlere çıkmıştır.
- Hızlı klorür geçirimsizliği deneyi, havada saklanan mineral katkılı veya katkısız tüm betonların karşılaştırılmasında veya suda saklanan mineral katkılı betonların kendi aralarındaki karşılaştırmalarda kullanılması uygundur. Ancak, özellikle suda saklanan betonlarda, mineral katkılı betonlarla yalnız betonların klorür geçirimsizliklerini karşılaştırmak doğru sonuçlar vermeyecektir.
- Mineral katkılı betonların tasarımı ve optimizasyonunda kullanılan “Merkezi Kom-

pozit Tasarım” adındaki yöntemin oldukça verimli olduğu görülmüştür.

Kaynaklar

- Aitcin, P.C., Miao, B., Cook, W.D. ve Mitchell, D., (1994). Effect of size and curing on cylinder compressive strength of normal and high strength concretes, *ACI Materials Journal*, **91**, 4, 349-354.
- ASTM C 618, (2003). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.
- Christensen, B.J., Mason, T.O. ve Jennings H.M., (1992). Influence of silica fume on the early hydration of Portland cements using impedance spectroscopy, *Journal of American Ceramic Society*, **75**, 4, 939-45.
- Diamond, S., (1983). Effects of microsilica on pore-resolution chemistry of cement pastes, *Journal of American Ceramic Society*, **66**, C, 82-84.
- Feldman, R.F., Chan, G.W., Brousseau, R.J. ve Tumidajski, P.J., (1994). Investigation of the Rapid Chloride Permeability Test, *ACI Materials Journal*, **91**, 2, 246-255.
- Gu, P., Beaudoin, J.J., Zhang, M.H. ve Malhotra, V.M., (2000). Performance of reinforcing steel in concrete containing silica fume and blast-furnace slag ponded with sodium-chloride solution, *ACI Materials Journal*, **96**, 3, 254-262.
- Lui, Z. ve Beaudoin, J.J., (2000). The permeability of cement systems to chloride ingress and related test methods, *Cement Concrete and Aggregates*, **22**, 1, 16-23.
- Neville, A.M., (1993). *Properties of concrete*, Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex.
- Ozer, B. ve Ozkul, M.H., (2004). The influence of initial curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes, *Cement & Concrete Research*, **34**, 1, 13-18.
- Price, W.H., (1951). Factors influencing concrete strength, *Journal of American Concrete Institute*, **22**, 6, 417-432.
- Ramezaniapour, A.A. ve Malhotra, V.M., (1995). Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume, *Cement & Concrete Composites*, **17**, 2, 125-133.
- Scanlon, J.M. ve Sherman, M.R., (1996). Fly ash concrete: An evaluation of chloride penetration testing methods, *Concrete International*, **18**, 6, 57-62.
- Shi, C., (2004). Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results, *Cement and Concrete Research*, **34**, 3, 537-545.
- Shi, C., Stegemann, J.A. ve Caldwell, R.J., (1998). Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results, *ACI Materials Journal*, **95**, 4, 389-394.
- Wood, S.I., (1991). Evaluation of the long-term properties of concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, 6, 630-643.