

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETONUN BASINÇ
DAYANIMININ HIZLANDIRILMIŞ DENEY
YÖNTEMLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

Uğur Sefa HORZUM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 624.05.00

Sunuş Tarihi: 08.09.2009

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Yrd. Doç. Dr. Özge ANDİÇ ÇAKIR

Sayın **Uğur Sefa HORZUM** tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak sunulan **“Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Basınç Dayanımının Hızlandırılmış Deney Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi”** başlıklı bu çalışma, E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Juri Üyeleri

İMZA

Juri başkanı	;	Prof. Dr. Kambiz RAMYAR	
Raportör	;	Yrd. Doç. Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR	
Üye	;	Yrd. Doç. Dr. Şemsi YAZICI	
Üye	;	Yrd. Doç. Dr. Kemal Tahir ERDEM	
Üye	;	Yrd. Doç. Dr. Gözde İNAN SEZER	

ÖZET
SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETONUN BASINÇ
DAYANIMININ HIZLANDIRILMIŞ DENEY YÖNTEMLERİ
KULLANILARAK BELİRLENMESİ
HORZUM, Uğur Sefa

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR,

Yrd. Doç. Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR

Eylül 2009, 127 sayfa

Bu tez çalışmasında; silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajlarda kullanılan karışımların 180 günlük basınç dayanımları ile hızlandırılmış kür yöntemleriyle (ılık su, kaynar su, otojen ve otoklav) bulunan basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenmiştir.

Belirli bir Vebe süresinde sabit çimento içeriği ve 6 farklı uçucu kül miktarında karışımlar hazırlanıp, uçucu külün SSB basınç dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi de çalışmanın bir diğer amacını oluşturmuştur. Sonuçta, standart kür yöntemi ile elde edilen 180 günlük dayanımlar ile hızlandırılmış kür yöntemleri ile bulunan dayanımlar arasında istatistiki bir ilişki bulunmuştur. Karışımlarda uçucu kül miktarının artışı ile basınç dayanımlarında da bir artış olduğu belirtilmiştir. Tezin birinci ve ikinci bölümü giriş ve SSB'nin kullanım alanlarına ayrılmıştır. Üçüncü bölümde SSB'nin genel özellikleri verilmiştir. Dördüncü bölümde taze ve sertleşmiş SSB özellikleri belirtilmiş olup, beşinci bölüm SSB karışım oranları hesap yöntemlerine ayrılmıştır. Tezin altıncı bölümünde SSB karıştırma, taşıma, serme ve sıkıştırma işlemlerine yer verilmiştir. Yedinci ve sekizinci bölümde sırasıyla literatür taramasına ve hızlandırılmış kür yöntemlerine değinilmiştir. Dokuzuncu bölümde deneysel çalışma ve onuncu bölümde ise test sonuçları ve yorumlar bulunmaktadır. Son olarak onbirinci bölümde elde edilen deneysel çalışma sonuçları özetlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Silindirle sıkıştırılmış beton, hızlandırılmış kür yöntemleri, uçucu kül, basınç dayanımı

ABSTRACT
ROLLER COMPACTED CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH
DETERMINATION BY ACCELERATED CURING METHODS

HORZUM, Uğur Sefa

MSc in Civil Engineering

Supervisors: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Asst. Prof. Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR

September 2009, 127 pages

In this thesis, the relationship between the 180-day compressive strength of roller compacted concrete (RCC) and its strength obtained by accelerated curing (warm water, boiling water, autogenous, high temperature and pressure) methods, was investigated.

Another aim of this thesis was to determine the effect of the fly ash on the compressive strength of RCC. For this purpose, specimens having constant cement content and 6 different fly ash contents were prepared. The Vebe times of the mixtures were kept constant at 48 ± 2 seconds. It was observed that there is a statistical relationship between the compressive strength of the specimens tested by accelerated curing methods and those of standard-cured specimens. Besides, it was found that increasing the fly ash content resulted in a higher compressive strength value.

The first and second chapter of this thesis is allocated to the introduction and applications of RCC. General information about RCC is given in the third chapter. Basic properties of fresh and hardened RCC are given in the forth chapter. Mix design methods of RCC are introduced in the fifth chapter of the thesis. The sixth chapter refers to mixing, transporting, spreading and compacting operations for RCC. The seventh and eighth chapters are devoted to the literature survey and the accelerated curing methods, respectively. The experimental study and the results and discussions of the experimental work are presented in the ninth and tenth chapter, respectively. Finally, the eleventh chapter is allocated to the conclusions and recommendations.

Keywords: Roller compacted concrete(RCC), accelerated curing methods, fly ash, compressive strength

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından sonuna kadar büyük bir titizlik ve sabır ile bana destek olan, bilgi ve tecrübelerini paylaşan değerli hocam ve tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a,

Tez konusunun seçimi ve deneysel çalışmalarımın yönlendirilmesinde hiç bir zaman desteğini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Sn. Yrd. Doç. Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR'a ,

Deneysel çalışma süresince her türlü imkan ve kolaylığı sağlayan Beydağ Barajı Şantiye Şefi Sn. Bülent ÇAĞIRGAN'a,

Deneysel çalışma süresince değerli görüş, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Beydağ Barajı Şantiye Şefi Yrd. Sn. Fuat POLAT'a,

Ayrıca hayatımın her aşamasında bana manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

X

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VII
TEŞEKKÜR.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XVII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XXI
1.GİRİŞ.....	1
2. SSB’NİN KULLANIM ALANLARI.....	2
2.1. Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajlar.....	2
2.2. Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar.....	7
2.3 Ülkemizde SSB Uygulamaları.....	9
3. SSB’NİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	11
3.1. SSB Tasarım Yaklaşımlar.....	11
3.1.1. Zemin Yaklaşımı.....	11
3.1.2. Beton Yaklaşımı.....	13
3.2. SSB Malzemeleri.....	15
3.2.1. Bağlayıcı Madde.....	16
3.2.1.1. Portland Çimentosu.....	17
3.2.1.2. Mineral Katkılar ve Uçucu Kül Kullanımı.....	18

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.2. Agregat.....	25
3.2.2.1. İri Agregat.....	26
3.2.2.2. İnce Agregat.....	27
3.2.2.3. Çok İnce (200 Nolu Elekten Geçen) Malzeme.....	28
3.2.2.4. Agregat Tane Dağılımı.....	30
3.2.2.5. Su.....	33
3.2.2.6. Kimyasal Katkılar.....	34
4. TAZE VE SERTLEŞMİŞ SSB ÖZELLİKLERİ.....	36
4.1. Taze SSB Özellikleri.....	36
4.1.1. İşlenebilirlik.....	36
4.1.2. Birim Hacim Ağırlık.....	38
4.1.3. Ayrışma.....	40
4.2. Sertleşmiş SSB Özellikleri.....	42
4.2.1. Basınç Dayanımı.....	42
4.2.2. Çekme Dayanımı.....	44
4.2.3. Kesme Dayanımı.....	45
4.2.3.1. Ana Beton Kesme Dayanımı.....	46
4.2.3.2 Yatay Derz Kesme Dayanımı.....	46

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2.4. Eğilme Dayanımı.....	48
4.2.5. Çekme-Şekil Değiştirme Kapasitesi.....	48
4.2.6. Hacim Değişimi.....	49
4.2.6.1. Kuruma Büzülmesi.....	49
4.2.6.2. Otojen Büzülme.....	49
4.2.7. Elastisite Modülü.....	49
4.2.8. Geçirimlilik.....	51
4.2.9. Poisson Oranı.....	53
4.2.10. Sünme.....	53
4.2.11. Termal Özellikler.....	55
4.2.12. Dayanıklılık.....	55
4.2.12.1. Erozyon ve Aşınma Direnci.....	56
4.2.12.2. Donma Çözünme Direnci.....	56
5. SSB KARIŞIM ORANLARI HESAP YÖNTEMLERİ.....	59
6. SSB KARIŞTIRMA, TAŞIMA, SERME ve SIKIŞTIRMA İŞLEMLERİ.....	64
6.1. SSB Üretimi.....	64
6.2. SSB Taşınması.....	65
6.2.1. Kamyonlarla SSB Taşınması.....	65

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.2.2. İletici Bantlarla SSB Taşınması.....	67
6.3. SSB Serme ve Yerleştirme İşlemleri.....	69
6.4. SSB Sıkıştırılma İşlemi.....	71
7. LİTERATÜR TARAMASI.....	73
8. HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMLERİ.....	83
8.1. Ilık Su Yöntemi.....	84
8.2. Kaynar Su Yöntemi.....	84
8.3. Otojen Yöntemi.....	85
8.4. Otoklav Yöntemi.....	85
9. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	87
9.1. Amaç.....	87
9.2. Kapsam.....	87
9.3. Kullanılan Malzeme.....	88
9.3.1. Çimento.....	88
9.3.2. Uçucu Kül.....	89
9.3.3. Agregası.....	90
9.4. Karışım Hesabı.....	92
9.4.1. Karışımda Kullanılan Bağlayıcı Miktarının Belirlenmesi...	92

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
9.4.2. Karışımında Kullanılan Su Miktarının Belirlenmesi.....	95
9.4.3. Karışım ve Silindir Örneklerinin Hazırlanmasında İzlenen Yöntem.....	95
9.5. Yapılan Deneyler.....	99
10. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	101
10.1. Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	101
10.2. Standart Kürlü Örneklerde Basınç Dayanımı.....	107
10.2.1. SSB-1 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi..	107
10.2.2. SSB-2 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi..	108
10.2.3. SSB-3 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi..	108
10.2.4. SSB-3 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi..	109
10.2.5. SSB-5 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi..	110
10.2.6. SSB-6 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi..	110
10.3. Hızlandırılmış Kür-180 Günlük Basınç Dayanımı arasındaki ilişkisi.....	112
10.4. Su/Bağlayıcı Madde Miktarının Basınç Dayanımına Etkisi.	114
10.5. Karışım Verimleri.....	118
10.6. Uçucu Külün SSB'nin Su İhtiyacı ve İşlenebilmeye Etkileri.....	119

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
11. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	120
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	122
ÖZGEÇMİŞ.....	127

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Beydağ Barajı.....	3
2.2. Yol kaplamalarında SSB'nin taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması.....	7
3.1. Sızdırmazlık önlemleri (a) geomembran kaplama, (b) beton kaplama (c) çimento şerbeti ile zeninleştirme.....	13
4.1. Vebe aparatı ve modifiye Vebe aparatı.....	37
4.2. Nükleer yoğunluk test aleti.....	39
4.3. Ayrışmaya uğramış SSB.....	40
4.4. Ayrışmayı azaltmak için alınan yöntem.....	41
4.5. Mineral katkılı SSB'lerin çimento içeriği ile basınç dayanımı ilişkisi.....	43
4.6. Mineral katkı kullanılmayan SSB'lerin çimento içeriği ile basınç dayanımı ilişkisi.....	43
5.1. Dayanım grafikleri (a) eşdeğer çimento miktarı basınç dayanımı ilişkisi, (b) su/çimento oranı basınç dayanımı ilişkisi.....	60
6.1. İkiz şaftlı mixer.....	65
6.2. Kamyon tekerleklerinin yıkanması.....	66
6.3. Kamyonlarla SSB taşınması.....	67
6.4. İletici bantlarla SSB taşınması.....	68
6.5. İletici bantlarla getirilen SSB'nin dağıtılması.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.6. Tabaka yüksekliğinin lazer ile kontrol edilmesi.....	69
6.7. Lastik tekerlekli treyler kullanılarak dozerin taşınması.....	70
6.8. SSB serilmesi.....	70
6.9. 15 tonluk vibrasyonlu silindirler.....	71
6.10. El kompaktörleri.....	72
6.11. 3 tonluk küçük silindirler.....	72
7.1. Yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB'nin eğilme özgül dayanım grafiği.....	75
7.2. Uçucu kül özgül dayanım grafiği.....	75
9.1. Kullanılan agreganın gradasyon eğrisi.....	92
9.2. Beydağ Barajı karışım geliştirme çalışmaları sonuçları....	94
9.3. Betoniyer.....	96
9.4. Vebe aleti.....	96
9.5. SSB numunelerinin hazırlanması (a) SSB'nin havalı tabanca kullanılarak sıkıştırılması, (b) SSB'nin son kademesinin sıkıştırılması.....	97
9.6. Ilık su ve kaynar su kürü deneyleri.....	98
9.7. Tek eksenli basınç deneyi.....	100

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
10.1. Hızlandırılmış kür uygulanan SSB'lerin basınç dayanımı.....	106
10.2. Standart kürlenmiş SSB'lerin basınç dayanımı.....	106
10.3. SSB-1 Karışımını kür süresi-basınç dayanımı.....	107
10.4. SSB-2 Karışımını kür süresi-basınç dayanımı.....	108
10.5. SSB-3 Karışımını kür süresi-basınç dayanımı.....	109
10.6. SSB-4 Karışımını kür süresi-basınç dayanımı.....	109
10.7. SSB-5 Karışımını kür süresi-basınç dayanımı.....	110
10.8. SSB-6 Karışımını kür süresi-basınç dayanımı.....	111
10.9. SSB karışımlarına ait kür süresi-basınç dayanımı etkisi..	111
10.10. Ilık ve kaynar su kürü-180 günlük basınç dayanımı ilişkisi.....	113
10.11. Otojen ve otoklav kürü-180 günlük basınç dayanımı ilişkisi.....	114
10.12. Su/Bağlayıcı madde-7 günlük basınç dayanımı etkisi.....	115
10.13. Su/Bağlayıcı madde-28 günlük basınç dayanımı etkisi...	115
10.14. Su/Bağlayıcı madde- 90 günlük basınç dayanımı etkisi..	116
10.15. Su/Bağlayıcı madde-180 günlük basınç dayanımı etkisi..	116
10.16. Su/Bağlayıcı madde-ılık ve kaynar su kürü gören SSB'lerin basınç dayanımına etkisi.....	117

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
10.17. Su/Bağlayıcı madde oranının otojen ve otoklav kürü gören SSB'lerin basınç dayanımına etkisi.....	117
10.18. SSB karışımlarına ait karışım verimi.....	118

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Dünyadaki SSB barajları.....	10
3.1. Zemin ve beton yaklaşımı arasındaki farklar.....	15
3.2. F sınıfı ve C sınıfı uçucu küllerin özellikleri.....	22
3.3. Bazı barajların çimento ve mineral katkı miktarları...	24
3.4. Agregada deneyleri.....	26
3.5. İdeal iri agregada gradasyonu.....	31
3.6. İdeal ince agregada gradasyonu.....	32
3.7. Amerika'daki bazı barajların agregada gradasyonları...	32
4.1. Farklı baraj SSB karışımlarının mekanik özellikleri...	51
4.2. SSB'lerde yapılan deneyler.....	58
7.1. SSB karışım oranları.....	73
7.2. SSB deney sonuçları.....	74
7.3. Uçucu külün basınç/eğilme dayanımına katkısı (R_{FA} , %).	76
7.4. SSB karışım oranları.....	78
7.5. SSB basınç dayanımları.....	78
7.6. SSB eğilmede çekme dayanımı.....	79
7.7. SSB yarmada çekme dayanımı.....	79
7.8. SSB karışım oranları.....	80

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
8.1. ASTM C684'e göre hızlandırılmış deney yöntemleri..	84
8.2. TS 3323'e göre hızlandırılmış deney yöntemleri.....	86
9.1. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri.....	88
9.2. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.....	89
9.3. Kullanılan uçucu külün fiziksel özellikleri.....	90
9.4. Kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri.....	90
9.5. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri.....	91
9.6. Kullanılan agreganın gradasyonu.....	91
9.7. Beydağ Barajı karışım geliştirme çalışmaları sonuçları.....	93
9.8. BBK-9 karışım oranları.....	94
9.9. Beydağ Barajı laboratuvar ve karot numuneleri basınç dayanımı sonuçları.....	94
9.10. SSB karışımlarında kullanılan malzeme miktarı.....	96
10.1. SSB-1 karışımına ait basınç dayanımları.....	101
10.2. SSB-2 karışımına ait basınç dayanımları.....	102
10.3. SSB-3 karışımına ait basınç dayanımları.....	102
10.4. SSB-4 karışımına ait basınç dayanımları.....	103
10.5. SSB-5 karışımına ait basınç dayanımları.....	103

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>		<u>Sayfa</u>
10.6.	SSB-6 karışımına ait basınç dayanımları.....	104
10.7.	Farklı yöntemlerle kürlenmiş SSB karışımlarının basınç dayanımı.....	105
10.8.	Standart kürlenmiş SSB karışımlarının basınç dayanımı.....	105
10.9.	Uçucu kül miktarı artışı-dayanım kazanma hızı.....	112
10.10.	SSB karışımlarına ait karışım verimleri.....	118
10.11.	SSB karışımları nem oranı ve Vebe süresi.....	119

1. GİRİŞ

Hızlı yapım tekniği, düşük maliyeti ve dayanıklılığı ile silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) özellikle baraj ve yol inşaatında dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Silindirle sıkıştırılmış baraj, sağladığı düşük maliyet, hızlı inşa imkanı, dar enkesit, küçük hacim ve yapımında atık malzemelerin kullanılabilmesi (uçucu kül, cüruf vb.) gibi avantajlarla son yıllarda ülkemizde de uygulanmaya başlanmıştır.

Günümüzde, silindirle sıkıştırılmış beton tekniği, baraj gövde yapılarında oldukça önemli bir teknik haline gelmiştir. Bu yüzden baraj inşaatı başlamadan önce kapsamlı bir çalışmanın yapılması şarttır. Seçilen doğru karışım oranlarıyla istenilen dayanım özellikleri en ekonomik yoldan sağlanmış olur. SSB'nin karışım oranları büyük oranda yapının dayanım ve dayanıklılık kriterlerine bağlı olarak belirlenir. Bununla birlikte, SSB karışım oranlarının belirlenmesinde özel proje kriterleri, malzeme kaynakları, malzemenin taşınması, malzemenin yayılma ve sıkıştırılması işlemleri oldukça belirleyicidir.

Bu çalışmanın amacı; özellikle SSB barajlarda kullanılan karışımların basınç dayanımlarının farklı hızlandırılmış kür yöntemleri ile belirlenmesidir. Bu sayede silindirle sıkıştırılan betonun 180 günde kazanacağı dayanımı daha kısa sürede tahminlemek mümkün olacaktır.

2. SSB'NİN KULLANIM ALANLARI

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) sertleşmemiş halde iken üzerinden silindirlerin geçmesine imkan verecek şekilde kuru kıvamda olan bir beton türüdür. Son yıllarda; sağladığı düşük maliyet, hızlı inşa imkanı ve yapısal özelliklerinin bilinmesinden dolayı dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanılmıştır.

Silindirle sıkıştırılmış beton kavramı ilk defa 2. Dünya Savaşı öncesinde ortaya atılmıştır. O zamanlar; havaalanları ve otoyolların alt temel tabakalarında kullanılmıştır. 2. Dünya Savaşı sonrasında Avrupa'nın yeniden ve en hızlı şekilde yapılandırılma ihtiyacının ortaya çıkması, baraj, liman, karayolu ve hava meydanları inşası ihtiyacına cevap verecek hızlı yapım metotlarının geliştirilmesini sağlamıştır (Ağırlioğlu, 2005).

2.1. Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajlar

SSB barajlar, vibrasyonla sıkıştırılmış klasik beton ağırlık barajlara alternatif olarak ortaya çıkmış, ancak daha önceden kaya dolgu olarak planlanan barajların da yerine inşa edilmeye başlanmıştır (Ağırlioğlu, 2005). İzmir'in Beydağ ilçesinde yapılan Beydağ Barajı kil-çekirdekli toprak kaya dolgu barajı olarak planlanmış fakat daha sonra hızlı yapım tekniği, çevre dostu olması, daha küçük hacimli oluşu, dolusavak kazısına gerek olmayışı gibi sebeplerden dolayı SSB baraj tipine dönüştürülmüştür (Şekil 2.1). Başlangıçta büyük çoğunluğu taşkın kontrolü ve su temini amacıyla yapılan SSB barajlar, şimdi tüm amaçlar için inşa edilmektedir (Ağırlioğlu, 2005).



Şekil 2.1. Beydağ Barajı (İzmir, Türkiye)

SSB yeni bir malzemedir ve silindirle sıkıştırılmış beton baraj inşaat tekniğinde oldukça yeni bir metottur. 1972 yılındaki Kaliforniya’da yapılan Asilomar Konferansı’nda beton barajların nasıl daha hızlı ve ekonomik yoldan yapılacağı sorularına cevap aranmıştır (Andriolo, 1998). Bu konferansta Jerome Raphael “Optimum Gravity Dam” isimli makalesinde toprak dolgu barajlar karşısında gittikçe ekonomik olma ve alternatif baraj tipi niteliğini kaybeden beton barajların hızlı ve ucuz inşası konusunda bir yaklaşım geliştirmeye çalışmıştır. Bu düşünce silindirle sıkıştırılmış beton barajlarda bir milat olarak değerlendirilmektedir. Bu makalede yazar toprak dolgu baraj ekipmanları kullanarak çimento ile zenginleştirilmiş tuvenan agreganın sıkıştırılması ile bir yatay bir düşey simetrik şevlere sahip bir baraj önermiştir. Yazarın getirdiği kavram ile o zamana kadar gövdesi tümü ile SSB olan ve Amerika’daki ilk proje olması düşünülen Zintel Canyon

barajının beton baraj olarak nasıl hızlı ve ucuz inşa edileceği araştırılmıştır (Shrader, 1995).

Aynı soru 1973 yılında II. Uluslararası büyük barajlar kongresinde tartışılmıştır. Bundan sonraki bir çok kongre, sempozyum ve teknik buluşmalarda bu konu üzerinde durulmuştur (Andriolo, 1998).

İlk SSB 1960-1961 yıllarında Tayvan'da yapılan Shihmen batardosunda dökülmüştür. Normal betonda olduğu gibi sınıflandırılmış agrega kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 76 mm olup beton santralinde karışımı yapılmıştır. Serme işlemi Caterpillar D8 dozer ile yapılmıştır. SSB katmanı yüksekliği 30 cm'dir. Modifiye proktor deneyi kullanılarak optimum su muhtevası belirlenmiştir. Daha sonraki SSB uygulaması 1961-1965 yılları arasında İtalya'da yapılan 172 m yüksekliğindeki Alpe-Gera barajında yapılmıştır. 70 cm yüksekliğinde serilen SSB tabakaları dozerlere bağlanan vibratörle sıkıştırılmıştır. SSB tabakalarındaki daralma derzleri çatlak yönlendirici kullanılarak kesilmiştir. Barajın geçirimsizliği önyüze yerleştirilen metal plakalar sayesinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra İtalya'da yapılan Quaira Della Miniera Barajı'nda da aynı yöntem kullanılmıştır (Andriolo, 1998).

Farklı bir yöntemle 1965 yılında Montreal'de yapılan Manicougan barajının çekirdeğinde düşük dozajlı beton kullanılmıştır. Bu yöntemde beton dozerlerle serilip dahili vibratör kullanılarak sıkıştırılmıştır. Baraj ön yüzünde bağlayıcı madde oranı yüksek beton kullanılarak geçirimsizlik sağlanmıştır. Ön yüz dikey olarak planlanıp kayar kalıp kullanılmıştır. 15 m'de bir yapılan daralma derzlerine su tutucular yerleştirilmiştir. Mansap yüzüne prekast bloklar konulmuştur (Andriolo, 1998).

John Love III (1962), Nebraska'da ASCE tarafından düzenlenen kongrede Shihmen barajında kullanılan düşük dozajlı beton tekniğini

anlatmıştır. Bu kongrede ilk defa sıkıştırma işleminin silindir ile yapılabileceğinden bahsedilmiştir. Bu kongrede ilk defa rollcrete sözü literatüre girmiştir (Andriolo, 1998).

Yeni bir teknikle SSB ilk defa Pakistan'daki Tarbela Barajı'nda kullanılmıştır. 1974 ile 1982 yılları arasında; en büyük tane boyutu 150 mm ve çimento içeriği 133.5 kg/m^3 olan 2.5 milyon m^3 SSB yerleştirilmiştir. Kaya kamyonları ve skreyperler SSB'nin taşınmasında görev yapmış ve vibrasyonlu silindirler kullanılmıştır. 44 gün gibi kısa bir sürede 344.000 m^3 SSB dökümü yapılmıştır (Andriolo, 1998).

Japonya'da yapılan ilk SSB barajı 1980 yılında yapımı tamamlanan Shimajigawa Barajı'dır. Daha sonra 1979 yılında Okhawa Barajı'nın yapımına başlanmıştır. Japonya'da kullanılan teknolojinin adı RCD (roller compacted dam)'dir. Bu barajda 130 kg/m^3 bağlayıcı madde kullanılmış olup bunun %30'u uçucu küldür. En büyük dane boyutu 80 mm'dir (Andriolo, 1998).

US Army Corps (1974), Zintel Kanyon Barajı için alternatif bir yol geliştirmiştir. Zintel Kanyon Barajı SSB teknolojisiyle yapılmamıştır fakat baraj yapım tekniği sayesinde Willow Creek Barajı'na örnek olmuştur (Ağırlioğlu, 2005). Tamamen SSB kullanılarak yapılan ilk baraj olan ABD'nin Oregon Eyaleti'ndeki Willow Creek Barajı 51 m yüksekliğinde ve 300.000 m^3 SSB hacmine sahiptir. Ön yüzü dikey olup mansap yüzünün eğimi 0.8/1'dir. Kırmataş kullanılarak yapılan SSB'nin en büyük dane boyutu 76 mm olup, %4-10 arasında değişen 200 nolu elek altı malzeme, metre küpte 47 kg çimento ve 19 kg uçucu kül kullanılmıştır. Tabaka kalınlıkları 24-34 cm arasında değişip tabaka yükseklikleri lazerle kontrol edilmiştir (Andriolo, 1998). Bu barajın inşaatı sırasında dünyanın çeşitli ülkelerinden 1000 kadar mühendis tekniği incelemiştir (Ağırlioğlu, 2005).

Ağralıoğlu (2005); kitabında kronolojik olarak barajları aşağıdaki gibi sıralamıştır:

SSB, İngiltere’de ilk defa 1979 yılında Winbleball Barajı’nda kullanılmıştır. Milton Brook Barajı yüksek dozajlı SSB kullanılarak yapılmıştır.

1984 yılında ABD’de Winhester Barajı’nda önyüzü PVC geomembran kaplı hazır beton paneller kullanılarak beton kaplamalı SSB baraj kavramı ortaya çıkarılmıştır.

1985’te ABD’de Kerville Barajı’nda su aşmasına rağmen SSB olarak yapılan yapı zarar görmemiştir.

1988’te Güney Afrika’da dünyanın ilk SSB kemer ağırlık barajı yapılmıştır.

1993’e gelindiğinde dünya genelinde yapılan SSB baraj sayısı 100’ü aşmıştır.

1995’te Çin’de Longtan Hidroelektrik Projesi kapsamında 216.5 m’lik dünyanın en yüksek SSB ağırlık barajının inşaatına başlanmıştır.

1980’lerin sonuna doğru SSB teknolojisi tüm dünyada hızlı bir gelişim sürecine girmiştir. 2004 yılı başına göre dünyada yapılan ve inşaatı devam eden 300’den fazla SSB barajı vardır. 43 farklı ülkede planlanan bu barajlarda ayda ortalama 100 000 m³ beton dökülmüş ve bu değer bazı barajlarda 200 000 m³/ay miktarını aşmıştır.

2.2. Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar

Normal betonlara göre daha düşük su/bağlayıcı madde miktarına sahip SSB kaplamalar asfalt yapımında kullanılan ekipmanlarla taşınır, serilir ve sıkıştırılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Yol kaplamalarında SSB'nin taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması

İlk SSB yol 1942 yılının başlarında U.S Army Corps of Engineers tarafından rapor edilen Yakima, Wa Circa'da bir uçak pistinde kullanılmıştır. İsveç'te 1930 yılında ise günümüzdeki SSB karışım yöntemlerine göre farklı yöntem uygulanmıştır. Daha sonra 1960'lı

yılların başlarında Amerika’da orman sanayisinde çimento ile zenginleştirilmiş toprak yol kullanılmaya başlanmıştır. Fakat üst kaplama daima asfalt olarak tasarlanmıştır. Çimento oranı %6 ile 12 arasında artırılarak daha dayanıklı bir kaplama elde edilmiş ve asfalt kaplama bir daha kullanılmamıştır. Bu tip yolların stabilize yollara göre avantajları şunlardır (Piggott, 1999):

- Petrol ürünlerinden zarar görmezler,
- Üzerinde geçen trafikten dolayı zarar görmeleri daha zordur,
- Daha hızlı inşa imkanı vardır,
- Daha kolay ve basit ekipmanlar ile yapılır.

SSB yolların donatılı beton yollara göre avantajları ise şunlardır:

- Az çimento kullanıldığından daha ekonomiktir,
- Yapımı hızlıdır,
- Kalıp, dübel kullanımı çok daha az olmaktadır.

United States Army Corps of Engineers (USACE) tarafından yapılan ilk SSB yol kaplaması 1984 yılında Fort Leviste tanklar için yapılan test yoludur (Piggott, 1999).

1995 yılında Qubec’te Metallurgie Noranda’da kırma cüruf depolamak için 25000m² SSB kaplaması yapılmıştır. Kırma darbelerine karşı SSB yüksek dayanımlı olarak tasarlanmış ve kalınlığı 35 cm olacak şekilde serilmiştir. 7 günlük ortalama basınç dayanımı 55 MPa ve çekme dayanımı ise 5 MPa olmuştur (Marchand, 2005).

1999 yılında Qubec Montreal’de ilk SSB yol kaplaması yapılmıştır. Bu proje iki tür SSB kaplaması içermektedir: Chabanel caddesi (yoğun

trafik), Malson caddesi (az yoğun trafik). 4 şeritli yol olan Chabanel caddesinin uzunluğu 460 m olup toplam serilen SSB alanı 8500 m²'dir. Serilen SSB'nin yüksekliği ise 20 cm'dir. 2. Proje olan Malson caddesi iyileştirilmesinde ise 120 m uzunluğunda 9.3 m genişliğinde toplam alanı 1120 m² olan SSB yerleştirilmiştir. Bu iki projede 7 günlük SSB dayanımı 45-50 MPa, çekme dayanımı ise 5-6 MPa arasında değişmektedir. Bu projelerde SSB asfalt ile kaplanmıştır (Marchand, 2005).

SSB, yol kaplamalarında genellikle beton tesisinden döküm sahasına kamyonlarla taşınmaktadır. SSB kamyonundan serim makinesine doğrudan dökülerek hassas bir şekilde serimi yapılır. Serici ön sıkıştırma yaptığı için, yolun düzgünlüğünü arttırmaktadır. Daha sonra titreşimli silindirler gerekli sıkılık değerine ulaşmaya kadar pas atarlar. Büzülme çatlaklarının oluşumu engellemek için SSB tam katılaşmadan enine derzler yapılmaktadır. SSB kaplama devamlı su püskürtülerek veya ıslak bir bezle nemli tutulmaktadır. Yetersiz kür işlemi olursa, SSB kaplamada zayıf aşınma tabakaları elde edilebilmektedir (Ağar ve Taşdemir, 2007).

2.3. Ülkemizde SSB Uygulamaları

Türkiye'de ilk olarak Karakaya Barajı Memba batardosunda uygulanan SSB daha sonra Atatürk, Sır, Berke ve Kürtün barajlarının belirli yapılarında uygulanmıştır. Büyük proje olarak şu anda yapımı devam eden Cindere Barajı ve Hidroelektrik Santrali (HES) (Denizli), Beydağ Barajı (İzmir), Çine Barajı ve HES (Aydın), Akköy I Bendi ve HES (Gümüşhane) inşaatları gövde yapıları SSB olarak projelendirilmiştir. Son yıllarda yap işlet devret barajlarının yapımının hızlanmasıyla SSB barajlarının sayısı oldukça artmıştır. Çizelge 2.1'de

dünyada yer alan önemli SSB Barajların yapım yıllarına göre sayıları verilmektedir.

Çizelge 2.1. Dünyadaki SSB barajları (Andriolo, 1998)

Ülke	SSB barajlar (yapımı tamamlanan ve devam eden)			
	1986	1990	1993	1996
Angola	-	1	1	1
Morokko	-	2	6	7
Güney Afrika	2	4	8	9
Afrika	2	7	15	17
Çin	1	3	10	24
Japonya	2	7	13	24
Kırgızistan	-	1	1	1
Asya	3	11	24	50
Tayland	-	-	-	1
Fransa	-	1	3	6
Yunanistan	-	-	1	1
İtalya	-	-	-	1
Romanya	-	-	1	1
İspanya	1	5	15	17
Avrupa	1	6	20	27
Kanada	-	-	-	1
Meksika	-	1	2	5
Amerika	6	14	24	26
Kuzey Amerika	6	15	26	32
Avustralya	2	3	6	7
Okyanusya	2	3	6	7
Arjantin	-	1	1	1
Brezilya	1	1	3	17
Şili	-	-	-	1
Kolombiya	-	-	-	1
Küba	-	-	-	1
Guyana	-	-	-	1
Honduras	-	1	1	1
Orta & Güney Amerika	1	3	5	23

3. SSB'NİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) genel anlamda taze haldeyken vibrasyonlu silindirin sıkıştırabilmesine izin verecek şekilde katı kıvamlı (0 çökme değerine sahip) olan bir beton türüdür. SSB'nin klasik betona göre en önemli farklılıkları şunlardır:

- ✓ Hiç çökme göstermemesi,
- ✓ Bağlayıcı madde oranının daha az oluşu,
- ✓ Daha büyük tane boyutuna (D_{max}) sahip agrega kullanımı,
- ✓ Daha az hidratasyon ısısının oluşması,
- ✓ Yol ekipmanları ile serilip sıkıştırılabilmesi,
- ✓ Hızlı ve seri üretimi,
- ✓ Derz sayısının normal betona göre daha az oluşu,
- ✓ Ekonomik oluşudur.

3.1. SSB Tasarım Yaklaşımları

SSB barajların tasarımında zemin ve beton yaklaşımı olmak üzere iki temel yaklaşım vardır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Bu iki yaklaşım birbirinden keskin çizgiler ile ayırlamadığı gibi temelinde çökmesiz bir beton oluşturmak yatmaktadır.

3.1.1. Zemin Yaklaşımı

Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB karışım oranları su muhtevası-yoğunluk ilişkisi açısından ele alınmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Buna göre, belli bir sıkıştırma enerjisinde betonun en büyük kuru birim hacim ağırlığını sağlamak amacıyla su içeriğinin belirlenmesi gerekmektedir (Andriolo, 1998). Optimum su içeriği standart proktor deneyi ile saptanır. Bu tip SSB'lerde sıkıştırma enerjisi arttıkça betonun kuru birim hacim ağırlığı artmakta optimum su muhtevası azalmaktadır. Zemin yaklaşımında çimento harcı genellikle agregalar arasındaki

boşlukları tam olarak dolduramaz. Çimentonun bir kısmı yerine puzolanlar kullanılabilir. Basınç dayanımı ile betonun kuru birim hacim ağırlığı arasında doğrudan bir ilişki vardır. Zemin yaklaşımı ile tasarlanan betonlarda, belirli bir sıkıştırma yüzdesinde en büyük kuru birim hacim ağırlığında en büyük basınç dayanımı elde edilmektedir. Zemin yaklaşımı ile tasarlanan barajların betonları donma-çözünme etkilerine karşı dayanıksız olmaktadır. Baraj geçirimli bir yapıda olduğu için de sızdırmazlık için ek önlemler alınmaktadır. Bu önlemler şunlar olabilir (Ağırlioğlu, 2005, Andriolo, 1998):

- Baraj ön yüzüne membran kaplama (şekil 3.1a),
- Ön yüze yüksek dozajlı geleneksel beton uygulanması (şekil 3.1b),
- SSB ön yüz kısmına çimento şerbeti uygulanması (şekil 3.1c).

Zemin yaklaşımıyla tasarlanan bir baraj, beton yaklaşımıyla tasarlanan bir baraja göre daha düşük dayanıma sahip olacağı için daha fazla kütle hacmine gereksinim duyar.

Zemin yaklaşımı ile tasarlanan SSB'nin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Düşük çimento içeriği nedeniyle hidrasyon ısısı problem oluşturmamaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991),
- Yapımı tamamlanmış barajlar düşük elastisite modülü ve yüksek sünme oranı gösterir. Yüksek sünme oranı nedeniyle termal gerilmeler büyük oranda azalmaktadır (Ağırlioğlu, 2005),
- Düşük hidrasyon ısısı sebebiyle düşey derz sayısı daha az olup, çatlama potansiyeli daha azdır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.1. Sızdırmazlık önlemleri (a) geomembran kaplama (b) beton kaplama (c) çimento şerbeti ile zenginleştirme

3.1.2. Beton Yaklaşımı

Beton yaklaşımıyla yapılan SSB'lerde tasarım parametresi olarak su/çimento oranı alınır. İlk olarak 1970'li yıllarda Tennessee Valley Authority (TVA) tarafından bulunmuş ve sonraları İngiltere'de Dunstan (1980) tarafından geliştirilmiştir. Temelinde daha az miktarda su kullanılarak çökmesiz ve basınç dayanımı yüksek olan beton elde etmek

amacını güder. Zemin yaklaşımına kıyasla, bunun daha yüksek bağlayıcı/harç oranıyla elde edilebileceği anlaşılmıştır (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerin en belirgin özellikleri şunlardır:

- Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lere göre kıvamı daha yüksektir,
- Tüm boşluklar çimento harcı ile doludur,
- Daha yoğun ve geçirimsiz bir özellik gösterir,
- Zemin yaklaşımına göre, daha yüksek dayanıma sahip olduğundan daha az kütle hacmine gerek duyar,
- Daha yüksek hidrasyon ısısına sahip olduğundan dolayı puzolanik malzeme kullanımı gerekmektedir,
- Düşey derz sayısı daha fazladır,
- Hidrasyon ısısı yüzünden çatlama potansiyeli fazladır, agreganın temini ve soğutması da ilave bir dikkat ve özen gerektirmektedir,
- Yapımı tamamlanmış barajlarda daha yüksek elastisite modülü ve daha az sünme oranı elde edilmektedir (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Çizelge 3.1 zemin yaklaşımı ile beton yaklaşımı arasındaki farklılıkları göstermektedir.

Çizelge 3.1. Zemin ve beton yaklaşımı arasındaki farklar (Andriolo, 1998)

Etkenler	Zemin yaklaşımı	Beton yaklaşımı
Karışım tasarımındaki temel yaklaşım	Optimum su muhtevası- maksimum kuru birim hacim ağırlık	Su/çimento oranı
Boşluk özellikleri	Bütün boşluklar dolu değil	Tüm boşluklar harçla dolu
Sıkışma yüzdesi	%98'den daha az	%98'den daha çok
Kıvam (Vebe)	45 sn'den fazla	45 sn'den az
Diğer isimleri	Düşük bağlayıcılı SSB	Yüksek bağlayıcılı SSB
Agrega	Sınıflandırılmış tüvenan	Boşlukları en aza indirebilmek için iyi sınıflandırılmış
200 No'lu elekten geçen miktar	Ağırlıkça %10'u kadar	Özellikle yüksek uçucu kül içeriğinde %3'ün altında
Toplam bağlayıcı madde miktarı	120 kg/m ³ 'ten daha az	120 kg/m ³ 'ten daha fazla
Tasarım		
Kohezyon	Düşük kohezyonlu (3 günlük basınç dayanımı 1.4 MPa'dan daha az)	Yüksek kohezyonlu (3 günlük basınç dayanımı 1.4 MPa'dan daha fazla)
Geçirimlilik	Boşluk miktarı sıkıştırma enerjisine göre değişmekte	Boşluk miktarı harcın miktarı ve özelliğine göre değişmekte
Basınç dayanımı	Birim çimento ağırlığına bağlı	Su / çimento oranı ile ilintili
Barajda sızma kontrolü	Ön yüz kaplama	Tüm baraj kesiti
İnşaat aşaması		
Serme	Ayrışma oluşma riski yüksek	Ayrışma oluşma riski az
Sıkıştırmadaki yaklaşım	Kompaksiyon	Konsolidasyon
Tabaka kalınlıkları	En fazla 30 cm (alt kesimlerde boşluk kalma ihtimali yüksek)	30-150 cm arası

3.2. SSB Malzemeleri

Silindirle sıkıştırılmış betonun geleneksel betona göre en büyük farklılığı kıvamından kaynaklanmaktadır. SSB, üzerinden silindirin batmadan geçecek bir şekilde kuru kıvamda olması gerekmektedir. Malzeme seçimi ve tasarımı yapılırken, SSB'nin işlenebilmesi ve yoğunluğu en yüksek olacak şekilde yapılmaktadır. SSB'nin dayanım

özelliklerini en fazla etkileyen faktörler şunlardır (Hansen ve Reinhardt, 1991):

- Agreganın gradasyonu, tipi,
- Sıkıştırma yüzdesi,
- Çimento, mineral ve kimyasal katkıların özellikleri,
- Su miktarı.

SSB karışımında kullanılan malzemeler şunlardır:

- Bağlayıcı maddeler (çimento ve mineral katkılar),
- Agregalar (ince ve iri agrega),
- Su,
- Çok ince malzeme (200 nolu elekten geçen),
- Akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici gibi kimyasal katkılar (Hansen ve Reinhardt, 1991).

3.2.1. Bağlayıcı Madde

SSB’de kullanılan bağlayıcı maddeler; çimento ve mineral katkılardır. Bağlayıcı maddelerin kimyasal özellikleri betonun hidratasyon ısını doğrudan etkilemekle birlikte özellikle erken yaştaki basınç dayanımı üzerinde etkisi vardır. Bu yüzden büyük kütleli SSB’lerde termal genleşmelerden kaynaklanacak çatlamları önlemek amacıyla bağlayıcı maddenin %20 ila %30 oranında mineral katkı kullanılmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Bağlayıcı maddelerin seçimi yapılırken sülfat etkisi, alkali-agrega reaksiyonu gibi etkilere karşı dayanıklı olması göz önünde tutulmaktadır (Andriolo, 1998).

3.2.1.1. Portland Çimentosu

Klasik betonlarda kullanılan çimento tipleri silindir ile sıkıştırılmış betonlarda da kullanılmaktadır. Baraj gibi kütle beton dökümü sırasında oluşan hidratasyon ısını en aza indirmek için düşük ısıli portland çimentosu seçilmektedir. SSB tasarımında dünyada sık kullanılan portland çimento tipleri düşük ısıli portland puzolan çimentosu ile yüksek fırın cürufu çimentosudur. Düşük ısıli portland çimentosu kullanılarak hidratasyon ısından kaynaklanacak olan çatlakların oluşması engellenmiş olmakta ve enine derz adedi azaltılabilmektedir. Bu çimento tiplerinin ilk günlerdeki dayanımı normal portland çimentosuna göre daha düşük olmaktadır. Fakat, yapılan deneylerde ilerki yaşlarda daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Çimento miktarının az ve puzolanik madde miktarının fazla olduğu barajlarda açığa çıkan hidratasyon ısısi miktarının az olmasından dolayı normal portland çimentosu da kullanılmaktadır. Cindere Barajı'nda (Denizli) 50 kg/m^3 çimento ve 20 kg/m^3 uçucu kül, Beydağ Barajı'nda (İzmir) 60 kg/m^3 çimento ve 30 kg/m^3 uçucu kül kullanılmış olup çimento tipleri ise CEMI 42.5R'dir (Andriolo ve Polat, 2006). Japonya'da yapılan SSB barajlarında ise genellikle 120 kg/m^3 çimento kullanılmaktadır. Zemin yaklaşımla tasarlanan SSB'lerde çimento miktarı 120 kg/m^3 'ı geçmemektedir (Hansen ve Reinhardt, 1991). Beton yaklaşımla tasarlananlarda ise 250 kg/m^3 'e kadar çıkabilmektedir (Hansen ve Reinhardt, 1991). Fransa'da yapılan Les Olivettes barajında yüksek fırın cürufu çimentosu kullanılmıştır (Andriolo, 1998). Beydağ Barajı'nda TS EN 197-1 "Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri'ne uygun olan CEMI 42.5R çimentosu kullanılmıştır ve yedi günlük hidratasyon ısısi 75 kalori/gram veya daha düşük olma şartı getirilmiştir (Beydağ Barajı, 2006).

SSB’lerde düşük çimento içeriğinin getirdiği faydalar şunlardır:

- Düşük hidratasyon ısısı sebebiyle betonun çatlama riskinin azalması,
- Çatlama riski azaldığından dolayı geçirimsiz oluşu,
- Betonun soğutma masraflarını ortadan kaldırması veya azaltması,
- Düşey derz sayısının azalması,
- Ekonomik oluşu,
- Çimento kaynaklı dayanıklılık problemlerinin azalması.

3.2.1.2. Mineral Katkılar ve Uçucu Kül Kullanımı

Mineral katkılar, “kendi başına su ile bağlayıcı özelliği çok az olan veya hiç bulunmayan, fakat çok ince daneli hale getirildiğinde, normal hava sıcaklığında ve nemli ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştiklerinde hidrolik bağlayıcı özelliğine sahip olan silisli veya silisli alüminli malzemeler” olarak tanımlanır.

Dünyadaki ve Türkiye’deki SSB baraj yapımında daha çok yapay puzolan kullanılmakta olup en yaygın olarak da uçucu kül kullanılmaktadır. Türkiye’de yapılan Beydağ Barajı’nda 30 kg/m^3 , Cindere Barajı’nda 20 kg/m^3 , Çine Barajı’nda 50 kg/m^3 uçucu kül kullanılmıştır (Andriolo ve Polat, 2006). Uçucu kül, toz haline getirilmiş linyit veya taş kömürünü yakıt olarak kullanan termik santrallerinin bacalarındaki tozların elektrostatik filtrelerle tutulması ile elde edilen malzemedir.

Uçucu kül (diğer puzolanlar gibi), çimento hamurunda oluşan kalsiyum hidroksit ve alkali hidroksitler ile reaksiyona girmektedir. Ayrıca, zararlı alkali-agrega reaksiyonunu önlemede uçucu külün bir koruyucu malzeme olduğu gözlemlenmiştir. Uçucu külün bünyesinde

bulunan camsı yapıdaki silikatlar ile çimentoda var olan alkali hidroksitler arasındaki reaksiyon, alkalileri tüketeceği veya miktarını çok azaltacağı bilinmektedir. Bu nedenle uçucu külün, reaktif silisli agregalar ile reaksiyona girecek olan alkalilerin miktarındaki azaltarak alkali agrega reaksiyonunun neden olacağı betondaki genleşme ve çatlamayı önleyici veya azaltıcı etkisi olabilir (Mindness et al., 2003).

Uçucu külün çökme değeri sıfır olan betonun işlenebilirliğini arttırması ve kütle betondaki hidratasyon ısını düşük seviyede tutması gibi yararları da vardır. Uçucu külün özellikle SSB baraj inşaatında önemi olan prizi geciktirme özelliği de bulunmaktadır. Uçucu kül betonun dayanıklılığının artmasına da katkıda bulunur. Dayanıklılık, betonun hizmet süresince kimyasallara, aşınmaya ve don gibi yıpratıcı etkilere karşı koyma yeteneğidir. Uçucu kül, çimento hidratasyonu ile açığa çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek boşlukları doldurur ve betonun geçirimsizliğini azaltır (Mehta and Monteiro, 1996). Ayrıca küçük uçucu kül taneleri reaksiyona girmeden de beton içindeki boşlukları fiziksel olarak doldurarak geçirimsizliğe katkıda bulunabilir.

Sonuç olarak SSB karışımında uçucu kül kullanımının amaçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Betonun hidratasyon ısını en aza düşürmek, enine derzlerin sayısını azaltmak,
- Sıfır çökme değeri olan betonun işlenebilirliğini arttırmak,
- Beton içinde oluşacak su kaçaklarını en aza indirmek,
- Betona uzun sürede daha yüksek dayanım kazandırmak,
- Dolgu malzemesi olarak boşluk oranını düşürmek,
- Betonun rötresini arttırmak,
- Çimento miktarını azaltarak beton maliyetini düşürmek (Andriolo, 1998; Hansen and Reinhardt, 1991).

SSB karışımlarında uçucu kül kullanımı için tavsiye edilen dozaj, toplam bağlayıcı (çimento+uçucu kül) miktarına oranı genelde %60 mertebesinde. Ürdün'deki Mujib barajında agrega, bazaltın kırılması ile üretildiğinden ve agreganın 200 No'lu elekten geçen miktarı puzolanik etki gösterdiğinden karışıma uçucu kül ilavesi yapılmamıştır. Yüksek oranda uçucu kül içeren karışımlar çok şiddetli don olayı yaşayan bölgelerde, yüksek barajlarda ve birinci derecede deprem kuşağında uygulama sahası bulur. Daha düşük oranlarda uçucu kül içeren karışımlarla, agreganın özelliğine bağlı olarak yüksek basınç dayanımları elde edilebilmektedir. SSB barajlarda uçucu kül sadece portland çimentosu ile kullanılır (Anık ve Alkan, 2004).

Uçucu külün özgül ağırlığı çimentoya oranla daha düşük olduğundan çimento yerine aynı ağırlıkta uçucu kül kullanıldığında, hacim artacağından, beton daha plastik kohesiv hale gelir ve işlenebilirliği artar.

Beton şartnameleri, beton karışımına uçucu kül katılmasını öngörüyorsa, genellikle F sınıfı uçucu kül kullanılması şartını getirmektedir. C sınıfı uçucu kül kullanılarak yapılan SSB barajlar az sayıda da olsa bulunmaktadır.

F sınıfı uçucu külün kullanım sebepleri mukayeseli olarak aşağıda verilmiştir (Anık ve Alkan, 2004):

- F sınıfı uçucu kül betonun priz süresini uzatır. C sınıfı uçucu küllerin bazıları da bu görevi yerine getirebilir.
- F sınıfı uçucu kül, betonu sülfatlara karşı daha dayanıklı yapar, C sınıfının bu görevi yerine getirebilmesi için karışımdaki miktarının artırılması gerekir.
- F sınıfı uçucu kül kaliteli kömür yakılan santrallerden elde edildiği için, SSB baraj inşası süresince, fiziksel ve kimyasal

özelliklerinin uniform kalma olasılığı daha yüksektir. C sınıfı uçucu küllerde bu olasılık azalmaktadır.

- F sınıfı uçucu külü camsı yapıda olduğundan dolayı, çimentodaki alkalilerle kimyasal reaksiyona girer. Agregadaki reaktif danelerle, çimentonun içindeki alkaliler arasında oluşacak alkali-agrega reaksiyonunu azaltır.
- F sınıfı uçucu külde alkali madde içeriği oldukça düşüktür. Reaktif agregalar dikkate alındığında F sınıfı daha avantajlıdır.
- C sınıfı uçucu kül, içindeki yüksek CaO içeriği dolayısı ile (genellikle %10'un üzerinde) betona erken dayanım kazandırabilir.
- C sınıfı uçucu külde kristal yapıdaki bileşenler suda erir. Özellikle CaO eridiği için çabuk reaksiyona girer. F sınıfı uçucu külde, suda eriyen madde hemen hemen bulunmaz.
- C sınıfı uçucu külün çimento yerine kullanılma oranı daha yüksek olabilir.

Gerek C sınıfı ve gerekse F sınıfı uçucu küllerin pek çoğunun alkali-agrega reaksiyonundan kaynaklanan beton genleşmesini azaltma özelliği vardır. Uygun bir uçucu kül kullanılması ile, reaktif agrega kullanılması gereken hallerde düşük alkalili çimento kullanma şartı ortadan kalkabilir (Anık ve Alkan, 2004).

TS EN 451-1'e göre uçucu küller; CaO oranı %10'un altında ise düşük kireçli , %10 üzerinde ise yüksek kireçli olarak sınıflandırılır.

Çizelge 3.2'de ASTM C618'e göre uçucu kül sınıflandırılması görülmektedir. ASTM C618 uçucu külleri (Sınıf F) ve (Sınıf C) olmak üzere iki sınıfa ayırır. F sınıfı uçucu küller genellikle antrasit-taşkömürü, bitümlü kömür ve yüksek kalorili linyit kullanan termik santrallerden elde edilir. Düşük kalorili linyit ve bitümlü kömür yakan santrallerin uçucu külleri genellikle C sınıfı uçucu kül tanımına girer. Her iki sınıfın

şartlarını karşılamayan uçucu küllerin beton karışımında kullanılmasına müsaade edilmez. F sınıfı karbon zengini ve düşük kireçli, C sınıfı ise kireç zengini uçucu küldür (Anık ve Alkan, 2004).

Çizelge 3.2: F sınıfı ve C sınıfı uçucu küllerin özellikleri (Anık ve Alkan, 2004)

Şartlar	F sınıfı	C sınıfı
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ¹ : min. %	70	50
Sülfür tiroksit (SO_3): maks. %	5	5
Nem içeriği: maks. %	3	3
Kazdırma kaybı : maks. %	6 (12) ²	6
Alkali içeriği (Na_2O eşdeğeri): maks. % ³	1.5	1.5
CaO içeriği: % ⁴	<10	>10
MgO içeriği: %	<5	<5
Özgül ağırlık	<2.4	2.4-2.8
Alkali eşdeğer (Na_2O eşdeğeri): %	<5	5-10
1) Genelde SiO_2 (%25-60), Al_2O_3 (%10-30) ve Fe_2O_3 (%5-25) arasında değişmektedir. 2) F sınıfında karbon içeriği dikkate alınarak kızdırma kaybı %12 ye kadar tolere edilebilir. Betonda kullanılan uçucu külden genel olarak %6'dan düşük kızdırma kaybı aranır. Kızdırma kaybı yükselirse hava sürükleyici katkı gereksinimi artabilir 3) %1.5 şartı agregalar reaktif ise müşteri (kullanıcı) tarafından şart koşulabilir. ASTM'in aradığı şart değildir. Na_2O eşdeğeri alkali içeriği genel olarak sınıf F'de %5'den ve sınıf C'den %10'dan azdır. 4) CaO miktarı %10'dan düşük ise uçucu kül F sınıfı , %10'dan büyük ise uçucu kül C sınıfı'dır. Ancak F sınıfı için, ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) içeriğinin de %70'ten yüksek olması gerekir.		

F sınıfı uçucu külden aktif ana bileşen camı yapıda silisli cam veya alüminli silikattır. C sınıfı uçucu külden aktif eleman ise camı yapıdaki kalsiyum-alüminyum silikattır. C sınıfında camı yapı da düşük ve kristal yapı daha hakimdir. Kristal yapının hakim olduğu puzolanlar,

kristal daneler reaksiyona giremeyeceği için beton dayanımına olumlu yönde etki yapmaz. Bunlar, sadece dolgu malzemesi olarak görev yapar. Çimento hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum ve alkali hidroksitlerle reaksiyona camsı yapıdaki danecikler girer.

F sınıfı uçucu külün, puzolanik etkisi yüksek, fakat bağlayıcı özelliği zayıftır. C sınıfı uçucu külün hem puzolanik hem de bağlayıcı özelliği vardır (Anık ve Alkan, 2004).

Çizelge 3.3'te dünyada yapılan bazı SSB barajların karışımalarında kullanılan imento ve mineral katkı miktarları gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Bazı barajların çimento ve mineral katkı miktarları
(Andriolo, 1998)

Barajlar	Çimento (kg/m ³)	Mineral katkı (kg/m ³)	Toplam (kg/m ³)
Tamagava	91	39	130
Sakaigava	91	39	130
Mygase	91	39	130
Urayama	91	39	130
Yugoslavya	100	60	160
Uruguay	60	---	60
Willow Creek	47	19	66
Winchester	104	---	104
Middle Fork	66	---	66
Galesville	54	52	106
Monksville	64	---	64
Upper Still Water	80	173	253
North Loop	119	56	175
Cedar Falls	140	92	232
Lower Chase	64	40	104
Copperfield	95	15	110
Craigbourne	70	60	130
Buccaweir	90	90	180
Mistraal	58	58	116
Zaaihoek	36	84	120
Olivettes	88	47	135
Rwedat	60	---	60
Itaipu	91	26	117
Saco Nova Olinda	75	---	75
Tucurui	58	34	92
Capanda	70	---	70
Jordao	75	---	75
Salto Caxias	100	---	100
Erizana	90	90	180
Santa Eugenia	130	110	240

3.2.2. Agregas

SSB’de aynı geleneksel betonda olduğu gibi ince (4 nolu elekten geçen) ve iri agregas kullanılmaktadır. Genel olarak iri agreganın toplam agregaya oranı %50’den fazladır. SSB’lerde kullanılan agregas hacimsel olarak %85’den fazla olduğu için agregas özelliği SSB özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu zellikler basınç, çekme ve kesme dayanımı, elastik özellikler, termal özellikler ve dayanıklılığıdır. Bu yüzden daha yoğun, dayanımı yüksek ve üniform bir SSB elde etmek için daha kaliteli ve uygun gradasyonda agregas seçimi yapılması gerekmektedir (Andriolo, 1998). Böylece SSB taze haldeyken ayrışmaya uğrama ihtimali azalacaktır. Kırma ve doğal agregas SSB retiminde kullanılabilir. Betonun harç ihtiyacını agregas boşluk hacmi ve tane şekli belirlemektedir. SSB’de en büyük tane boyutu, 200 nolu elekten geçen miktar ve kum içeriği gibi özellikler geleneksel betondakine göre bazı farklılıklar göstermektedir. SSB betonlarında agreganın tane şeklinin dayanıma etkisi klasik betonlara göre daha azdır. Bu olay karışırma, taşıma ve sıkıştırma ekipmanlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. %30’a kadar düz ve uzun parçalar SSB betonlarında kullanılır (U.S. Department of the Interior BR, 1987). Alkali-agregas reaksiyonu oluşum potansiyeli SSB’de klasik betonlara göre daha azdır. Bunun nedeni ise SSB’nin düşük imento ve su içeriğidir (Ağıralioğlu, 2005).

Yapılan çalışmalarda yıkanmamış agregas SSB yapımında başarıyla kullanılmıştır (Hansen and Reinhardt, 1991).

Beton agregalarının seçimi için yapılan deneyler izelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4: Agregada deneyleri (Andriolo, 1998).

Özellik	ASTM	TS
İri ve ince agregada elek analizi	C136	130
200 nolu elekten geçen ince madde oranı	C117	3527
İnce agregasındaki organik madde oranı	C40	EN 1744-1
Agreganın petrografik analizi	C295	10088 EN 932-3
İnce agregada özgül ağırlık ve su emme oranı	C218	EN 1097-6
İri agregada özgül ağırlık ve su emme oranı	C127	EN 1097-7
Agregada birim ağırlık ve boşluk oranı	C29	3529
Sodyum sülfat veya magnezyum sülfat ile dondayanıklılık testi	C88	EN 1367-1
Los-angeles aşınma oranı	C131-535	EN 1097-2
Agregada kil toprakları ve parçalanabilir malzeme oranı	C142	

3.2.2.1. İri Agregada

SSB’de kullanılacak en büyük agregada tane boyutu genellikle 76 mm’dir. Bundan daha büyük dane çaplı agregalar büyük ayırışma problemi yaratacağından ve daha büyük üretim, taşıma ve serme ekipmanları gerektireceğinden dolayı ekonomik olmamaktadır. Terbela Barajı’nda kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 220 mm’dir Japonya’da yapılan çoğu silindir ile sıkıştırılmış barajlarda en büyük agregada tane boyutu 150 mm olup çok sıkı döküm kuralları ve derz iyileştirme yöntemleri ile birlikte uygulanmıştır (Andriolo, 1998).

Agregada boyutları SSB’nin sıkışabilme özelliğini etkilemektedir. SSB katmanlarının serilme yüksekliğinin en büyük tane boyutunun en az 3 katı olması gerekmektedir (Hansen and Reinhardt, 1991). Büyük tane çaplı betonlarda daha büyük sıkıştırma kuvveti gerekmektedir. 38 mm’den daha büyük tane çaplı SSB’lerde ayırışma ihtimali yüksektir. Ayırışmayı önlemek amacıyla üretim, taşıma ve serme ekipmanlarının doğru seçilmesi gerekmektedir. En büyük tane boyutu seçiminde yeterli dayanım, bağlanma ve geçirimsizliği sağlamak üzere ayırışmayı da önleme

maliyeti göz önüne alınmalıdır (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

Geleneksel betonda olduğu gibi en büyük tane boyutu arttıkça agreganın boşluk oranı azalır ve böylece harç miktarı da azalmış olur. Harç ihtiyacının azalmasından dolayı baraj gibi büyük kütleli SSB’lerde hidrasyon ısısından doğabilecek termal çatlamalarının önüne geçilmiş olacak ve maliyetlerde azalma görülecektir. Ayrıca agreganın üretim maliyeti de azalmış olacaktır (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

3.2.2.2. İnce Agreganın

İnce agreganın gradasyonu SSB’nin harç miktarını belirler. İnce agreganın gradasyonu, tipi, kalitesi; SSB’nin sıkıştırılması için gerekli enerjiyi ve ayrıca optimum sıkıştırmayı elde edebilmek için silindirlerin geçiş sayısını etkiler. Buna ilaveten, agregalar arasındaki boşlukları dolduracak ve agreganın çevresini saracak hamur içeriğini de belirler. Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB’lerde kum miktarı genellikle toplam agreganın yüzde 30 ile 50 arasında olmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB’lerde ise kum oranı toplam agreganın %40-55 arasındadır. İnce agreganın plastik olmayan bir yapıda ise agregadaki boşlukları doldurur, su ihtiyacını azaltır ve sıkıştırılabilirliği özelliğini artırır. Beydağ Barajı’nda ince agreganın oranı toplam agreganın %50’si kadardır. İnce agreganın oranı %50 civarında tutularak beton daha kohezif hale getirilip ayrışma oluşma potansiyeli düşürülmektedir (Andriolo vd., 2006).

3.2.2.3. Çok İnce (200 Nolu Elekten Geçen) Malzeme

SSB'nin sıkıştırılabilirliğini ve harç içeriğini; içindeki çok ince malzeme miktarı etkilemektedir. SSB içindeki boşlukları doldurduğu için çok ince malzeme oranı arttıkça bağlayıcı ve su miktarı azalmaktadır. Plastik olmayandan düşük plastisiteye kadar olan ince malzeme SSB imalatında başarıyla kullanılmıştır. Plastisite indisi 4 veya daha az olan ince maddeler inşaat esnasında problem yaratmaz. Plastisite indisi 5 ile 7 arasında olan ince maddeler, laboratuvar deneyleri ile yeterince araştırılıp, ince malzeme, topaklanma yaratmadığı ve işlenebilirliği düşürmediği takdirde karışımda kullanılabilir. Ancak, plastisite indisi 7'den fazla olan ince malzemenin SSB'de kullanılması arzu edilemez (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

Kil topakları olarak, kil, silt ve normal karıştırma işlemi ile parçalanamayan kum topaklaşmaları kast edilmektedir. Yüksek oranda kil topağı içeren SSB karışımları, yapının zayıflamasına neden olur. Karışım esnasında çimento, kil topaklarının arasına işlememekle birlikte toprak yüzeyini sarar. Buna ilave olarak yüksek oranda kil topakları SSB karışımı için gerekli ince malzemeyi azaltır ve karışım oranlarını değiştirir. Agregatör ocak tayini esnasında, tabii rutubetteki agreganın 4.76 mm elekten elenerek muhtemel kil topağı oranı tespit edilmelidir (U.S. Department of the Interior BR, 1987). %10 veya daha fazla oranda kil topağı içeriği (ıslak kütle olarak) inşaat esnasında sıkıntı yaratabilir. Kilin yüksek orandaki su emme kabiliyeti SSB'nin büzülmesine neden olmakta, çatlama riskini arttırmakta ve dolayısıyla basınç dayanımını düşürmektedir. Agreganın su emme kapasitesi, su içeriği, plastisitesi ve toplam ince madde oranındaki değişiklik, karışımın su ihtiyacını, dolayısıyla, sıkıştırılabilirliğini etkiler. Bu da tabakalar arasında kalacak boşluk miktarını ve dayanımını etkilemektedir (Hansen and Reinhardt, 1991).

Yüksek oranda çok ince malzeme içeren karışımlar; karışım esnasında veya doğal olarak kil veya silt topakları oluşturma eğilimi taşır. SSB karışımında bu tür topaklar yapışmada ve dayanımda zayıflatıcı rol oynamalarında, kabarmalar, düşük dayanıklılık, karıştırmada ve işlemede görülen (mikser paletleri ve hareketli banta yapışarak verimi düşürmeleri gibi) olumsuzluklar nedeni ile arzu edilmez. Aşırı ince taneler, yüksek oranda su emme özellikleri ile taşıma esnasında taze SSB işlenebilirliğini düşürür ve sertleşmiş betonda da donma-çözülme direncini azaltır. Agregaya yığını içinde kümeleşen bu topaklar karışım esnasında dağılarak SSB'nin su ihtiyacını arttırabilirler (U.S. Department of the Interior BR, 1987). Genel olarak:

- 200 nolu elekten geçen malzeme agregalar arasındaki boşlukları dolduracak miktarda olması ve
- Plastisite indisinin 5'ten küçük olması gerekmektedir.

Birçok baraj inşaatında yıkanmamış agregaya kullanılmıştır. Düşük dozajlı SSB barajlarında 200 Nolu elekten geçen miktar toplam agregaya kütlelerinin %8-10'u kadardır. Optimum miktarı bulabilmek için deneysel çalışmanın yapılması gerekmektedir. Daha çok siltli malzemeler kullanılmaktadır. İnce malzeme bu oranlarda tutularak (Hansen and Reinhardt, 1991):

- SSB'nin işlenebilirliğini arttırır,
- SSB'nin sıkıştırılabilirliğini arttırır,
- Agregalar arasındaki boşlukları doldurarak SSB'nin dayanımını arttırır,
- Betonun geçirimsizliğini arttırır,
- Boşlukları doldurarak SSB'nin su ihtiyacını azaltır,
- SSB'nin kohezyonunu arttırarak ayrışmayı azaltır.

Beydağ Barajı hazırlık çalışmalarında mevcut dere agregasında yapılan çalışmalarda 200 no'lu elekten geçen miktar %3.5 ile %5

arasında olduğu tespit edilmiştir. 200 no’lu elekten geçen miktarın azlığı sebebiyle daha yüksek oranda puzolanik madde kullanılmıştır. Böylece dere agregası yıkanmadan doğrudan SSB’de kullanılabilmiştir (Andriolo vd., 2006).

3.2.2.4. Agreg a Tane Dağılımı

SSB’de kullanılan agreganın tane dağılımı geleneksel betonda olduğu gibi hassas bir şekilde olmakla birlikte, hiçbir sınıflandırma bulunmadan da kullanılabilir. İnce ve iri agreganın tane dağılımı ve karışım oranları SSB özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Agreg a tane dağılımı ve oranları iki yaklaşımda farklı özellikler göstermektedir. Bunun başlıca sebepleri; en büyük tane boyutu, ince agreg a/200 nolu elekten geçen malzeme oranı ve sınıf sayısı gibi özelliklerinin farklı oluşlarıdır (Andriolo, 1998).

Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB’lerde agreg a tane dağılımı geleneksel betonla benzer özellikler taşımaktadır. Genellikle kullanılan en büyük tane boyutu 75 mm olmakla beraber Tamagawa Barajı’nda 150 mm, Upper Stillwater Barajı’nda 50 mm, Beydağ Barajı’nda 50 mm boyutunda agreg a kullanılmıştır (Andriolo, 1998).

En büyük tane boyutu 75 mm olarak tasarlanan SSB’lerde agreg a, genellikle 4 sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar 0-4.75 mm, 4.75 mm-19 mm, 19mm -38 mm, 38 mm-75 mm’dir (Andriolo, 1998).

Özellikle ince agreganın şekli ve tane dağılımı SSB’nin işlenebilirliğini ve yoğunluğunu etkileyen en önemli özelliklerinden birisidir. Bu özellikler ayrıca, SSB’nin dayanımını ve geçirimsizliğini etkilemektedir. SSB’nin işlenebilirliği üretim, taşıma ve serme

ekipmanlarının seçimini de etkilemektedir. SSB’de oluşabilecek ayrışmayı önlemek amacıyla, en büyük tane boyutunu daha düşük seçmek ve ince malzeme oranını arttırmak gerekmektedir.

Zemin yaklaşımı ile tasarlanan SSB’lerde ayrışma oluşma potansiyeli yüksek olduğundan dolayı en büyük tane boyutu genellikle 50 mm olarak seçilmektedir. 200 nolu elekten geçen miktar %0-%15 arasında değişmektedir. Bu nedenle, bir çok durumda agregalar yıkanmadan kullanılabilir (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Corps of Engineers (2000) tarafından belirtilen ideal iri agrega gradasyonları Çizelge 3.5 ve ideal ince agrega gradasyonları ise Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.7’de dünyada yapılan bazı SSB barajlarında kullanılan agega gradasyonları gösterilmiştir (Andriolo, 1998).

Çizelge 3.5:İdeal iri agrega gradasyonu (USACE, 2000).

Elek açıklığı	Kümülatif geçen iri agrega oranı (%)		
	4.75-75 mm	4.75-50 mm	4.75-19.0 mm
75 mm	100	---	---
63 mm	88	---	---
50 mm	76	100	---
37.5 mm	61	81	---
25.0 mm	44	58	---
19.0 mm	33	44	100
12.5 mm	21	28	63
9.5 mm	14	18	41
4.75 mm	---	---	---

Çizelge 3.6:İdeal ince agreg gradasyonu (USACE, 2000).

Elek açıklığı	Kümülatif geçen ince agreg oranı (%)
9.5 mm	100
4.75 mm	95-100
2.36 mm	75-95
1.18 mm	55-80
600 µm	35-60
300 µm	24-40
150 µm	12-28
75 µm	6-16
İncelik modülü	2.10-2.75

Çizelge 3.7 Amerika'daki bazı barajların agreg gradasyonları (ACI207.5R-99)

Elek Açıklığı	Willow Creek	Upper Stillwater	Christian Siegrist	Zintel Canyon	Stagecoach	Elk Creek
100 mm	—	—	—	—	—	—
75 mm	100	—	—	—	—	100
62 mm	—	—	—	100	—	96
50 mm	90	100	—	98	100	86
37.5 mm	80	95	100	91	95	76
25 mm	62	—	99	77	82	64
19 mm	54	66	91	70	69	58
9.5 mm	42	45	60	50	52	51
4.75 mm	30	35	49	39	40	41
2.36 mm	23	26	38	25	32	34
1.18 mm	17	21	23	18	25	31
0.60 mm	13	17	14	15	15	21
0.30 mm	9	10	10	12	10	15
0.15 mm	7	2	6	11	8	10
0.075 mm	5	0	5	9	5	7
Ç + U*	80 + 32	134 + 291	100 + 70	125 + 0	120 + 130	118 + 56
İnce Malzeme	20%	21%	19%	21%	—	21%
İşlenebilirlik	Zayıf	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	İyi	Mükemmel

* Ç: Çimento, U: Uçucu Kül

SSB karışımında hedeflenen en önemli parametrelerden biri maximum birim hacim ağırlığı yani en düşük boşluk oranını elde edebilmektir. Bu nedenle; SSB üretiminde kullanılacak nihai agreganın tane boyu dağılım eğrisi aşağıda verilen kübik dağılıma olabildiğince yakın düzenlenmelidir (Andriolo, 1998):

$$P = (d / MSA)^{1/3} \times 100\% \quad (3.1)$$

Burada:

d = Elek göz açıklığı,

MSA = Maksimum tane boyutu

En büyük tane boyutu 75-150 mm olan karışımlarda kum oranı yaklaşık olarak %35'lerde tutulur ki, bu hem ayrışmanın önlenmesi ve hem de iri agreganın arasındaki boşlukların doldurulması açısından gereklidir (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

3.2.2.5. Su

Normal beton yapımında kullanılan su SSB yapımında da kullanılabilir. Karışım suyunun içilebilir nitelikte olması ve içinde yağ, asit, tuz, alkali, organik madde ve diğer zararlı maddelerin bulunmaması gerekmektedir. Karışımlarda kullanılacak karma suyunun miktarı kullanılan agreganın şekli ve inceliğine, bağlayıcı tipi ve miktarına bağlıdır (Ağralıoğlu, 2005). En büyük tane boyutu 50 mm olan SSB karışımlarının su miktarı 90-160 kg arasında değişmektedir. Yüksek miktardaki mineral katkılar ve 200 nolu elek altı malzeme su ihtiyacını artırır (Andriolo, 1998).

3.2.2.6. Kimyasal Katkılar

Normal betonda kullanılan katkıları SSB’de de kullanılabilir. Daha az su içeriğine ve daha az karıştırma süresine sahip olduğundan, kimyasal katkıların SSB üzerindeki etkisi daha azdır. Bu yüzden SSB’lerde normal betonlara göre daha yüksek miktarda katkı kullanılır (Gauthier and Marchand, 2005). SSB’de kullanılan katkıları ASTM C494 “Standart Spesification For Chemical Admixtures For Concrete” kriterlerini sağlamalıdır (PCA, 2006). Kimyasal katkı maddeleri SSB’nin işlenebilirliğini arttırmak ve priz süresini geciktirmek amacıyla kullanılır. Özellikle sıcak havalarda kimyasal katkı kullanılarak SSB’de oluşabilecek soğuk derzlerin önüne geçilir. SSB karışımlarında kullanılan kimyasal katkıları şunlardır:

- Su azaltıcı katkıları: Bu katkıları kuru kıvamdaki SSB’nin su miktarını değiştirmeden veya azaltarak işlenebilirliğini artırır. Ayrıca bu katkıları su miktarını azaltacağı için daha ekonomik SSB elde edilebilir. Daha önceden yapılan çalışmalar, su azaltıcı katkı dozajının normal betona kıyasla üretici firmanın önerdiği minimum dozajın genellikle 4 katı olduğunu göstermiştir (Gauthier and Marchand, 2005).
- Priz geciktiriciler: SSB’nin daha uzun süre işlenebilir halde tutulabilmesi için kullanılmaktadır. Özellikle baraj inşaatlarında üzerine gelecek diğer SSB tabakasıyla daha iyi bir kaynaşma sağlar.
- Hava sürükleyici katkıları: Donma-çözünme etkisinin görüldüğü soğuk iklimli yerlerde SSB’yi korumak amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda SSB’de kullanılan hava sürükleyici katkı miktarı normal betonlara göre daha yüksek olmaktadır (USACE, 2000). Piggott (1999), SSB’nin kabul

edilebilir limitlerdeki donma-  z  nmeye kar   dayanıklılığının hava s  r  kleyici katkı kullanmadan da elde edilebildiğini, bu y  zden bu katkılarının SSB’lerde yaygın olarak kullanılmadığını belirtmi  tir. Ayrıca SSB karı  ımlarına hava s  r  kleme i  lemi zor olmaktadır (PCA, 2006).

4. TAZE VE SERTLEŞMİŞ SSB ÖZELLİKLERİ

Taze veya sertleşmiş SSB özellikleri normal betona göre bazı farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıkların en önemli sebeplerinden biri düşük bağlayıcı madde içeriğidir (Gauthier and Marchand, 2005).

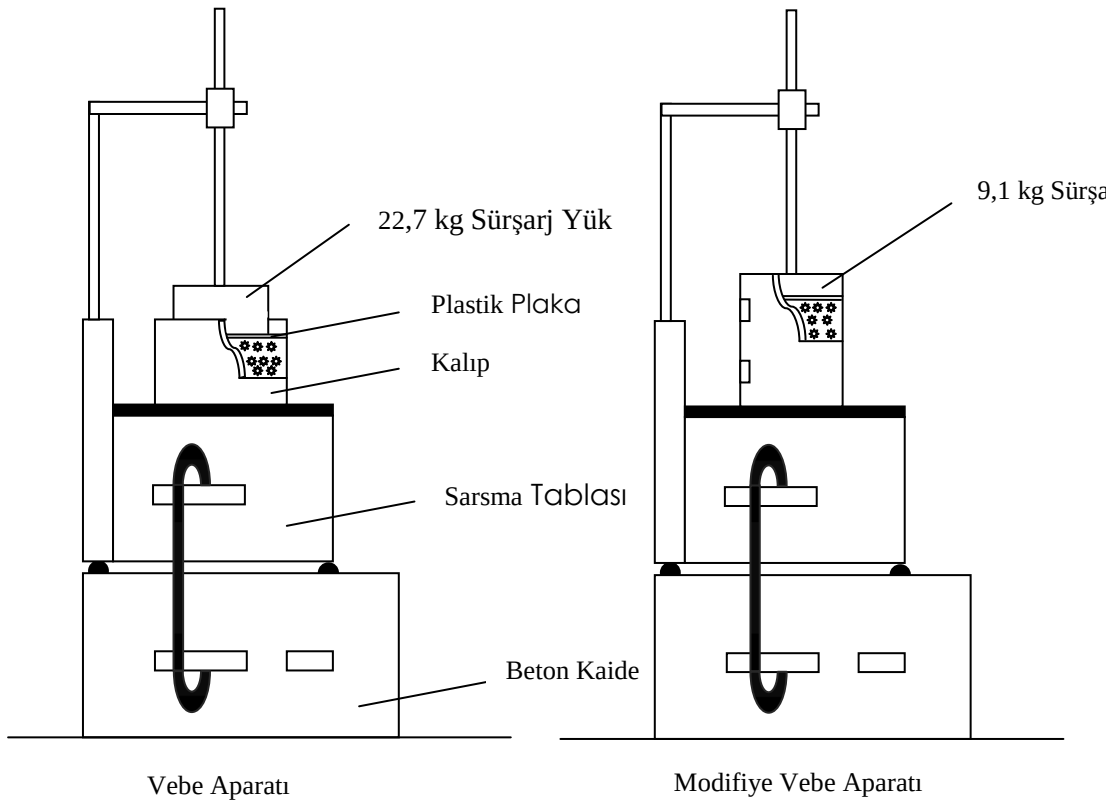
4.1. Taze SSB Özellikleri

4.1.1. İşlenebilirlik

SSB'nin işlenebilirliği, zararlı derecede bir ayrışmaya neden olmadan karıştırılabilme, taşınabilme, serilebilme ve sıkıştırılabilme yeteneklerini kapsayan önemli bir özelliktir (Erdoğan, 2003).

SSB'nin sıkıştırılabilmesi için uygun bir kıvamda olması gerekmektedir. İşlenebilirliğe etki eden faktörler normal betonda olduğu gibi agrega gradasyonu, çimento, mineral katkı, ince malzeme, su ve hava içeriğidir. Agrega boşluklarını dolduracak yeterli kadar harç bulunduğu zaman SSB'nin işlenebilirliği Vebe aleti ile ölçülebilir (TS EN 12350-3 "Vebe Deneyi", ASTM 1170 "Standart Test Method For Determining Consistency and Density Of RCC Using a Vibrating Table"). Vebe deney yöntemi, SSB gibi kuru, çok kuru ve aşırı kuru betonların kıvamını bulmaya yarayan bir yöntemdir (Şekil 4.1). Belirli bir süre içerisinde Vebe aletinin yükleme plakasının etrafına az bir miktar macun çıkmasına olanak sağlayan su miktarı ve kıvam karışım için uygundur. Karışım oranlarına göre Vebe zamanı çok farklılık göstermektedir. Zemin yaklaşımıyla yapılan SSB karışımlarının Vebe zamanı 45 sn'den fazla, beton yaklaşımıyla yapılanların ise 45 sn'den az olmaktadır. Yeterli miktarda harç içermeyen SSB'lerin kıvamı Vebe aleti ile ölçülemeyebilir. Bu tip karışımların işlenebilirliği, yerleştirme ve

sıkıştırma sırasındaki sıkışmış birim hacim ağırlık ve su içeriği ölçümleri ile birlikte gözlemlenerek incelenir (ACI , 1999).



Şekil 4.1: Vebe aparatı ve modifiye Vebe aparatı (Delatte et. Al., 2003)

Uygulanan sürşarj yük, Japonya’da 20 kg alınmaktadır. Ancak bu değerler Corps of Engineers tarafından 12.5 kg ve Bureau of Reclamation tarafından ise 22.7 kg olarak önerilmektedir. Sürşarj yükün ağırlığı arttıkça aynı karışım için Vebe süresi azalmaktadır. Vebe süresinin kısa olması karışımın daha akıcı kıvama sahip olduğunu göstermektedir (Andriolo, 1998).

4.1.2. Birim Hacim Ağırlık

Yaklaşık %80'ini agregaya oluşturan betonun, birim hacim ağırlığı agreganın birim hacim ağırlığından doğrudan etkilenmektedir. SSB'nin birim hacim ağırlığı aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

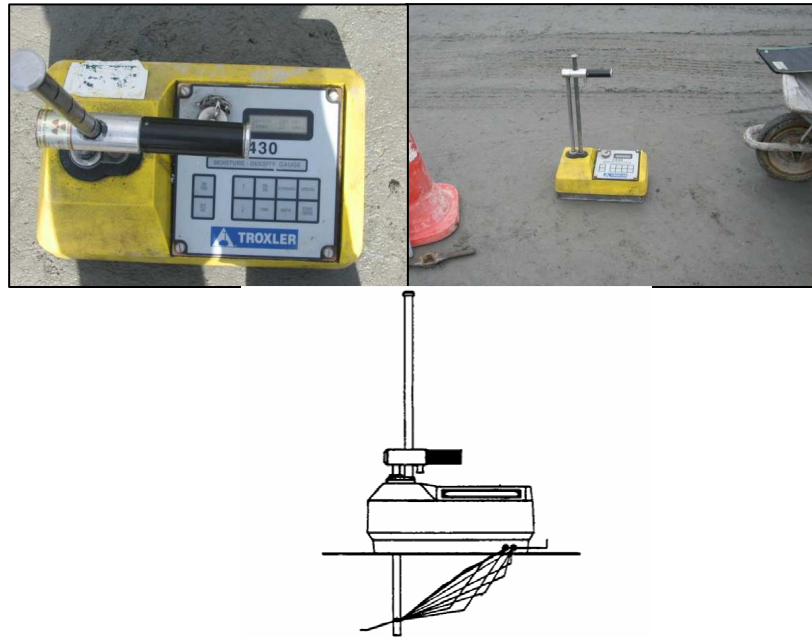
- İnce ve iri agregaların en sıkı katı malzeme ve en az boşluk oranı verebilecek tane boyutu dağılımına,
- Sıkıştırmayı etkileyerek agregalar arasındaki hava boşluğunu en aza indirecek ince agregaya/toplam agregaya oranına,
- İri agregaya taneleri arasındaki hava boşluklarını dolduracak harç miktarına,
- İnce agregaya taneleri arasındaki hava boşluklarını dolduracak hamur miktarına,
- Su içeriği ve su/bağlayıcı madde oranına,
- İşlenebilirliğine,
- Sıkışma oranına.

SSB ve geleneksel betonda aynı kalitede agregaya kullanıldığı takdirde SSB'nin birim hacim ağırlığı geleneksel betona göre daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni ise SSB'nin düşük çimento içeriğine sahip olması, boşluk miktarının az olması ve yüksek sıkıştırma oranıdır. SSB'nin birim hacim ağırlığı genel olarak $2240\text{--}2560\text{ kg/m}^3$ arasında değiştirmektedir. Sismik aktivite olan bazı projelerde birim hacim ağırlığı tasarımda ve maliyette önemli rol oynamaktadır (Hansen and Reinhardt, 1991).

SSB'nin ıslak birim hacim ağırlığı laboratuvar ortamında modifiye Proktor (ASTM D1557 "Standart Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort") ile hesaplanabilmektedir. Sıkıştırma esnasında agregalar kırılabileceğinden

ve agregaların tane boyut dağılımı değişebileceğinden bu metodun uygulanması özel bir dikkat gerektirmektedir (Marchand, 2005).

Sıkıştırılmış SSB'nin arazideki ıslak birim ağırlığının ölçümü ASTM C1040 "Standart Test Methods For In Place Density of Unhardened and Hardened Concrete, Including RCC, By Nuclear Methods" 'a uygun olarak nükleer yoğunluk test aleti ile yapılmaktadır (Şekil 4.2). Nükleer cihaz, gama ışını ve nötron yayan bir kaynak ile dedektörden ibarettir. Alet, deney yapılacak zemin üzerine yerleştirilir ve geri saçılan ışınlar dedektörle sayılır. Sertleşmiş SSB'de yapılan nükleer yoğunluk okumaları SSB'nin optimum sıklık değerine ulaşip ulaşmadığını anlamak için yapılmaktadır. Optimum sıklık değerine ulaşamamışsa aksi yönde talimat verilinceye kadar sıkıştırmaya devam edilmelidir. Hızlı ve kolay bir deney olmasının sahada çok büyük yararı vardır.



Şekil 4.2. Nükleer yoğunluk test aleti

4.1.3. Ayrışma

Sekil 4.3' te görüldüğü gibi taze betonun içerisinde yer alan iri agrega ile çimento harcı herhangi bir nedenle ayrışabilir. SSB'deki esas hedeflerden birisi taşıma, serme, sıkıştırma esnasında ayrışmayı en aza indirmek amacıyla karışımın kohezyon değerini yükseltmektir. Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB'ler ayrışmaya daha yatkın olduğu için bu karışımların agregası uygun gradasyonda ve ince malzeme oranının fazla olması gerekmektedir. Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'ler ise daha kohesiv olduğu için ayrışma oranı daha azdır (ACI, 1988).



Şekil 4.3. Ayrışmaya uğramış SSB

SSB karışımlarında ayrışmayı önlemek için şu tedbirlerin alınması gerekmektedir:

1. Agreganın uygun gradasyonda olması,
2. Karışımın kohesiv olması,

3. İnce malzeme miktarının yeterli olması,
4. En büyük tane boyutunun 75 mm'den fazla olmaması ve mümkünse 38 mm'yi aşmaması,
5. Dere agregası yerine kırmataş kullanılması,
6. Kamyonlara yüklenen SSB'de ayrışmayı azaltmak için şekil 4.4'de görüldüğü gibi ek önlemler alınması,



Şekil 4.4. Ayrışmayı azaltmak için alınan yöntem

7. Kamyonların SSB'yi sıkışmamış SSB tabakası üzerine dökmesi,
8. Döküm yerinde ayrışmaya uğramış bölümün kürek yardımıyla tekrar karıştırılması (ACI Committee, 1988).

4.2. Sertleşmiş SSB Özellikleri

4.2.1. Basınç Dayanımı

SSB'nin basınç dayanımı; diğer özelliklerine göre tahmin edilmesi çok daha kolay bir parametredir. Diğer çoğu özellikler betonun belirli yaştaki basınç dayanımı ile ilgilidir. Baraj inşaatlarında hedef dayanımı olarak SSB'nin 90, 180 ve 360 günlük basınç dayanımları, yol kaplamalarında ise 28 günlük basınç dayanımı alınmaktadır (Andriolo, 1998). Baraj inşaatları için SSB'nin mineral katkı etkisinden dolayı daha uzun dönemlerdeki yaşı esas alınmaktadır. Bu yaşların seçiminde ise, yapı yükleme zamanı ve karışım özellikleri önem kazanmaktadır.

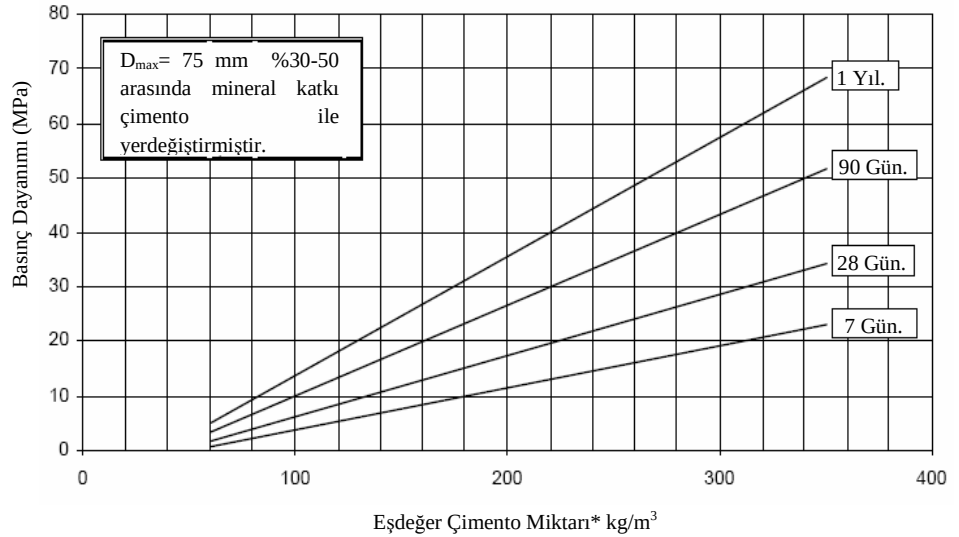
SSB'nin basınç dayanımını etkileyen özellikler şunlardır (Ağralıoğlu, 2005; Hansen and Reinhardt, 1991):

- Agregada kalitesi ve gradasyonu,
- Çimento tipi, içeriği,
- Pozolanik malzeme miktarı,
- Su içeriği,
- Sıkıştırma oranı.

İyi sıkıştırılmış SSB karışımında bu etkiler klasik betona yaptığı tesirlerin aynısını gösterir. Eğer SSB karışımı az sıkıştırılmış veya tüm boşlukları doldurmak için yeterince ince malzeme kullanılmamışsa, elde edilecek dayanım değerini sıkıştırma derecesi belirleyecektir (Hansen ve Reinhardt, 1991).

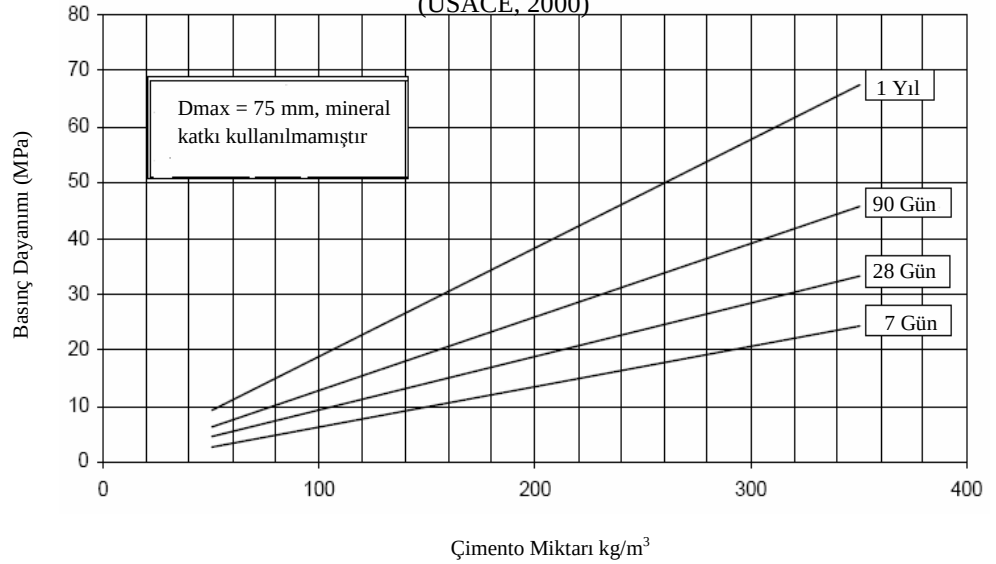
Tam sıkışma sağlanma koşulu ile basınç dayanımı; su miktarının azaltılmasıyla artmaktadır. Belirli bir karışım için en büyük basınç dayanımı optimum su muhtevasında belirlenmiş sıkıştırma kuvvetiyle elde edilir. Su miktarı optimum su muhtevasından düşük olduğu zaman

basınç dayanımı da düşmektedir. Basınç dayanımı SSB'nin bağlayıcı madde içeriği ve zamanla artmaktadır (Şekil 4.5, 4.6) (Ağırlioğlu, 2005).



* Hacim eşitleme yöntemi ile hesaplanır

Şekil 4.5. Mineral katkılı SSB'lerin çimento içeriği ile basınç dayanımı ilişkisi (USACE, 2000)



Şekil 4.6. Mineral katkı kullanılmayan SSB'lerin çimento içeriği ile basınç dayanımı ilişkisi (USACE, 2000)

SSB'nin basınç dayanımı içindeki bağlayıcı madde miktarına göre değişmektedir. Bu yüzden SSB karışımları için karışım verimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Karışım verimliliği ortalama dayanımının (MPa) bağlayıcı madde miktarına (kg/m^3) bölünerek bulunan bir büyüklüktür.

Genel anlamda SSB'nin karışım verimi ilerki yaşlarda geleneksel betonunkinden daha yüksek olmaktadır. Bunun anlamı, ileri yaşlarda belirli bir basınç dayanımı SSB'de daha az bağlayıcı madde kullanılarak elde edilebilir (Hansen and Reinhardt, 1991).

4.2.2. Çekme Dayanımı

SSB'nin çekme dayanımının basınç dayanımına oranı; agrega kalitesi, numune yaşı, çimento miktarı, dayanım ve sıkıştırma derecesi gibi bir çok faktöre bağlıdır.

SSB'nin çekme dayanımı belirlemek için doğrudan çekme metodu (CRD-C164 "Standart Test Method For Direct Tensile Strength of Cylindrical Concrete or Mortar Specimens"), yarmada çekme metodu (ASTM C496 "Standart Test Method For Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens"), eğilmede çekme metodu (ASTM C78 "Standart Test Method For Flexural Strength of Concrete (using simple beam with third-point loading)) gibi metotlarla ölçülebilir. Tüm çekme deneyleri; su muhtevasına, yaşa ve yük miktarına bağlıdır (Ağralıoğlu, 2005).

Geleneksel betonda olduğu gibi SSB çekme dayanımı da bağlayıcı madde miktarına ve yaşa göre değişmektedir. Yapılan deneylerde SSB'nin aynı normal betonda olduğu gibi çekme dayanımı, basınç

dayanımının yaklaşık %10-15'i kadardır (Andriolo, 1998) Cannon'a (1995) göre mukavemet düzeyi arttığında çekme mukavemetinin basınç mukavemetine oranı azalmaktadır (Ağıralioğlu, 2005).

Upper Stillwater barajında mansap eğimi nedeniyle esas dizayn parametresi olarak, çekme dayanımı alınmıştır. Minimum çekme dayanımı 360 günde 1.24 MPa'dır (Hansen and Reinhardt, 1991).

4.2.3. Kesme Dayanımı

Kesme dayanımı; SSB ağırlık barajlar için çok önemli bir özelliktir ve içsel sürtünme ile kohezyon arasındaki mohr zarfı ile temsil edilir:

$$S = c + \sigma \tan \phi \quad (4.1)$$

Burada:

S = Kesme mukavemeti (MPa),

c = Kohezyon,

σ = Normal gerilme (MPa),

ϕ = İçsel sürtünme açısıdır.

Sınırlandırılmış enine kesme mukavemeti için test metodu olarak adlandırılan CRD-C90 "Method of Test For Transverse Shear Strength Confined, Single Plane or Double Plane" standardı kullanılarak kesme dayanımı bulunur. Karot (SSB derzleri dahil) veya alınan numuneler kullanılarak genelde 3 taraftan etkiyen basınç altında deneyler yapılır. Barajlar için tahmin edilen yukarıdan etkiyen basınç, barajın minimum yüksekliğini temsil etmektedir. Yatay derzlerdeki kesme dayanımı ana betonunkine göre daha az olmaktadır. SSB'nin kesme mukavemeti,

laboratuvar numenelerinden veya alınan karot örneklerinden bulunabilir (USACE 2000). Minimum kesme mukavemeti inşaat derzlerinde ve yatay SSB tabakaları arasında görülmektedir (Andriolo 1998).

4.2.3.1. Ana Beton Kesme Dayanımı

Kohezyon; karışım oranı özellikle harç ve bağlayıcı madde miktarı ve numune yaşına göre değişiklikler göstermektedir. Sürtünme açısı ise agrega cinsi ve şeklinden etkilenmektedir. Sürtünme açısı karışım oranı ve yaşa göre değişmemektedir. SSB'nin kesme dayanımı özellikleri normal betona göre pek fazla farklı özellik göstermemektedir. SSB'deki kohezyon genellikle 0.5 MPa ile 4.1 MPa arasında değer alır (McLean ve Pierce, 1988). Kohezyon; basınç dayanımının %20'sine kadar çıkabilir. 30 saniyeden uzun Vebe zamanına sahip karışımların kohezyon değerleri, basınç dayanımının %10'undan azdır. SSB'lerin içsel sürtünme açıları 40 ile 60 derece arasında değişmektedir (USACE, 2000).

4.2.3.2. Yatay Derz Kesme Dayanımı

SSB yatay derzlerindeki kesme mukavemeti SSB baraj tasarımı için kritik öneme sahiptir. Çoğu projede SSB yatay derzlerdeki kesme mukavemeti normal betonlara göre daha düşük olmaktadır. Derz bölgelerindeki kohezyon değerinin düşük olmasının sebepleri şunlardır:

- Karışımındaki yetersiz harç miktarı,
- Yatay derzlerin pisliklerden ve kirletici unsulardan arıtılmamış olmaması,
- Derz yüzeyine aşırı yağmur yağması veya göllenme olması,

- Derz yüzeyinin aşırı kuruması,
- Derz yüzeyinin donmaya maruz kalması,
- Ayırışması,
- Yetersiz sıkıştırma yapılması (ACI Committee, 1999).

Kohezyon farklı derzlerde çok farklı değerler gösterebilir, içsel sürtünme açısı ise pek fazla farklılık göstermez. Kohezyon; harç ve bağlayıcı madde miktarı ve yatay derz iyileştirme yöntemlerine göre değişiklik gösterir. Kohezyon değeri, derz yüzeylerinin etkili bir iyileştirme yöntemi kullanılarak temizlenmesi, SSB'deki bağlayıcı madde miktarını veya dayanımını artırılması, SSB katmanını; bir alttaki katman tazeyken serip sıkıştırılması ve derz aralarına çimento harcı veya beton dökülmesi gibi yöntemlerle artırılabilir.

Derz yüzeylerindeki kesme dayanımı ölçülmesi çok zordur. Derz yüzey hazırlanmasının, derz olgunluğunun ve nem durumunun kesme dayanımı üzerinde büyük bir etkisi vardır. Bu yüzden derz yüzeylerinin kesme dayanımı SSB serim hızı ve hava koşullarından etkilenmektedir (ACI Committee, 1988).

İçsel sürtünme açısı genel olarak kohezyonun etkilendiği sebeplerden etkilenmeyip agrega tipi ve şeklinden etkilenir. Mclean and Pierce (1988); ön tasarım için kohezyonun basınç dayanımının %10'u kadar alınabileceği, içsel sürtünme açısının 45° almanın doğru bir yaklaşım olacağını savunmuştur. İyileştirilmemiş yatay derzlerde kohezyonun basınç mukavemetine oranı 0.03 ile 0.06 arasında değişir. İyileştirilmiş derzler için bu değer 0.09 ile 0.15 arasında değişmektedir. İçsel sürtünme açısı her iki durum için de değişiklik göstermez. Yastık betonu olan yatay derz yüzeylerinde öntasarım için kohezyon basınç dayanımının %5'i kadar alınabilir. Yastık betonu yoksa bu değer 0 alınır (USACE, 2000).

4.2.4. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı; çekme dayanımının bir ölçütüdür. SSB barajlarda kritik nokta olan büzülme derzlerindeki çekme dayanımı hesaba katılmaz. Bu yüzden genelde SSB baraj analizlerinde eğilme mukavemeti kullanılmaz (Ağırlioğlu, 2005).

4.2.5. Çekme-Şekil Değiştirme Kapasitesi

Beton çekme şekil değiştirme kapasitesi çatlamadan önce gösterebileceği deformasyondur. Betonun ilk saatlerde çekme-şekil değiştirme kapasitesi düşüktür. Beton, dayanım kazandıkça çekme-şekil değiştirme kapasitesi de artar. Betondaki şekil değiştirme çekme-şekil değiştirme kapasitesini aşarsa beton çatlar. Çekme şekil değiştirme dış yükler etkisi altında olabilmektedir. Bu etkileri yaratan kuvvetler; kuruma, sıcaklık azalması ve otojen büzülmedir (USACE, 2000).

SSB'nin çekme-şekil değiştirme kapasitesi; yükleme hızı, numune yaşı, agregası tipi ve şekli, çimento miktarı ve basınç dayanımı gibi faktörlerden etkilenmektedir (USACE, 2000).

Arjilit ve kuartz gibi sert kırılabilir agregalarla yapılan SSB'lerin çekme-şekil değiştirme kapasitesi düşük olmaktadır. Doğal taşlara nazaran kırma taşla yapılan SSB'nin şekil değiştirme kapasitesi daha fazla olmaktadır (Andriolo, 1998)

4.2.6. Hacim Değişimi

4.2.6.1. Kuruma Büzülmesi

Kuruma büzülmesi; sertleşmiş betonun içerisindeki suyun bir miktarının buharlaşarak kaybolması sonucunda meydana gelen büzülmedir. SSB'nin su içeriği normal betonlara göre daha az olduğundan dolayı kuruma büzülmesi miktarı daha az veya aynı olmaktadır (ACI Commitee,1999).

4.2.6.2. Otojen Büzülme

Otojen büzülme; hidratasyon reaksiyonları sırasında betonun içsel su tüketimi ile oluşur. Hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşan ürünlerin hacmi orijinal hidrate olmamış ürünlerin hacminden daha fazladır. Bunun sonucu çekme gerilmeleri ve büzülme oluşur. SSB'de gerçekleşecek otojen büzülme miktarı normal betonda olduğu gibi laboratuvar deneyleri ile tahmin edilebilir (ACI Commitee,1999).

4.2.7. Elastisite Modülü

Malzemenin elastiklik özelliğini yansıtan elastisite modülü, elastik bölgede malzemeye uygulanan gerilmenin birim deformasyona oranıdır. Young modülü olarak da bilinen elastisite modülü, malzemeye belirli miktar yük uygulandığında o malzemenin deformasyona karşı ne kadar direnebileceğinin bir ölçüsüdür (Ağıralıoğlu 2005). SSB'nin elastisite modülü normal betondan (NB) daha düşüktür (Andriolo, 1998). 5 NB'den yapılan baraj ve 13 SSB barajında yapılan deneyler sonucunda SSB'nin elastisite modülü NB'ninkine göre: 7-28 gün arasında %50, 90

gün ve üzerinde ise %65 mertebesindedir. Itapu projesinde alınan 3090 günlük karot örneklerinde ise SSB'nin elastisite modülü normal betona eşit olmaktadır. Zayıf karışımların elastisite modülü 7500 MPa ve altı olmaktadır (Andriolo, 1998).

SSB ve geleneksel betonun elastisite modülünü etkileyen etmenler şunlardır:

- Test yaşı: Elastisite modülü betonun yaşı arttıkça artmaktadır.
- Agrega Tipi: Zengin harç kullanılırsa SSB'nin elastisite modülü agreganın elastisite modülüne eşit olmaktadır.
- Su/çimento oranı: Su/çimento oranı düşük olan karışımların elastisite modülü yüksektir (Andriolo, 1998).
- Basınç dayanımı: Basınç dayanımı yüksek olan karışımların elastisite modülü yüksektir (Ağırlioğlu, 2005).

SSB'nin içinde yüzdece en fazla agrega bulunduğu için agrega tipi elastisite modülünün tahmininde kullanılabilir. Middle Fork barajında ve Upper Stillwater Barajında düşük birim hacim ağırlıktaki agregalar kullanılarak yapılan SSB karışımlarının elastisite modülü de düşük olmuştur (Hansen ve Reinhardt, 1991). SSB barajlarda gerilme altında çatlakları engellemek için elastisite modülünün düşük olması istenmektedir (Andriolo, 1998). Çizelge 4.1'de farklı barajlarda dizayn edilen SSB laboratuvar örneklerinin bazı mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 4.1. Farklı baraj SSB karışımlarının mekanik özellikleri (Andriolo, 1998)

Baraj	Karışım	Yaş	Basınç dayanımı (MPa)	E ($\times 10^4$) (MPa)	Poisson oranı	Sünme katsayısı ($\times 10^6$)
Willow Creek	A	7	4.0	1.20	---	1.97
		28	8.1	1.59	0.14	1.09
		90	11.9	1.91	0.17	0.52
	B	7	6.9	2.20		0.48
		28	12.7	2.67	0.19	0.34
		90	18.3	2.78	0.18	---
	C	7	7.9	2.40	---	0.58
		28	14.2	2.91	0.21	0.39
		90	27.3	3.25	0.21	0.31
Middle Fork		28	8.8	0.98	0.16	---
Galesville	A	14 *	14.4	3.23	0.19	---
	B	14*	13.8	3.29	0.22	---
Monksville		28	5.1	0.90	---	---
Upper Stillwater	A	28	---	---	---	0.66
		105*	27.1	1.96	0.23	---
		365*	35.7	2.07	0.29	0.53
Les Olivettes		28	12.7	---	---	---
		90	14.7	2.85	---	---
Saco de Nova Olinda		7	---	1.04	---	2.15
		28	---	1.79	---	1.28
		360	---	---	---	0.32

* Karot örneklerinden elde edilmiştir.

4.2.8. Geçirimsizlik

SSB'nin geçirimsizlik katsayısı hapsedilmiş hava miktarına ve hidrate olmuş çimento matrisindeki boşluklara bağlıdır. Geçirimsizlik katsayısı, SSB'nin karışım oranına, yerleştirme yöntemine ve sıkıştırma oranına göre değişiklik göstermektedir. Harç kısmı agregalar arasındaki

boşlukları dolduracak miktarda olursa ve maximum oranda sıkıştırılırsa SSB neredeyse geçirimsiz olmaktadır. Genel anlamda beton yaklaşımıyla yapılan SSB’lerde yeterli miktarda harç olursa ve zemin yaklaşımıyla yapılan SSB’lerde ise uygun gradasyon ve yeterli miktarda ince madde oranı sağlanırsa geçirimsiz bir SSB elde edilebilir (Andriolo, 1998).

Bazı yazarlar (Dunstan, 1981) SSB’nin geçirimliliğinin bağlayıcı madde miktarıyla doğrudan ilgili olduğunu söylemektedir. Bu söylem beton yaklaşımı ile tasarlanan SSB’ler için genel anlamda doğrudur. Yüksek orandaki bağlayıcı madde daha fazla geçirimsiz harç elde edilmesini sağlar. Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB’lerde ise geçirimsizlik, bağlayıcı madde miktarını arttırmak, yüksek oranda sıkıştırmak, yeterli miktarda ince madde kullanmak ve uygun gradasyon kullanmak ile sağlanabilir.

SSB’lerin geçirimlilik katsayısı geleneksel betonlarda olduğu gibi 1×10^{-9} ve 1×10^{-11} cm/sn arasında değişim göstermektedir (Andriolo, 1998).

Düşük geçirimlilik katsayılı bir SSB; düşük su-çimento oranı kullanımı, iyi karıştırılması ve konsolide edilmesi, boşlukları dolduracak yeterli miktarda harç ve macunun bulunması ve yeterli sürede kürlenme yapılması gibi yöntemlerle üretilebilir.

SSB yapılarındaki geçirgenlik; ayrışma ve soğuk derz yüzeylerindeki sıkışma-yapışma eksikliğinden kaynaklandığı görülmektedir.

4.2.9. Poisson Oranı

Betondaki Poisson oranı beton kalitesi ve betona uygulanan gerilme miktarına bağlıdır.

Yapılan deneyler sonucunda SSB'nin Poisson oranı normal betonunkiyle aynı olmaktadır (Andriolo, 1998). Poisson oranı 0.17-0.22 aralığında değişmektedir.

4.2.10. Sünme

SSB'nin sünme davranışını başlıca agreganın elastisite modülü ve karışımda kullanılan ince madde miktarı belirler. Agregataneleri, betonun serbestçe sünme deformasyonu gösterebilmesini kısıtlamaktadır. O nedenle beton karışımında yer almakta olan agregahacmi arttıkça, betonun sünmesi daha az olmaktadır. Elastisite modülü yüksek olan agregalarla yapılan betonlarda daha az sünme deformasyonu yer almaktadır (Erdoğan, 2003). SSB'de sünme testinin geleneksel betona göre asıl farkı SSB numunelerinin deformasyonunun yüzeyde ölçülmesidir. Bunun nedeni ise SSB numunelerinin sıkıştırılmasında yaşanan zorluktur.

İlk yaşlarda SSB'nin harç miktarının fazla olmasından dolayı sünmesi geleneksel betona göre daha yüksek olmaktadır. Geleneksel beton ve SSB'de aynı tip agregakullanıldığı takdirde SSB'nin harç miktarının fazla olmasından dolayı sünme katsayısı daha büyük olmaktadır (USACE, 2000).

Genel olarak düşük elastisite modülüne sahip agregalar kullanılarak yapılan betonun sünmesi yüksek olmaktadır. Betonun sahip olduğu dayanımı etkileyen faktörler, sünme deformasyonunu da

etkilemektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda çimento hamuru daha rijit olduğundan sünme azalmakta, ancak termal gerilme çatlağı miktarı artmaktadır. Zemin yaklaşımıyla yapılan ve doğal veya yapay filler kullanılan SSB'ler daha yüksek sünme değerine sahiptir. SSB ağırlık barajlarında, ağırlık, basınç dayanımından önemli olduğundan çimento oranı düşük, yüksek sünme değeri olan betonlar kullanılmaktadır. Temel baskısı, termal ve dış yüklere bağlı olarak oluşan gerilme ve yer değiştirme artışını yavaşça azaltmak için yüksek sünme tercih edilen bir durumdur. Sünme için şöyle bir formül verilmiştir (Andriolo, 1998).

$$\varepsilon = (1/E) + f(J) \ln (t+1) \quad (4.2)$$

Burada

ε = özgül sünme, veya 1 MPa başına düşen toplam yer değiştirme,

E = statik elastisite modülü

$f(J)$ = Sünme miktarı

t = yükleme sonrası geçen gün sayısı.

Bu formüldeki $(1/E)$ kısmi yüklemeden dolayı oluşacak birincil elastik yer değiştirmeyi belirtir, ikinci kısım ise yüklemeden sonraki uzun dönem etkilerini temsil eder.

SSB ağırlık barajlarda basınç gerilmeleri çok büyük değerlere ulaşmadıkça sünme oranları da herhangi bir sorun oluşturmaz. Tam tersine düşük mukavemetli ve düşük elastisite modülü karışımlar daha fazla sünme gösterir (Ağırlioğlu, 2005).

4.2.11. Termal Özellikler

SSB'nin termal özellikleri normal betonunkine oldukça yakındır. Normal betondaki agreganın aynısı kullanılırsa, SSB'de özgül ısı, genleşme katsayısı ve iletkenlik gibi özellikler normal betonunkiyle aynı olmaktadır (Ağıralioğlu, 2005). Termal özellikler SSB'nin özellikle agrega, çimento, mineral katkı tipi ve miktarına göre değişiklik göstermektedir. Karışımların termal özellikleri, çok farklı türden agrega kaynaklarının kullanabilme olasılığı olan büyük boyutlu projeler için önem taşımaktadır. Termal genleşme katsayısı gibi ısısal özellikleri dikkate alınan agregalar sayesinde çok büyük miktarda ekonomi sağlanabilir. SSB'nin termal genleşme katsayısı normal betona göre biraz daha düşüktür. Termal genleşme katsayıları SSB ve normal betonlar için $7 - 14 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. SSB barajları ön çalışmalarında termal genleşme katsayısı $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ olarak alınabilir (USACE, 2000).

4.2.12. Dayanıklılık

Genel olarak SSB dayanıklılığı; dayanım, bağlayıcı malzeme miktarı, agrega kalitesi ve sıkıştırma yüzdesine bağlıdır. Yoğun agrega ve uygun olarak seçilmiş bağlayıcı malzeme miktarına sahip olan SSB aşınma, alkali agrega reaksiyonu ve sülfat etkisine karşı mükemmel bir direnç gösterir. Düşük bağlayıcı miktarı olan SSB karışımlarının geçirgenliği, yüksek bağlayıcı içeren SSB'ye göre yüksektir. Geçirgenliği yüksek olan düşük bağlayıcılı SSB karışımları sıklıkla yapının iç kısmında kullanılmakta ve memba ile mansaba bakan dış kısımlar geleneksel beton kaplama, geçirimsiz membran vb. teknikler kullanarak inşa edilmektedirler (Hansen and Reinhardt, 1991).

4.2.12.1. Erozyon ve Aşınma Direnci

SSB'nin erozyon direnci basınç dayanımı ve kullanılan agreganın aşınma direncine bağlıdır. Laboratuvarda ve sahada yapılan deneylerde SSB erozyona karşı iyi bir direnç göstermiştir. Detroit Barajı'nda Corps of Engineers'ın yaptığı deneylerde yüksek hızlı su jetlerine karşı zemin yaklaşımıyla yapılan SSB panellerinin iyi bir direnç gösterdiği ortaya çıkmıştır (Houghton et. al., 1978). SSB ile yapılan su alma yapısı, düşü havuzları gibi yapılarda hidrolik kuvvetlere karşı iyi bir direnç göstermiştir. Tarbella Barajı (Lowe, 1998), SSB ile koruma yapılan dipsavak ve mansap yapılarında orta hızlı su akışına karşı iyi performans göstermiştir (Hansen and Reinhardt, 1991).

4.2.12.2. Donma-Çözünme Direnci

Genel olarak SSB'nin içinde yeterli miktarda hapsolmuş hava olduğundan dolayı katkı maddesi kullanılmasına gerek yoktur. SSB'nin donma çözünmeye karşı direnci temel olarak dayanımına ve geçirimsizliğine bağlıdır (Hansen and Reinhardt, 1991).

Donma-çözünme etkilerine maruz kalan birçok yere SSB barajları yapılmıştır. Bu barajların önyüzlerinde hava sürüklenmiş geleneksel beton kullanılmıştır (USACE, 2000). SSB'nin donma çözünme direncini gösteren az veri vardır. Sadece Willow Creek ve Galesville barajlarında SSB orta derecede donma çözünme etkilerine karşı karşıya kalmış ve iyi derecede direnç göstermiştir (Hansen and Reinhardt 1992, Liu and Totro1 1995). Elk Creek Barajı'nın yapımı devam ederken kretinde biriken yağmur suları yüzünden yüzeysel olarak donma-çözünmeye maruz kalmıştır (Hopman, 1992). Bu yüzden kretlerin mansaba doğru eğim verilerek yapılması gerekmektedir. Kritik doygunluk seviyesinde

veya daha doygun olması durumunda hava sürüklenmemiş SSB'nin donma-çözünme etkilerine karşı dayanıklılığı düşüktür. Bununla birlikte, SSB kritik doygunluk seviyesinin altında ise, donma-çözünme etkilerine karşı olan dayanıklılığı kritik iklim koşullarının geçerli olduğu bölgelerde bile oldukça iyidir. Şu ana kadar yapılan SSB barajlarında hava sürüklenmiş SSB kullanılmış olup değerlendirme yapabilmek için gerekli zaman dilimi daha oluşmamıştır. Kanada ve Amerika gibi don görülen bölgelerde önemli sayıda SSB yollar yapılmıştır. Bu yollarda hava sürüklenme katkısı kullanılmamıştır. Buna rağmen aradan geçen zaman içinde donma-çözünme etkilerine karşı iyi bir direnç göstermiştir. Bununla birlikte; tam ölçekli uygulamalarda homojen bir şekilde hava sürüklenmiş SSB'nin elde edilmesi çok zor olmaktadır (PCA 2004). En önemli sebebi SSB'nin yol kaplamalarında dayanımının daha yüksek seçilmesidir. Donma çözünme karşısında SSB'de kabarıp dökülme ve düşey soğuk inşaat derzlerinde liflenme görülmektedir (USACE, 2000).

SSB yolların dona karşı dayanıklılığı Kanada'daki Laval Üniversitesi'nde incelenmiştir. Pigeon ve Marchand tarafından 4 yıl boyunca bini aşkın numune istenilen saha koşullarında üretilip dökümü yapılmıştır. Her yıl, dökümü ve kür süresi tamamlanan numunelerden alınan karot örnekleri farklı testler için Laval üniversitesine getirilerek bu karot örnekleri üzerinde 3 yıl boyunca çok sayıda donma-çözünme deneyleri yapılmıştır. Bağlayıcı madde tipi, su/çimento oranı, hava sürükleyici madde kullanımı ve agrega gradasyonu gibi pek çok özellikler incelenmiştir. Pigeon ve Marchand'ın yaklaşık 300 numune üzerinde yaptığı çalışma sonucunda, (ASTM C666 "Standart Test Method For Resistance Of Concrete to Rapid Freezing and Thawing)) ilk 3 yılda donma ve çözünme etkilerine karşı SSB'de önemli bir hasar meydana gelmediği belirlenmiştir. Hava sürüklenmemiş şekilde yapılan SSB numunelerinde ise yine donma çözünme etkilerine karşı önemli bir

hasar meydana gelmemiştir. Pigeon ve Marchand’a göre oluşan hava boşlukları donma çözünmeye karşı direnci arttırmaktadır (PCA, 2004). Taze ve sertleşmiş SSB’lerde uygulanan deneyler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. SSB’lerde yapılan deneyler (Andriolo, 1998)

Test Yöntemi		ASTM	TS
Taze örnek üzerine	Hava içeriği		EN 12350-7
	İşlenebilirlik - çökme	C – 143	EN 12350-2
	Kıvam	C – 1176	EN 12350-3
	Termal genleşme	CRD – C 39	
	Su içeriği	C – 1040	
	Yoğunluk – (Sıkıştırmadan önce)	C – 1176	
	Yoğunluk – (Sıkıştırmadan sonra)	C – 1040	
	Sıkıştırma oranı		
Sertleşmiş örnek üzerinde	Basınç dayanımı	C - 470	EN 12390-3 ve 3323
	Çekme dayanımı	C - 496	EN 12390-6
	Elastisite modülü, Poisson oranı	C - 469	3502
	Yoğunluk - karot	C - 642	EN 12390-7 ve 3624
	Basınç dayanımı - karot	C - 470	EN 12390-3 ve 3323
	Çekme dayanımı - karot	C - 496	EN 12390-6
	Elastisite modülü, Poisson oranı - karot	C - 469	3502
	Geçirgenlik - karot		3455
	Kesme dayanımı - karot ve yerinde	CRD – C89, RTH 20380	

5. SSB KARIŞIM ORANLARI HESAP YÖNTEMLERİ

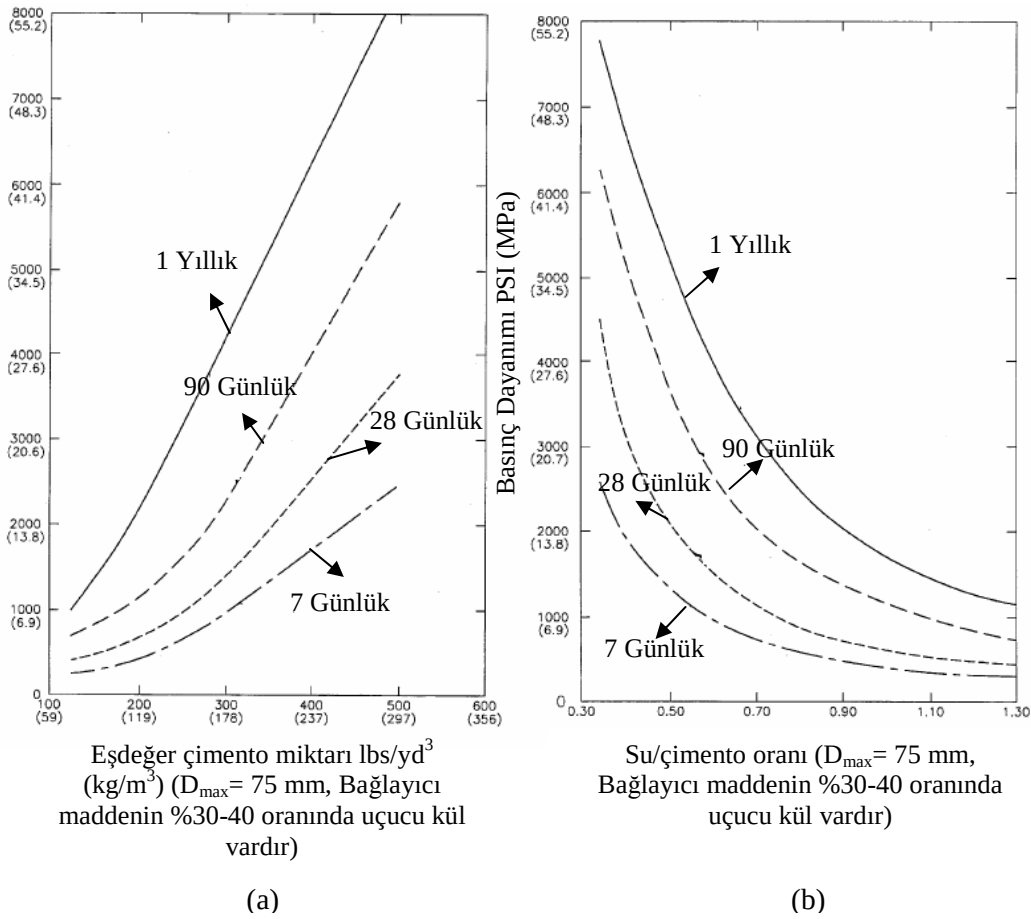
SSB; bağlayıcı madde (portland çimentosu, mineral katkı), su, agrega ve gerektiğinde kimyasal katkı malzemelerinden oluşur. SSB karışım oranlarının uygun olarak seçimi, ekonomik ve dayanıklı SSB üretiminin en önemli adımlarından biridir. Normal betonlarda olduğu gibi, SSB karışım oranları da büyük ölçüde yapının dayanım ve dayanıklılık gereksinimlerine bağlıdır.

SSB karışımları ayrışmamış, işlenebilir ve vibrasyonlu silindirler kullanılarak sıkıştırılabilir nitelikte olmalıdır. Taşıma, serme ve sıkıştırma ekipmanlarını taşıyacak şekilde uygun kıvamda olmalıdır. SSB içinde ayrışmayı önlemek ve iri agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmak için yeterli oranda harç bulunmalıdır. Bağlayıcı hamuru, iri ve ince agregaları birbirine bağlar. Hamur plastik durumda iken birbirine yapışma (kohezyon) ve işlenebilme özelliklerini sağlar. Sertleştiğinde ise miktarı ve kalitesi betonun dayanımını, bağlayıcılık kapasitesini, geçirgenliğini ve dayanıklılığını belirler.

SSB karışım oranlarının tespiti için farklı birkaç hesap yöntemi başarı ile kullanılmıştır. Farklı yöntem kullanmanın sebepleri arasında; proje yeri, proje dizayn gereksinimleri, malzeme erişilebilirliği, karıştırma, taşıma, serme, sıkıştırma ekipmanlarının özellikleri ve yapılma süresinin kısalığı gibi özellikler gösterilebilir. SSB karışım oranlarının hesap yöntemleri beton veya zemin yaklaşımı esas alınarak yapılmaktadır. Bu yöntemler şunlardır(ACI Committee, 1999):

- Corps of Engineers Yöntemi: Bu yöntem; su/bağlayıcı madde oranı ve dayanım ilişkisini esas almaktadır. Karışım oranlarının tespitinde ACI 211.3 standardının uyguladığı yöntemin aynısıdır. Bu iki yöntem karışım oranlarını katı hacim tahmini ile yapmaktadır. Su/çimento oranı ve eşdeğer çimento miktarları dayanım kriterleri kullanılarak Şekil 5.1'teki

grafiklerden alınabilir. Su ihtiyacı yaklaşık olarak en büyük tane boyutu ve istenen Vebe süresine göre belirlenir. Tavsiye edilen ince agrega miktarı; toplam agrega hacmine oranı olarak en büyük agrega tane boyutu ve iri agrega cinsine bağlıdır. SSB karışımına giren her bir malzemenin oranı tespit edildikten sonra, harç miktarının tavsiye edilen oranlarla karşılaştırılıp kontrol edilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.1. Dayanım grafikleri (a) eşdeğer çimento miktarı basmaç dayanımı ilişkisi,
(b) Su/çimento oranı basmaç dayanımı ilişkisi (ACI, 1988)

• **Yüksek Harç Yöntemi:** Bu yöntem Bureau of Reclamation'ın Amerika'da yapılan Upper Stillwater Barajı'nda uygulanan yöntemin geliştirilmiş halidir. Test programı kullanılarak elde edilen karışımlar genellikle yüksek oranda bağlayıcı madde içerir, temiz ve normal gradasyonlu agregalar kullanılır ve işlenebilirliği fazladır. Upperstill Water Barajı'nda yapılan karışımların amacı tabakalar arası bağlanma dayanımını arttırmak ve yatay derzlerde yeterli miktarda harç bulundurarak geçirimsizliği azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. İstenilen dayanımı sağlamak için su/bağlayıcı madde oranı ve kullanılacak mineral katkı miktarı tahmin edilir. Optimum su miktarı, ince ve iri agrega oranları, Vebe zamanı 10 ile 30 sn arasında tutularak hazırlık karışım deneyleri yapılır. Daha sonra hazırlık çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre karışım oranları tespit edilir. Laboratuvarında yapılan hazırlık deneylerinde işlenebilirlik, dayanım ve diğer özellikler bakımından kabul edilebilir sonuçlar vermektedir (ACI Committee, 1988).

• **Silindirle Sıkıştırılmış Baraj Yöntemi:** Silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi 1970'lerde Japonya'da geliştirilmiştir. Temelinde beton yaklaşımı prensipleri esas alınmaktadır. Karışım oranlarını tespitinde kıvam ölçü aletinin kullanımı hariç ACI 211.1 kullanılır. Kıvam ölçü aleti, Vebe aleti ile benzer özelliktedir. SSB karışımı bir kabın içine konulur ve harç yüzeydeki plakaya ulaşınca kadar vibre edilir. Alet; gerektiğinde en büyük tane boyutu 150 mm olan agrega içeren karışımlar için tasarlanmıştır.

Bir silindirle sıkıştırılmış baraj karışımında çimento oranı genellikle 125 kg/m^3 olmakta ve %20-30 arasında uçucu kül kullanılmaktadır. Agregalar ise %30 kum içermektedir (Ağırlioğlu, 2005). En büyük tane boyutu genellikle 80 mm olmaktadır (Andriolo 1998).

Bu teknikte tabaka serilme yüksekliği 0.50 ile 1.00 m arasında değişmektedir. Bir döküm tabakasından sonra gelen tabakanın yerleştirme süresi 4 gün ile sınırlandırılmıştır. Döküm periyotları hava sıcaklığına bağlı olarak değişebilir. Yatay döküm derzi arasında soğuk derzin oluşmasını engellemek amacıyla yastık betonu uygulaması yapılır (Ağıralioğlu, 2005).

Dünyada ilk yapılan silindirle sıkıştırılmış baraj 1981 yılında yapımı tamamlanan 89 m yüksekliğinde, 320 000 m³ hacmindeki Shimajigava Barajı'dır. İkinci barajı ise 1987 yılında yapımı tamamlanan 100 m yüksekliğinde ve 1 150 000 m³ hacmindeki Tamagava Barajı'dır. 1998 yılı sonu itibari ile silindirle sıkıştırılmış baraj tekniği kullanılarak inşa edilmiş barajların sayısı 36'yı bulmuştur.

- Maksimum yoğunluk yöntemi: Bu yöntem zemin yaklaşımını esas almaktadır. Karışım oranlarının tespitinde ACI 211.3 standardı uygulanmaktadır. Bu yöntemde karışım için gerekli su miktarı ASTM D1557 "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))" metodu kullanılarak sıkıştırılmış numunelerin nem-yoğunluk ilişkisi açısından hesaplanır. Bu yöntem karışım bileşenlerine ve en büyük tane boyutuna göre değişiklikler gösterebilir. Sıkıştırma aleti standart proktor tokmağı veya en büyük tane boyutu büyük olan karışımlara göre uyarlanmış olan tokmaklar kullanılır. Standart proktor tokmağına alternatif olarak titreşimli tokmaklarda kullanılabilir.

Bu yöntemde değişik bağlayıcı madde miktarına sahip deneme karışımları hazırlanır. Her deneme karışımları için farklı su muhtevalarında karışımlar hazırlanır. Yapılan deneyler sonucunda maximum kuru birim hacim ağırlığını veren su muhtevası sečilir. Su

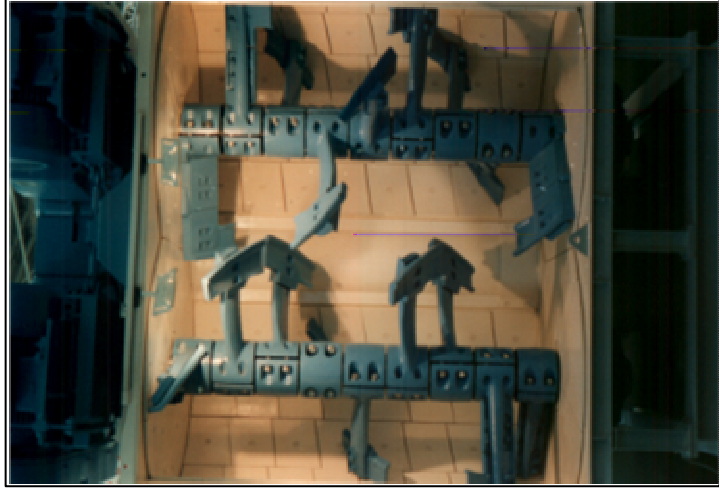
muhtevası genellikle %1 oranında fazla alınmaktadır. Bunun nedeni taşıma, serme, sıkıştırma esnasındaki su kaybıdır.

6. SSB KARIŞTIRMA, TAŞIMA, SERME VE SIKIŞTIRMA İŞLEMLERİ

SSB'nin karıştırılması, taőtınması, serilmesi ve sıkıştırma işlemleri mümkün olduğunca en kısa zamanda ve ayrıőtırmaya uğratılmadan gerçekleştirilmesi gerekmektedir. SSB'nin karıőtırılmaya başladığı andan, son geçiőin atılmasına kadar geçen süre; SSB'nin priz süresini geçmemelidir. Genel bir kural olarak içinde hiç veya az miktarda mineral katkı kullanılan SSB'lerin taőtıma, serme ve sıkıştırma süresinin 45 dakikayı geçmemesi gerekmektedir. Bu süre katkı maddesi kullanılmayan ve hava sıcaklığının 21°C olduğu hava koşullarında geçerlidir. Sıcak havalarda bu zamanın kısaltılması, soğuk havalarda ise uzatılması gerekmektedir. Nemin az, rüzgarın ve el değıőtirmenin fazla olduğu koşullar SSB'nin işlenebilirliğini azaltmaktadır. Bu yüzden bu hava koşullarında SSB sıkıştırılma işlemleri 45 dakikadan önce tamamlanması gerekmektedir (ACI Committee,1988) .

6.1. SSB Üretimi

SSB karıőtımları, hem kesintili hem de sürekli karıştırma tesislerinde üretilebilmektedir. Bilgisayar kontrollu, kesintisiz çalışan bir karıőtımdan diğetine hiçbir değıışikliğe mahal vermeyen modern karıőtım tesisleri en uygundur. Mikserler karıştırma kolları ve paletleri ile haznede harç kalmayacak aynı zamanda sıfır çökmeli betonu herhangi bir bozulma olmadan karıőtıracak şekildedir (ACI Committee, 1988). İkiz şaftlı kesintili mixerler SSB yapımında kullanılan en yaygın tiptir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. İkiz şaftlı mixer

6.2. SSB Taşınması

SSB'nin beton santralinde hazırlandıktan sonra en fazla 15 dakika içerisinde döküm sahasına getirilmesi gerekmektedir. Taşınma sırasında SSB'nin ayrılmaya uğratılmaması, işlenebilirliğinin kaybetmemesi ve mümkün olan en kısa zamanda getirilmesi için uygun bir taşıma yöntemi seçilmelidir. SSB; iletici bant, kamyon ve karma yöntemler kullanılarak taşınabilir.

6.2.1. Kamyonlarla SSB Taşınması:

SSB'yi beton santralinden döküm yerine kamyonlarla taşımak için dikkat edilecek en önemli konu taşıma yollarıdır. SSB'nin taşınabileceği mesafe; yol şartlarına, havanın durumuna, trafiğe ve inşaat sahasının topoğrafyasına bağlıdır. Taşıma yollarının SSB dökümü yapılmadan önce tamamlanması gerekmektedir. Yolların eğimi ve genişliği SSB yapım

hızı ve kamyonların taşıyacağı yüke göre ayarlanması gerekmektedir. Kaya kamyonları SSB yüzeyinde giderken yüzeye zarar vermemesi için geniş açılı manevra yapması ve şekil 6.2’de görüldüğü gibi tekerleklerin baraj gövdesine girişte her türlü kir ve çamurdan temizlenmesi gerekir (Andriolo, 1998).



Şekil 6.2. Kamyon tekerleklerinin yıkanması

Kaya kamyonlarıyla taşınan SSB’de özellikle en büyük tane boyutunun 50 mm’den yüksek olduğu durumlarda ayrışma ihtimali yüksektir. Ayrışma potansiyelini azaltmak için SSB’yi sıkışmamış SSB yüzeyine döker ve dozer SSB’yi tekrar karıştırarak serer (Şekil 6.3). Ayrıca ayrılmış agregaların alınarak SSB yüzeyine tekrar karıştırılması gerekmektedir. SSB yığın yüksekliği de genel olarak 1.5 m olmalıdır (Andriolo, 1998).

Baraj gövde üzerinde giden kamyon tekerleklerinin yüzeye fazla zarar vermemesi için aynı güzergahı kullanması ve kullanılan güzergahın da SSB dökülmeden önce ekstra olarak temizlenmesi gerekmektedir (ACI Committee, 1988).



Şekil 6.3. Kamyonlarla SSB taşınması

6.2.2. İletici Bantlarla SSB Taşınması:

İletici bantlar, SSB taşınmasında kullanılan en ideal yöntemdir. İletici bantlarla taşıma sistemi seçilirken toplam maliyet (dolaylı ve dolaysız giderler), güvenilirlik, kalite ve iş programı gibi özellikler dikkate alınmalıdır. Kamyonla taşımaya göre daha pahalı bir sistemdir (ACI Committee, 1988).

SSB karışımının aşırı kuru veya yüksek kıvamlı olması, ince tane miktarının fazlalığı, düşük çimento oranı, tane boyutu büyük agregalar iletilici bantlarla taşınması sırasında problem oluşturabilir. SSB aşırı kuru ve/veya tane boyutu büyük agregalar kullanıldığı zaman bant üzerinde ayrılmaya uğrayabilir, bantı yüksek miktarda aşındırabilir ve bantın yanından agrega parçaları düşebilir. SSB'nin yüksek kıvamda olması durumunda ise harç banta yapışabilir ve homojen olmayan bir SSB ortaya çıkar. İletici bantların hızı 3-9 m/sn arasında olmalıdır. SSB'yi yağmur ve güneşten korumak için bantın üzerinde gerekli önlemlerin alınması gerekir. SSB yapım hızının fazla olmasından dolayı iletilici bantlar da baraj gövdesinde aynı hızda yükseltilebilir olması gerekmektedir.



Şekil 6.4. İletici bantlarla SSB taşınması

Baraj gövdesine iletim bantlarıyla getirilen SSB, şekil 6.5'te görüldüğü gibi kamyonlarla veya bir ekskavatör kullanılarak dağıtılabilir.



Şekil 6.5. İletici bantlarla getirilen SSB'nin dağıtılması

6.3. SSB Serme ve Yerleştirme İşlemleri

SSB baraj gövdesine bir yamaçtan diğer yamaca doğru serilmesi tavsiye edilmektedir. SSB'yi sermek için en iyi araç dozerdir. Dozerler hızlı, hassas ve homojen bir şekilde SSB'yi serer. Dozer; SSB yığını tekrar karıştırıp ayrışma olmadan istenilen yükseklikte serebilir. Genel olarak dozer tipi Caterpillar D4'ten küçük ve D7'den büyük seçilmez ve SSB serilme işleminde sıklıkla kullanılan tip Caterpillar D5'tir. Dozerlerin paletli olması ve U bıçağa sahip olması gerekmektedir. SSB'nin serilme yüksekliği dozerlere bağlanan olan lazer sistemiyle kontrol edilmekle birlikte (Şekil 6.6), sahada hazır bulunan etüt ekibi ile de kontrol edilebilir. Dozerlerin baraj yüzeyinden uzaklaştırılması veya bir yamaçtan diğer yamaca taşınması gerektiğinde sıkışmış SSB yüzeyine zarar vermemek amacıyla bu işlem lastik tekerlekli treyler kullanılarak gerçekleştirilir (Şekil 6.7). Dozerler manevra hareketlerini sıkışmamış SSB üzerinde yaparlar.



Şekil 6.6. Tabaka yüksekliğinin lazer ile kontrol edilmesi



Şekil 6.7. Lastik tekerlekli treyler kullanılarak dozerin taşınması

En yaygın olarak kullanılan SSB serme yüksekliği 30 cm'dir (Şekil 6.8). Japonya'da yapılan silindir ile sıkıştırılmış barajlarda ise bu yükseklik 50 cm ile 100 cm arasında değişmektedir. SSB serilme yüksekliğinin seçimi karışım oranına, serme ve sıkıştırma ekipmanlarının özelliklerinden etkilenir (Andriolo. 1998).



Şekil 6.8. SSB serilmesi

6.4. SSB Sıkıştırma İşlemi

Sıkıştırma ekipmanı seçilirken; manevra kabiliyeti, birim tambur genişliğindeki sıkıştırma gücü, tambur genişliği, vibrasyon, amplitut, frekans ve operasyon hızı dikkate alınmalıdır.

Yapılan çalışmalarda, yüksek frekanslı ve düşük amplitute sahip silindirlerin düşük frekanslı ve yüksek amplitutlu silindirlere göre SSB'yi daha iyi sıkıştırabildikleri görülmüştür. SSB'de genellikle dinamik kuvveti 8 kg/mm olan tek veya çift tamburlu ve ağırlığı 10 ton olan silindirler kullanılmaktadır. Ağırlığı 15 veya 20 ton olan silindirler de kullanılmıştır (Şekil 6.9). Fakat bu tip silindirler genellikle düşük frekansa ve yüksek amplitüte sahiptir (ACI Committee, 1988).



Şekil 6.9. 15 tonluk vibrasyonlu silindirler

Ön döküm beton elemanlar, normal betonlar veya kalıp yanlarında el kompaktörleri (Şekil 6.10) veya 3 tonluk küçük silindirler (Şekil 6.11) kullanılarak sıkıştırılır. Bunlar küçük olmasına karşın yüksek sıkıştırma gücüne sahiptir.

SSB'nin istenilen sıklık derecesine getirmek için gerekli olan minimum geçiş sayısı; karışımın işlenebilirliğine ve tabaka yüksekliğine bağlıdır.



Şekil 6.10. El kompaktörleri



Şekil 6.11. 3 tonluk küçük silindirler

SSB'nin minimum geçiş sayısı test dolgusunda belirlenir. Düzgün bir yüzey elde edilmesi için genellikle ilk geçiş statik modda (titreşim olmadan) atılır. Daha kuru karışımlara dinamik modda başlanabilir. Silindirin amplitut ve frekans değerleri karışımın kıvamına bağlıdır. Genel olarak frekans 1800-3200 tit/dak, amplitut ise 0.4-0.8 mm arasında değişmektedir (ACI Committee, 1988).

Gerekli geçiş sayısından fazla geçiş uygulanan SSB'nin üst yüzeyinde yoğunluğunu azaltacağından dolayı sakıncalıdır.

7. LİTERATÜR TARAMASI

Silindirle sıkıştırılmış beton hakkında geçmişte yapılmış bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Cheng Cao ve arkadaşları (1999), yaptıkları çalışmada silindirle sıkıştırılmış betonda yüksek miktarda kullanılan uçucu külün dayanıma etkilerini incelemiştir. Ayrıca özgül dayanım kavramı kullanılarak yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB'lerin dayanımına etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyde kullanılan karışımların özellikleri Çizelge 7.1' de verilmiştir:

Çizelge 7.1. SSB karışım oranları

Karışım	Uçucu kül (kg/m ³) (%)	Çimento (kg/m ³) (%)	Su (kg/m ³)	Dere kumu (kg/m ³)	Dolomit (kg/m ³)	Su azaltıcı katkı (kg/m ³)	Su /Çimento oranı
F0	0 (0)	300 (100)	106	855	1320	2.10	0.35
F45	135 (45)	210 (70)*	113	773	1320	2.42	0.37
F55	165 (55)	190 (63)	117	768	1320	2.49	0.39
F65	195 (65)	170 (57)	121	747	1320	2.56	0.40
F75	225 (75)	150 (50)	125	725	1320	2.63	0.42
F85	255 (85)	130 (43)	129	700	1320	2.70	0.43
F95	285 (95)	110 (37)	133	678	1320	2.77	0.44

*Parantez içindeki değerler çimento içeriğinin kontrol karışımının %'si olarak verilmiştir.

Cheng Cao ve arkadaşları (1999) karışımları 120 sn boyunca maximum 50 g/cm² güç kullanılarak sıkıştırmıştır. Su ve kum miktarı

Marshall sıkıştırma metoduna göre tahmin edilmiştir. Minimum sıkıştırma oranı %96'dır. Dökümden 24 saat sonra silindir numune kalıpları çıkartılarak oda sıcaklığı 20 ± 3 °C ve nem oranı minimum %90 olan kür odasında yeterli süre bekletilmiştir. Dört noktalı testine göre eğilme dayanımı hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları Çizelge 7.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. SSB deney sonuçları

Karışım	Basınç dayanımı (MPa) / Eğilme dayanımı (MPa)				28 Gün dayanım oranı	90 Gün dayanım oranı
	3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün		
F0	30.9/4.5	35.2/5.6	46.5/6.3	49.1/6.7	7.99	7.33
F45	25.8/3.8	38.9/4.9	55.4/7.5	66.5/9.4	7.36	7.06
F55	25.4/3.3	35.0/4.2	51.7/7.0	57.4/9.4	7.41	6.12
F65	16.0/2.0	26.2/3.6	44.3/6.4	56.0/9.3	6.88	6.00
F75	10.4/1.8	26.0/3.3	40.1/6.4	46.4/8.8	6.29	5.27
F85	7.0/0.9	18.7/2.5	39.1/5.9	46.0/7.9	6.62	5.82
F95	1.7/0.2	11.5/1.8	32.5/5.4	44.8/7.5	6.07	5.79

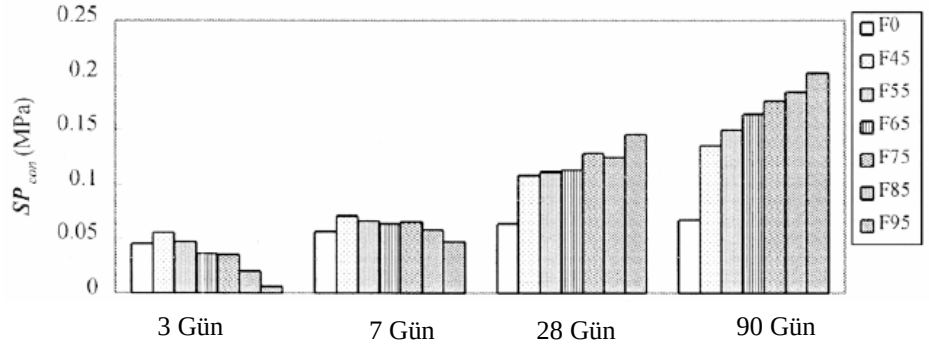
Çimentonun özgül dayanım grafiği Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Beton içindeki çimentonun özgül dayanımının (SP_{con}) hesaplanma yöntemi şöyledir:

$$SP_{con} = F / P_{cem} \quad (7.1)$$

Burada,

F = Betonun dayanımı

P_{cem} = Çimentonun toplam bağlayıcıya oranı



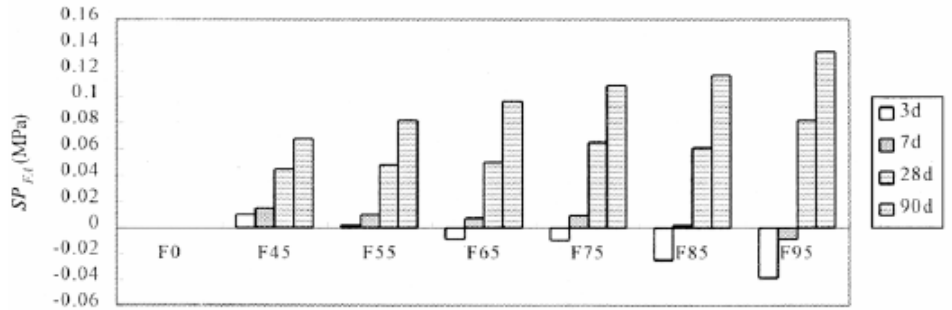
Şekil 7.1. Yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB'nin eğilme özgül dayanım grafiği

Uçucu külün özgül dayanım grafiği şekil 7.2'de gösterilmiştir. Beton içindeki uçucu külün özgül dayanımının (SP_{FA}) hesaplanma yöntemi şöyledir:

$$SP_{FA} = SP_{Fcon} - SP_{con} \quad (7.2)$$

Burada,

SP_{Fcon} = Uçucu kül ile birlikte beton içindeki çimentonun özgül dayanımı



Şekil 7.2. Uçucu kül özgül dayanım grafiği

Puzolanik aktivite oranının dayanıma katkısı da bu çalışma kapsamında incelenmiş ve Çizelge 7.3'te gösterilmiştir. Puzolanik aktivite oranının (R_{FA}) dayanıma katkısının hesaplanma yöntemi şöyledir:

$$R_{FA} = SP_{FA} / SP_{Fcon} \quad (7.3)$$

Çizelge 7.3. Uçucu külün basınç/eğilme dayanımına katkısı (R_{FA} , %)

Karışım	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
F0	0	0	0	0
F45	16.2/18.2	37.5/21.1	40.5/41.7	48.4/50.4
F55	22.5/4.3	37.5/15.2	42.7/43.2	46.2/55.0
F65	-10.7/-25.0	23.9/11.1	39.7/44.2	50.0/59.1
F75	-47.6/-28.6	32.7/13.8	41.2/50.8	47.3/61.9
F85	-93.7/125.0	16.3/3.4	48.4/49.2	54.2/63.6
F95	-520.0/-650.0	-12.9/-19.7	46.6/56.6	58.1/66.8

Sonuçta, uçucu kül miktarı arttıkça yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB'lerin dayanımının düştüğü belirtilmiştir. Yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB'lerin ilk yaşlarda dayanımı çok düşük olmasına rağmen ilerleyen yaşlarda dayanımlarda hızlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu karışımlarda geç yaşlarda uçucu kül içermeyen SSB'lere göre daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Uçucu kül miktarının artmasıyla SSB'nin özgül dayanımı erken yaşlarda düşmüştür. Daha geç yaşlarda uçucu kül artışı SSB'nin özgül dayanımında artış meydana getirmiştir. 7 günlük kür süresi sonunda uçucu külün dayanıma olumlu yönde katkısı olduğu saptanmıştır. Uçucu kül kullanımı, zararlı boşlukların ve toplam boşluk oranının azalmasına neden olduğu vurgulanmıştır.

Atiş ve arkadaşları (2003) yaptığı çalışmada standart olmayan yüksek miktarda kalsiyum içeren uçucu külün silindirle sıkıştırılmış betonun dayanım özelliklerine etkisini araştırmıştır. Yapılan alışma kapsamında 200, 300 ve 400 kg/m³ olmak üzere 3 farklı miktarda imento kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 16 mm olan dere agregası kullanılmıştır. Uçucu kül her bir karışımda %0, %15, %30 ve %45 oranlarında normal portland çimentosunun yerine kullanılmıştır. Sarsmalı slump testi ile su miktarı bulunmuştur. Karışım oranları izelge 7.4'te gösterilmiştir. Numuneler üzerinde basıncı ve eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Beton basıncı dayanımı 100 mm kp numunelerden elde edilmiş olup, eğilme-çekme dayanımları 100/100/500 mm ayrıtlı prizmatik numunelerden, yarmada çekme dayanımları ise 150/300 mm silindir numunelerden elde edilmiş ve örneklere 1, 3, 28, ve 90 gün boyunca 20°C sıcaklıkta kr uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar izelge 7.5, 7.6 ve 7.7'de gösterilmiştir.

Sonuçta, uçucu kül kullanılarak yapılan karışımlarda ilk 3 günde meydana gelen dayanım artışı yüksektir. %15 oranında uçucu kül içeren karışımların 28 günlük dayanımlarının kontrol karışımına yakın veya daha fazla olduğu bildirilmiştir. Çimento yerine %30 oranında uçucu kül içeren SSB karışımlarının 90 günlük dayanım değerlerinin kontrol karışımları ile hemen hemen aynı olduğu saptanmıştır.

Çizelge 7.4. SSB karışım oranları

Karışım	Çimento (kg/m ³)	Uçucu kül (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Agrega (kg/m ³)	Su/(Ç+UK)
K1-00	200	0	164	2100	0.82
K1-15	170	30	166	2100	0.83
K1-30	140	60	168	2100	0.84
K1-45	110	90	170	2100	0.85
K2-00	300	0	159	1950	0.53
K2-15	255	45	162	1950	0.54
K2-30	210	90	165	1950	0.55
K2-45	160	135	168	1950	0.56
K3-00	400	0	160	1800	0.40
K3-15	340	60	164	1800	0.41
K3-30	280	120	168	1800	0.42
K3-45	220	180	172	1800	0.43

Çizelge 7.5. SSB basınç dayanımları (MPa)

Karışım	1 Günlük	3 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
K1-00	3.92	9.99	22.57	23.64
K1-15	2.55	10.17	25.89	28.91
K1-30	2.63	5.07	18.20	23.28
K1-45	1.88	3.73	11.88	19.58
K2-00	9.51	24.20	46.93	53.50
K2-15	6.91	20.49	49.18	51.34
K2-30	5.10	13.62	39.83	40.35
K2-45	4.35	8.64	18.48	34.58
K3-00	14.81	34.47	60.85	64.33
K3-15	12.06	28.41	62.96	70.81
K3-30	8.34	21.40	44.80	60.83
K3-45	7.83	13.57	27.01	30.10

Çizelge 7.6. SSB eğilmede çekme dayanımı (MPa)

Karışım	1 Günlük	3 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
K1-00	1.02	1.77	3.31	3.69
K1-15	0.72	1.91	3.20	3.67
K1-30	0.66	1.15	3.02	3.35
K1-45	0.59	0.79	2.14	2.43
K2-00	1.58	2.76	4.72	5.59
K2-15	1.17	3.03	4.46	5.56
K2-30	1.24	2.20	4.42	5.12
K2-45	1.13	1.67	2.76	3.45
K3-00	2.55	4.81	5.59	7.01
K3-15	1.73	3.32	6.29	6.70
K3-30	1.68	2.55	4.80	5.86
K3-45	1.63	2.45	3.73	3.86

Çizelge 7.7. SSB yarmada çekme dayanımı (MPa)

Karışım	1 Günlük	3 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
K1-00	0.58	1.26	2.04	2.32
K1-15	0.40	1.22	2.49	2.58
K1-30	0.49	0.74	1.92	2.01
K1-45	0.30	0.62	1.18	1.92
K2-00	0.98	2.03	3.50	3.96
K2-15	0.87	1.85	3.22	3.38
K2-30	0.74	1.38	2.77	2.88
K2-45	0.62	1.04	1.82	2.54
K3-00	1.39	3.05	3.80	4.62
K3-15	1.36	2.53	4.13	4.39
K3-30	1.07	1.78	3.26	4.33
K3-45	1.01	1.56	2.05	2.51

Gao ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve genleştirici katkı içeren SSB'nin dona dayanıklılığını ve hava boşluk karakteristiklerini incelemiştir. Çalışmada, incelik modülü 2.5 olan, iyi gradasyonlu ve yuvarlak ince agrega kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 200 mm olan 2 tip (2.5/10 mm ile 10/20 mm) kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Yapılan karışım oranları Çizelge 7.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.8. SSB karışım oranları

Karışım	Çimento (kg/m ³)	Uçucu kül (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Genleşme katkısı (kg/m ³)	Agrega (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)
0-0	100	100	96	0	2258	1.4
ExI-4	100	100	96	8	2258	1.4
ExI-8	100	100	96	16	2258	1.4
ExI-12	100	100	96	24	2258	1.4
ExII-4	100	100	96	8	2258	1.4
ExII-8	100	100	96	16	2258	1.4
ExII-12	100	100	96	24	2258	1.4
ExIII-4	100	100	96	8	2258	1.4
ExIII-8	100	100	96	16	2258	1.4
ExIII-12	100	100	96	24	2258	1.4

Deney karışımları 100 mm ayrıtlı küp kalıplara 50 Hz frekansta ve 20 kg sürşarj yükte sarsılarak yerleştirilmiştir. Karışım numuneleri 20°C sıcaklıkta ve %90 bağıl nemde 48 saat bekletildikten sonra kalıplardan sökülerek, 20±2°C sıcaklıktaki suda 28 gün boyunca kür edilmiştir. 28. günün sonunda numuneler ASTM C666 “Standart Test Method For Resistance Of Concrete To Rapid Freezing and Thawing” ‘ya ve Çin Ulusal Standardı SD 105-82’ye uygun olarak 300 tekrarlı donma çözünme testine tabi tutulmuş, dayanımlar ile kütle kayıpları ölçülmüş, optik mikroskopla mikroyapı ve hava boşluk mesafe faktörü

incelenmiştir. Sonuçta; genleştirici katkı içeriği %0'dan %4 ve %8'e yükseldiğinde dayanım ve kütle kaybının azaldığı, genleştirici katkı içeriği 8%'den 12%'ye yükseldiğinde ise dayanım ve kütle kaybının arttığı bildirilmiştir. Normal betonlarda olduğu gibi SSB'de de dayanım kaybı oranı ile kütle kaybı oranı arasında lineer bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Boşluklar arasındaki mesafe faktörünün 0.4 mm'den az olduğu durumlarda uçucu kül ve su azaltıcı katkı içeren SSB'lerin dona karşı dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. SSB'de düzensiz şekilli kompaksiyon boşluklarının birbirine yakın ve sürekli olmadığı, normal betondaki küresel şekilli hava boşluklarından farklı olduğu gözlenmiştir. SSB'nin geçirgenliğinin normal betona göre daha düşük olabileceği sonucuna varılmıştır. Optimum miktarda uçucu kül, su azaltıcı katkı ve agrega içeren SSB karışımlarının vibrasyonlu silindirlerle sıkıştırılması sonucunda dona dayanıklılığının artacağı belirlenmiştir.

Atış (2005) yaptığı çalışmada yüksek miktarda uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılmış betonların dayanım özelliklerini ve kür koşullarının etkisini incelemiştir. Deneyde 2 çeşit (düşük ve yüksek kalitede) düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu kül %0, %50 ve %70 oranlarında çimento yerine kullanılmıştır. Su/bağlayıcı madde oranları 0.23 ile 0.43 arasında değiştirilmiştir. Deneyde en büyük tane boyutu 10 mm kırılmamış, temiz ve doğal kuvarsitik agrega kullanılmıştır. Kontrol karışımının çimento miktarı 400 kg/m^3 'tür. Karışımlar süperakışkanlaştırıcı kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanmıştır. Kontrol karışımının su miktarını tespit etmek amacıyla sarsma çökme testi yapılmıştır. Karışımların dört adedi standartlara uygun olan Drax uçucu külü ile (2 adedi süperakışkanlaştırıcı katkılı, 2 adedi katkisiz), dört adedi standartlara uygun olmayan Aberthaw uçucu külü ile (2 adedi süperakışkanlaştırıcı katkılı, 2 adedi katkisiz), iki adet ise kontrol karışımı (1 adedi süperakışkanlaştırıcı

katkılı, 1 adedi katkısız) olmak üzere toplam 10 karışım hazırlanmıştır. 100 mm ayrıtlı küp numuneler basınç dayanımı için, 100/100/500 mm ayrıtlı prizmatik numuneler eğilme dayanımı için, 150/300 mm ayrıtlı silindirik örnekler ise yarmada çekme dayanımı için hazırlanmıştır. Deney numuneleri 1 gün kalıpta kaldıktan sonra 20 °C sıcaklıkta %65 ve %100 bağıl nemde 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360 gün boyunca kür edilmiştir. Sonuçta; uygun bir süperakışkanlaştırıcı kullanıldığı takdirde SSB'nin daha işlenebilir olacağı belirtilmiştir. Standartlara uygun olmayan ve kızdırma kaybı değeri yüksek olan Aberthaw uçucu külü betonun su ihtiyacını artırdığı, standartlara uygun olan Drax uçucu külü ise betonun su ihtiyacını azalttığı, bunun sonucunda ise Drax uçucu küllü karışımların dayanım değerlerinin arttığı rapor edilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı içeren SSB karışımların 1 günlük dayanımlarının daha düşük olduğu, fakat, 3 gün ve sonraki yaşlarda dayanım kazanma hızlarının arttığı belirtilmiştir. Yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB karışımlarının basınç ve çekme dayanımları normal betonlara göre yakın veya fazla değer almaktadır. %50 oranında çimento yerine Drax uçucu küllü karışımın dayanım gelişmesi daha yüksek iken 70% oranındaki Drax uçucu külünün dayanım kazanma hızı orta seviyede olduğunu, 50% oranında çimento yerine kullanılan Aberthaw uçucu külünün 28 dayanım kazanma hızının kabul edilebilir düzeyde olduğunu ve 1 yılda ise yüksek dayanımlar elde edildiği görülmüştür.

8. HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMLERİ

Hızlandırılmış kür yöntemleri, esas olarak beton deney numunelerinin seçilen metoda bağlı olarak 5-49 saat arasında son dayanımlarının önemli bir kısmını kazanmasını sağlamak amacıyla yüksek sıcaklık ve nem koşullarında tutulmasına dayanır. Hızlandırılmış kür yöntemlerinin amacı betona erken mukavemet kazandırmaktır. SSB'nin dayanım yaşı olarak genellikle 90-180 veya 360 gün dikkate alınmaktadır. Bu süreler oldukça uzun olduğundan, büyük ekonomik kayıplara yol açabilir. Bu amaçla üretilen betonun dayanım sürecini hızlandırıcı, çeşitli kür yöntemleri geliştirilmiştir.

ASTM C684 “Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens” ’e göre ılık su, kaynar su, otojen kütleme ve otoklav yöntemi olmak üzere 4 farklı hızlandırılmış kür yöntemi vardır. Bu standarda göre A ve B metotlarında önceden nem kaybı önlenmiş beton numuneleri sıcak veya kaynar su içinde tutularak yüksek kür sıcaklığı sağlanır. A metodunun amacı hidrasyon sonucu açığa çıkan ısıyı muhafaza edecek bir yalıtım ortamının oluşturulmasıdır. B metodunda amaç, termal bir hızlandırma sağlamaktır. C metodunda beton deney numunelerinde neme ve sıcaklığa karşı yalıtılmış bir ortam sağlanarak kür sıcaklığının çimentonun hidrasyon ısısından sağlanması amaçlanmıştır. D metodundaki amaç yüksek sıcaklık ve basınç altındaki beton deney numunelerinin özel kaplarda kür edilmesidir. Çizelge 8.1’de ASTM C684’e göre hızlandırılmış deney yöntemlerinin özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 8.1: ASTM C684'e göre hızlandırılmış deney yöntemleri

Yöntem	Kalıp	Dayanım kazanma kaynağı	Maximum kür sıcaklığı °C	Kür başlangıcı yaşı	Kür süresi	Deney yaşı
Ilık su (A)	Yeniden kullanılabilir veya tek seferlik	Hidratasyon ısısı	35	Dökümden hemen sonra	23.5 s ± 30 dk	24 s ± 15 dk
Kaynar su (B)	Yeniden kullanılabilir veya tek seferlik	Kaynar su	Kaynar	Dökümden 23 s ± 30 dk sonra	3.5 s ± 5 dk	28.5 s ± 15 dk
Otojen (C)	Tek seferlik	Hidratasyon ısısı	Hidratasyon ısısı tarafından artırılmış başlangıç beton sıcaklığı	Dökümden hemen sonra	48 s ± 15 dk	49 s ± 15 dk
Otoklav (D)	Yeniden kullanılabilir	Dış kaynaklı sıcaklık ve basınç	150	Dökümden hemen sonra	5 s ± 5 dk	1.25 ± 5 dk

8.1. Ilık Su Yöntemi

Hazırlanan 150x300 mm silindir beton numuneler, kalıba döküldükten hemen sonra su tankına konulur. Kür sürecinde su tankının sıcaklığının $35 \pm 3^\circ\text{C}$ olmalıdır. 23.5 s ± 30 dk sonunda beton numuneleri su tankından çıkartılıp kalıpları sökülür. 30 dakika geçmeden başlık yapılır. Numuneler 24 s ± 15 dakika yaşını tamamladıktan sonra deneye tabi tutulur.

8.2. Kaynar Su Yöntemi

Bu yöntemde, 150x300 mm silindir deney numuneleri, kalıplara dökümü tamamlandıktan 23.5 saat ± 15 dakika sonra hızlandırılmış kür kabına konulur. Kür kabındaki su sıcaklığı deney numunesinin konulması

ve kür süresi boyunca kaynama noktasında olması sağlanmalıdır. 3.5 saat $\pm$ 5 dakika süreyle kür yapıldıktan sonra deney numunesi kaynar sudan çıkarılarak kalıbı sökülür. Başlıklamadan önce 1 saatten az olmamak üzere oda sıcaklığında soğumaya bırakılır, daha sonra basınç deneyine tabi tutulur.

8.3.Otojen Yöntemi

150x300 mm silindir taze beton numunesi kalıplara yerleştirildikten sonra havası alınmış plastik torba içine konulur. Daha sonra numune kür kabına konulup ağzı sıkıca kapatılır. 48 saat $\pm$ 15 dakika sonra numuneler kür kabından çıkarılır, kalıpları sökülür ve 30 dakika ortam sıcaklığına bırakılır. Başlıklanan numuneler üzerinde basınç dayanım deneyi yapılır.

8.4. Otoklav Yöntemi

Bu yöntemde 75 x 150 mm'lik silindir numuneler kullanılır. Beton numesinin en büyük tane boyutu ise 25 mm olmalıdır. Beton kalıba 2 aşamada yerleştirilir ve her aşamada 10 kez şişlenir. Dökümü yapıldıktan hemen sonra silindir numuneleri metal kapakla kapatılır ve kür kabına konur. 30 $\pm$ 5 dakikada, kür kabının basıncı 10.3 $\pm$ 0.2 MPa ve sıcaklığı 150 $\pm$ 3°C' ye çıkarılır. İlk 3 saatte kür kabının sıcaklığı 150 $\pm$ 3°C'de korunur. Daha sonra bu sıcaklık kaldırılır ve numune sadece basınç altında kür edilir. 5 saat 25 $\pm$ 5 dakikanın sonunda beton numuneleri kür kabından alınıp başlıklanır ve 30 dakika içinde basınç deneyine tabi tutulur.

TS 3323 "Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması, Hızlandırılmış Kür ve Basınç Dayanımı Deneyi" 'ne göre 3 farklı hızlandırılmış kür yöntemi tanımlanmaktadır. Bu yöntemler; sıcak su kürü yöntemi(A), kaynar su kürü yöntemi(B) ve otojen kür(C) yöntemidir. Bu yöntemler ASTM C684'teki yöntemlere benzerdir. Çizelge 8.2.'de TS 3323'e göre hızlandırılmış deney yöntemleri ve özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 8.2: TS 3323'e göre hızlandırılmış deney yöntemleri

Yöntem	Hızlandırılmış kür ortamı sıcaklığı °C	Hızlandırılmış küre başlama yaşı	Hızlandırılmış kür süresi	Basınç dayanım deneyi yaşı
A metodu (sıcak su kürü)	35	Numunenin dökümünden hemen sonra	23.5 s ± 30 dk	24 s ± 15 dk
B metodu (kaynar su kürü)	Kaynama sıcaklığı	Numunenin dökümünden 23 s sonra	3.5 s ± 5 dk	28.5 s ± 15 dk
C metodu (hidratasyon ısısı kürü)	Hidratasyon ısısından ileri gelen beton sıcaklığı (çimento cinsine ve karışım oranlarına göre değişir)	Numunenin dökümünden hemen sonra	48 s ± 15 dk	49 s ± 15 dk

9. DENEYSEL ÇALIŞMA

9.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı; özellikle silindire sıkıştırılmış beton barajlarda kullanılan karışımların basınç dayanımlarının farklı hızlandırılmış kür yöntemleri ile belirlenmesidir. Bu sayede silindire sıkıştırılan betonun 180 günde kazanacağı dayanımı daha kısa sürede tahminlemek mümkün olacaktır.

9.2. Kapsam

Bu tez çalışmasında, 1 m³'te 60 kg sabit çimento ve 25, 30, 40, 50, 60 ve 90 kg uçucu kül içeriğinde karışımlar hazırlanmıştır. Her karışım her yaş grubu için üçer adet toplam 126 adet silindir örnek dökülerek farklı kür koşullarına tabi tutulmuştur. Standart yöntemle kürlenmiş kontrol örneklerinin 7, 28, 90 ve 180 günlük dayanımları belirlenmiştir. Diğer numune grubu ise hızlandırılmış yöntemler ile kürlenmiştir. Ilık su, kaynar su, otojen ve otoklav olmak üzere dört farklı hızlandırılmış kür yöntemi uygulanmıştır. Yapılan silindire sıkıştırılmış beton karışımları zemin yaklaşımı ile tasarlanmıştır. Taze beton karışımları üzerinde Vebe deneyi, sertleşmiş numunelere ise tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Tüm karışımlarda sıkışma yüzdesinin %98-100 arasında olduğu saptanmıştır. Farklı kür yöntemlerinin basınç dayanımına etkisi kıyaslanmıştır.

9.3. Kullanılan Malzeme

9.3.1. Çimento

Çalışmada Çimentaş Çimento Fabrikası'ndan sağlanan CEMI 42.5R tipinde çimento kullanılmıştır. Çimentaş Çimento Fabrikası'nda belirlenen çimentonun fiziksel özellikleri Çizelge 9.1'de kimyasal özellikleri ise Çizelge 9.2'de gösterilmiştir. Tablolarda belirtilen değerler çimentonun üretildiği fabrikadan alınan değerlerdir. Elde edilen sonuçlar TS EN 197-1 standardının sınırlarını sağlamaktadır. Kullanılan çimento Beydağ Barajı çimento silolarından alınmış olup laboratuvar ortamında ağzı kapalı plastik bidonlarda nem almayacak şekilde deneyler süresince muhafaza edilmiştir.

Çizelge 9.1: Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel özellikler		CEM I 42.5R	İlgili deney standardı	TS EN 197-1 standart limitleri
Özgül ağırlık		3.11	196-6	---
İncelik	Özgül yüzey (cm ² /g)	3650	196-6	---
	0.090 mm elek üstü (%)	0.3	196-6	---
	0.032 mm elek üstü (%)	16	196-6	---
	Hacim sabitliği (mm)	1.5	196-3	≤ 10 mm
Priz başlangıcı (dakika)		160	196-3	≥ 60 dakika
Priz sonu (dakika)		240	196-3	---
% Normal kıvam suyu		27	196-3	---
Basınç dayanımı (MPa)	2 günlük	43.6	196-1	≥20 MPa
	7 günlük	52.4	196-1	---

Çizelge 9.2: Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri (TS EN 196-2'ye göre belirlenmiştir)

Kimyasal özellikler (%)	CEM I 42.5R	TS EN 197-1 standart limitleri
CaO	63.22	---
SiO ₂	19.23	---
Al ₂ O ₃	4.86	---
Fe ₂ O ₃	3.49	---
MgO	1.02	---
Na ₂ O	0.23	---
K ₂ O	0.8	---
SO ₃	2.79	≤ 3.50
Kızdırma kaybı	2.31	≤ 5.00
Cl*	0.006	≤ 0.10
Çözünmeyen kalıntı	0.22	≤ 5

*TS EN 196-21'e göre belirlenmiştir

9.3.2. Uçucu Kül

Karışım çalışmalarında Seyitömer uçucu külü kullanılmıştır. Seyitömer Termik Santrali'nde belirlenen uçucu külün fiziksel özellikleri Çizelge 9.3'te kimyasal özellikleri ise Çizelge 9.4 de gösterilmiştir. Deney süresince nem almamalarına özen gösterilen uçucu kül, laboratuvarında plastik bidonlarda saklanmıştır.

Çizelge 9.3: Kullanılan uçucu külün fiziksel özellikleri

Fiziksel özellikler	Uçucu kül	İlgili deney standardı	Standart limitleri
Yoğunluk (g/cm ³)	1.83	---	---
Blaine yüzeyi (cm ² /g)	3410	---	---
45 µm elekten kalan % yaş analizi	37.6	TS EN 450	Max. %40

Çizelge 9.4: Kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler	Uçucu kül	Standart no	Standart limitleri
SiO ₂ (S)	53.90	---	---
Al ₂ O ₃ (A)	20.55	---	---
Fe ₂ O ₃ (F)	9.42		
S+A+F	84.12	ASTM C618	≥50.00
CaO	4.61	---	---
MgO	4.67	---	---
SO ₃	0.58	ASTM C618	≤5.00
K ₂ O	2.01	---	---
Na ₂ O	0.65	ASTM C618	≤1.50
Kızdırma Kaybı	3.03	ASTM C618	≤6
Cl ⁻	0.0056	---	---

9.3.3. Agregat

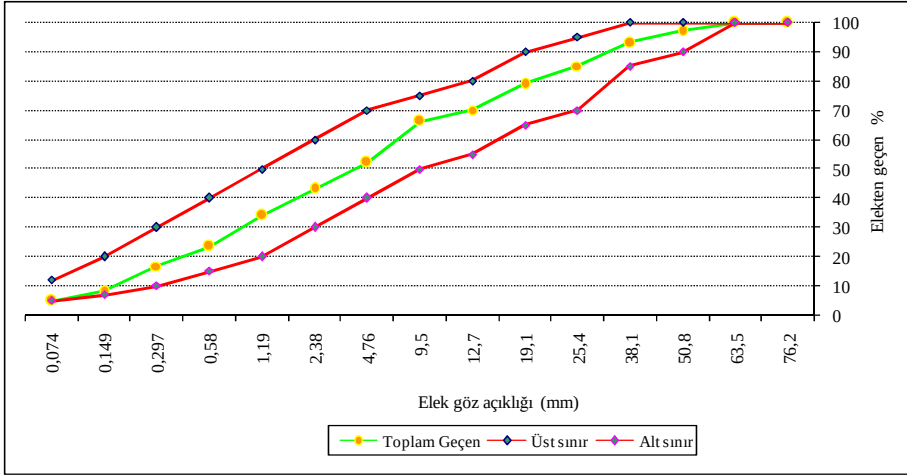
Deneysel çalışmada Beydağ Barajı havzasındaki Küçük menderes nehrinden temin edilen dere agregası kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 63.5 mm seçilmiş ve malzeme 3 sınıfa ayrılarak karışımlarda kullanılmıştır. Bu sınıflar 0-4.76, 4.76-19.1, 19.1-63.5 mm'dir. Agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 9.5'te, gradasyonu Çizelge 9.6'da, gradasyon eğrisi ise Şekil 9.1'de verilmiştir.

Çizelge 9.5: Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Çakıl	Kum
Özgül ağırlık	2.66	2.67
Su emme (%)	1.01	1.09
Los Angeles aşınma kaybı (%)	11.0	41.1
Sodyum Sülfat don kaybı (%)	4.30	5.13
#200 elekten geçen (%)	0.67	6.47
Kil topakları (%)	0.65	2.47

Çizelge 9.6: Kullanılan agreganın gradasyonu

Elek açıklığı (mm)	Elekten geçen malzeme (%)			Toplam geçen %	Toplam kalan %	Sınır değerler Dmax=63.5mm	
	İri agregat 1	İri agregat 2	İnce agregat			Üst	Alt
	(19.1– 63.5)	(4.76 –19.1)	(0 – 4.76)				
76.2	100	100	100	100	0.0	100	100
63.5	100	100	100	100	0.0	100	100
50.8	89.0	100	100	97.1	2.9	100	90
38.1	73.3	100	100	93.1	6.9	100	85
25.4	42.8	100	100	85.1	14.9	95	70
19.1	19.3	100	100	79.0	21.0	90	65
12.7	0.0	80.5	100	70.1	29.9	80	55
9.5	0.0	60.9	100	66.2	33.8	75	50
4.76	0.0	5.7	94.3	52.1	47.9	70	40
2.38	0.0	0.0	79.7	43.0	57.0	60	30
1.19	0.0	0.0	63.3	34.2	65.8	50	20
0.58	0.0	0.0	43.7	23.6	76.4	40	15
0.297	0.0	0.0	31.1	16.8	83.2	30	10
0.149	0.0	0.0	15.0	8.1	91.9	20	7
0.074	0.0	0.0	9.1	4.9	95.1	12	5



Şekil 9.1. Kullanılan agreganın gradasyon eğrisi (Andriolo ve Polat, 2006).

9.4. Karışım Hesabı

Çalışma kapsamında silindir ile sıkıştırılmış betonun karışım oranları Beydağ Barajı hazırlık çalışmalarından yararlanılarak zemin yaklaşımına göre tasarlanmıştır.

9.4.1. Karışımda Kullanılan Bağlayıcı Madde Miktarının Belirlenmesi

Karışımda kullanılan bağlayıcı madde miktarının belirlenmesinde Beydağ Barajı karışım geliştirme çalışmalarından yararlanılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan çimento, uçucu kül ve agreganın Beydağ Barajı'nda kullanılan malzemenin aynısı olması karışımlar arası kıyaslama imkanı sağlamıştır. Ayrıca karışımların uygulama sonuçlarının elde olması avantaj oluşturmuştur.

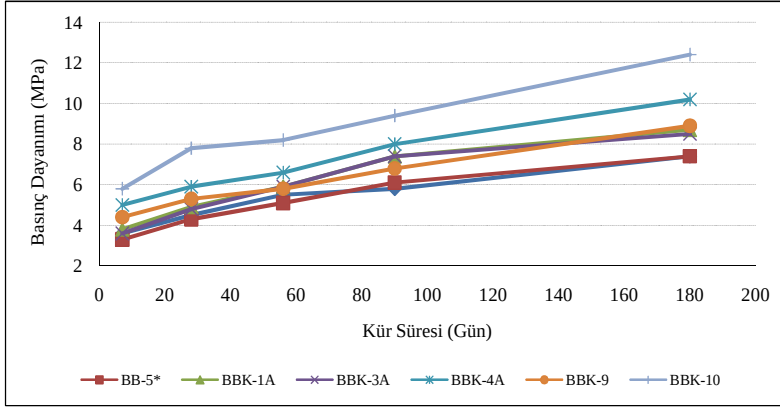
Beydağ Barajı için projede belirtilen 180 günlük hedef basınç dayanımı 7.5 MPa olarak belirtilmiştir. Bu hedef dayanımı elde edebilmek için yapılan karışım geliştirme sonuçları Çizelge 9.7’de ve grafik şeklinde ise Şekil 9.2.’de verilmiştir. Çalışmalar sonucunda, hedef dayanımı sağlayan BBK-9 karışımı seçilmiştir (Çizelge 9.8). Ayrıca Çizelge 9.9’da Beydağ Barajı’ndan alınan ortalama laboratuvar ve karot basınç dayanımları görülmektedir. Karot dayanımları laboratuvar dayanımlarından daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi laboratuvar koşullarında numune daha iyi sıkıştırılıp, hava koşullarından korunabilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmada karışımların çimento içeriği 60 kg seçilmiştir. Uçucu kül miktarları ise 25, 30, 40, 50, 60, 90 kg alınmıştır.

Çizelge 9.7. Beydağ Barajı karışım geliştirme çalışmaları sonuçları

Karışım	(Çimento/u.kül/su) (kg/m ³)	Basınç dayanımı (MPa)				
		7 Gün	28 Gün	56 Gün	90 Gün	180 Gün
BB-2	50/40/125	3.6	4.5	5.5	5.8	7.4
BB-5*	50/40/125	3.3	4.3	5.1	6.1	7.4
BBK-1A	50/30/115	3.8	4.9	5.9	7.4	8.7
BBK-3A	50/40/115	3.6	4.8	5.9	7.4	8.5
BBK-4A	50/40/110	5.0	5.9	6.6	8.0	10.2
BBK-9	60/30/125	4.4	5.3	5.8	6.8	8.9
BBK-10	60/40/110	5.8	7.8	8.2	9.4	12.4

*BB-2 karışımından farklı bir çimento kullanılmıştır.



Şekil 9.2. Beydağ Barajı karışım geliştirme çalışmaları sonuçları (Andriolo ve Polat, 2006).

Çizelge 9.8. BBK-9 karışım oranları (Andriolo ve Polat, 2006).

BBK-9	Miktar (kg/m ³)
Çimento	60
Uçucu kül	30
Su	125
0-50 agrega	2161
Toplam	2376

Çizelge 9.9. Beydağ Barajı laboratuvar ve karot numuneleri basınç dayanımı sonuçları (Andriolo ve Polat, 2006).

Yaş (gün)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)		Dayanım farkı (%)
	Laboratuvar	Karot	
28	5.4	4.8	11.11
90	6.8	5.9	13.23
180	8.5	7.5	11.76
365	9.3	8.4	9.68

9.4.2. Karışımda Kullanılan Su Miktarının Belirlenmesi

Karışım hesaplarında kullanılan su miktarının belirlenmesinde, istenilen sıkışmayı mümkün kılacak en düşük su içeriği hedeflenmiştir. Karışım su içeriğinin sıkıştırmaya direkt etkisi olduğu dikkate alınır; düşük su içeriğindeki karışımlar laboratuvar koşullarında sıkıştırılabilir olsa da, sahada sıkıştırmada güçlük yaratabilir. Karışımda bağlayıcı miktarı arttırılmadan, arttırılacak su miktarı doğrudan dayanımların düşmesine neden olacağı açıktır. Karışımların çimento içeriğinin düşük olmasından dolayı bu karışımlarda Vebe süresi çok etkili bir kriter değildir. Bu nedenle karışımlarda Vebe süresi 48 sn civarında sabit tutulmuş ve maksimum sıkışmayı sağlayacak su içeriği deneysel olarak seçilmiştir. Oluşturulan karışımlarda 118 lt/m^3 ile 135 lt/m^3 arasında su kullanılmıştır.

9.4.3. Karışımların ve Silindir Örneklerinin Hazırlanmasında İzlenen Yöntem

Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Çizelge 9.10'da verilmiştir.

Karışım ve silindir örneklerinin hazırlanmasında aşağıdaki belirtilen işlemler sırasıyla yapılmıştır:

- Öncelikle karışımda kullanılacak agreganın su içeriği belirlenmiştir. Karışıma girecek malzemeler ayrı ayrı tartılıp hazırlanmıştır.
- Karışımlar 250 dm^3 kapasiteli laboratuvar karıştırıcısında hazırlanmıştır (Şekil 9.3).

- Karışımlar üzerinde Vebe ve sıkışmış birim ağırlık deneyleri yapılmıştır (Şekil 9.4).

Çizelge 9.10. SSB karışımlarında kullanılan malzeme miktarı

Karışım	Malzeme (kg/m ³)						Toplam
	Çimento	Uçucu kül	Su	0-4.76 Agrega	4.76-19.1 Agrega	19.1-63.5 Agrega	
SSB-1	60	25	118	1170	464	574	2411
SSB-2	60	30	120	1186	439	571	2406
SSB-3	60	40	122	1111	479	588	2400
SSB-4	60	50	123	1125	476	563	2397
SSB-5	60	60	125	1138	451	558	2392
SSB-6	60	90	135	1063	458	563	2369



Şekil 9.3.Betoniyer



Şekil 9.4.Vebe aleti

- Hazırlanan karışımın her tabakası 15 sn havalı tabanca ucuna bağlı aparatla sıkıştırılarak 2 tabaka halinde silindir kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 9.5)



Şekil 9.5. SSB numunelerinin hazırlanması (a) SSB'nin havalı tabanca kullanılarak sıkıştırılması (b) SSB'nin son kademesinin sıkıştırılması

- Deneysel çalışmada 6 farklı karışım hazırlanmıştır. Kontrol numunesi olarak adlandırılan örnekler standart yöntemlerle kürlenmiş olup 7, 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Buna ilaveten numuneler ılık su, kaynar su, otojen ve otoklav olmak üzere dört farklı hızlandırılmış yöntemle kürlenerek basınç dayanımları bulunmuştur.
- Kontrol numuneleri 24 saat sonunda kalıplardan alınarak $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ su havuzuna konulmuştur. Bu numuneler kırılma gününe kadar su havuzunda tutulmuştur.



Şekil 9.6. Ilık su ve kaynar su kürü deneyleri

SSB üretiminde 250 dm^3 kapasiteli, düşey eksenli karıştırıcı sistemine sahip betoniyer kullanılmıştır. Betoniyere ilk önce agregalar konulmuştur. Daha sonra bağlayıcı maddeler olan çimento ve uçucu kül karıştırılmıştır. Homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılan malzemeye yavaş yavaş su eklenmiştir. Karışım süresi 175 ± 15 saniye olarak ayarlanmıştır. Karışım homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra önceden yağlanmış $150/300 \text{ mm}$ boyutlu silindir numunelerin içine 2 aşamada konulmuştur. ASTM C-470'e uygun, yeniden kullanılabilir, plastik astarlı ve ayrılabilir çelik kalıplar kullanılmıştır. Her aşamada SSB numuneleri havalı tabanca ucuna bağlı bir aparatla 15 sn boyunca sıkıştırılmıştır. 2. aşamada SSB'nin üst kısmını sıkıştırmak amacıyla 5 cm yüksekliğinde ilave bir halka kullanılmıştır.

SSB numunelerinin teorik birim hacim ağırlığı ile gerçek birim hacim ağırlığı arasındaki fark en fazla 9 kg/m^3 çıkmıştır. Bu yüzden herhangi bir ağırlık düzeltme işlemine gerek görülmemiştir.

9.5. Yapılan Deneyler

Deneyssel çalışma kapsamında hazırlanan numuneler standart kürün dışında, ASTM C684 standardına uygun olarak ılık su, kaynar su, otojen ve otoklav olmak üzere dört farklı hızlandırılmış kür rejimine tabi tutulmuştur. Karışımların taze haldeyken işlenebilirliği ASTM 1170 "Standart Test Method For Determining Consistency and Density Of RCC Using a Vibrating Table" standardına uygun olarak bulunmuştur. Sertleşmiş numuneler ise TS EN 12390-3 "Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini" standardına uygun olarak basınç dayanımları belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan hızlandırılmış kür yöntemlerinde ASTM C684 esas alınmıştır. Bunlardan ılık su ve otoklav yönteminde aşağıdaki değişiklikler yapılmıştır. Bu değişiklikler şunlardır:

- Ilık su yöntemi: Numuneler dökümden 4 saat sonra ılık suya ($35 \pm 3^{\circ}\text{C}$) alınmıştır. 23.5 saat kürde bekletilen numuneler 27.5 saat sonunda tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. İçindeki düşük çimento içeriği ve uçucu kül katkısından dolayı SSB, prize normal betondan daha geç bir sürede geçmektedir. Bu yüzden numuneler dökümden sonra oda sıcaklığında 4 saat bekletildikten sonra ılık suya konulmuştur.
- Otoklav yöntemi: Numuneler dökümden 4 saat sonra küre alınmıştır. 5 saat kürde bekletilen numuneler 9 saat sonunda tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Kullanılan silindir numune kalıpları 150/300 mm olup, hazırlanan karışımın en büyük tane boyutu 63.5 mm'dir. Ilık su yöntemindeki gibi SSB'nin basınç ve sıcaklıktan zarar görmemesi için 4 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Tek eksenli basınç 150/300 mm ayrıtlı silindir numuneleri üzerinde yapılmıştır (Şekil 9.7). Basınç testi öncesinde 150/300 mm

boyutlu silindir numunelerine kükürt başlık yapılmıştır. Tek eksenli basınç deneyleri için, 200 ton kapasiteli, numune boyutuna göre ayarlanabilir, hidrolik beton presi kullanılmıştır. TS EN 12390-4 “Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 4: Basınç Dayanımı- Deney Makinalarının Özellikleri” standardına uygun hidrolik deney presi Şekil 9.7.’de görülmektedir. Sertleşmiş beton deneyleri TS EN 12390-3 “Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3 : Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini” standardı referans alınarak yapılmıştır.



Şekil 9.7. Tek eksenli basınç deneyi

10. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar bu bölümde çizelgeler ve şekiller halinde sunulmuştur.

10.1. Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları:

Sırasıyla 25, 30, 40, 50, 60 ve 90 kg uçucu kül ile 60 kg çimento kullanılarak yapılan karışımların 7, 28, 90, ve 180 günlük standart kür, ılık su, kaynar su, otojen ve otoklav kürü sonrasındaki tek eksenli basınç deneyi sonuçları Çizelge 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5 ve 10.6'da verilmiştir. Çizelgelerde "V", varyasyon, "SS", standart sapma, "Ort." ise, ortalama anlamındadır.

Çizelge 10.1. SSB-1 Karışımına ait basınç dayanımları

Yöntem	Basınç dayanımı (MPa)	Ort (MPa)	SS (MPa)	V (%)
7 Günlük sta. kürlen	5.26	5.15	0.1	1.94
	5.08			
	5.11			
28 Günlük sta. kürlen	6.93	6.72	0.19	2.83
	6.66			
	6.56			
90 Günlük sta. kürlen	7.98	7.87	0.11	1.4
	7.86			
	7.76			
180 Günlük sta. kürlen	8.31	8.56	0.24	2.8
	8.59			
	8.78			
Ilık su	1.92	1.97	0.12	6.09
	2.1			
	1.88			
Kaynar su	3.46	3.27	0.25	7.65
	3.36			
	2.98			

*Bu karışımlara otojen ve otoklav kürü uygulanmamıştır.

Çizelge 10.2. SSB-2 Karışımına ait basınç dayanımları

Yöntem	Basınç dayanımı (MPa)	Ort (MPa)	SS (MPa)	V (%)
7 Günlük sta. kürlenene	5.34	5.22	0.15	2.87
	5.27			
	5.05			
28 Günlük sta. kürlenene	7.08	7.09	0.06	0.85
	7.15			
	7.03			
90 Günlük sta. kürlenene	7.99	7.91	0.39	4.93
	7.49			
	8.25			
180 Günlük sta. kürlenene	8.64	8.84	0.33	3.73
	8.67			
	9.22			
Ilık su	2.12	2.05	0.08	3.9
	2.08			
	1.96			
Kaynar su	3.44	3.47	0.13	3.75
	3.36			
	3.62			
Otojen	2.12	2.24	0.12	5.36
	2.36			
	2.25			
Otoklav	4.66	4.76	0.1	2.1
	4.86			
	4.76			

Çizelge 10.3. SSB-3 Karışımına ait basınç dayanımları

Yöntem	Basınç dayanımı (MPa)	Ort (MPa)	SS (MPa)	V (%)
7 Günlük sta. kürlenene	5.52	5.54	0.1	1.81
	5.45			
	5.64			
28 Günlük sta. kürlenene	7.84	7.64	0.2	2.62
	7.45			
	7.64			
90 Günlük sta. kürlenene	9.06	8.89	0.15	1.69
	8.85			
	8.77			
180 Günlük sta. kürlenene	9.62	9.74	0.16	1.64
	9.68			
	9.93			
Ilık su	2.34	2.23	0.12	5.38
	2.11			
	2.23			
Kaynar su	3.66	3.71	0.09	2.43
	3.65			
	3.81			

*Bu karışımlara otojen ve otoklav kürü uygulanmamıştır.

Çizelge 10.4. SSB-4 Karışımına ait basınç dayanımları

Yöntem	Basınç dayanımı (MPa)	Ort (MPa)	SS (MPa)	V (%)
7 Günlük sta. kürlenene	6.07	5.95	0.14	2.35
	5.98			
	5.79			
28 Günlük sta. kürlenene	8.93	8.85	0.1	1.13
	8.88			
	8.73			
90 Günlük sta. kürlenene	10.28	10.24	0.17	1.66
	10.39			
	10.06			
180 Günlük sta. kürlenene	11.07	11.43	0.32	2.8
	11.6			
	11.63			
Ilık su	2.77	2.71	0.06	2.21
	2.67			
	2.68			
Kaynar su	5.25	5.21	0.22	4.22
	5.41			
	4.98			

*Bu karışımlara otojen ve otoklav kürü uygulanmamıştır.

Çizelge 10.5. SSB-5 Karışımına ait basınç dayanımları

Yöntem	Basınç dayanımı (MPa)	Ort (MPa)	SS (MPa)	V (%)
7 Günlük sta. kürlenene	6.01	6.02	0.14	2.33
	5.88			
	6.16			
28 Günlük sta. kürlenene	9.22	9.08	0.15	1.65
	9.09			
	8.93			
90 Günlük sta. kürlenene	11.85	11.,33	0.45	3.97
	11.1			
	11.03			
180 Günlük sta. kürlenene	12.02	12.03	0.27	2.24
	12.31			
	11.77			
Ilık su	2.78	2.82	0.09	3.19
	2.76			
	2.93			
Kaynar su	5.51	5.46	0.09	1.65
	5.36			
	5.51			
Otojen	2.91	2.82	0.08	2.84
	2.8			
	2.75			
Otoklav	6.85	7.08	0.23	3.25
	7.3			
	7.08			

Çizelge 10.6. SSB-6 Karışımına ait basınç dayanımları

Yöntem	Basınç dayanımı (MPa)	Ort (MPa)	SS (MPa)	V (%)
7 Günlük sta. kürlenen	8.47	8.28	0.17	2.05
	8.15			
	8.21			
28 Günlük sta. kürlenen	9.84	10.07	0.4	3.97
	9.83			
	10.53			
90 Günlük sta. kürlenen	12.18	12	0.37	3.08
	11.57			
	12.25			
180 Günlük sta. kürlenen	12.35	12.83	0.42	3.27
	13.08			
	13.06			
Ilık su	2.61	3.04	0.14	5.41
	2.44			
	2.72			
Kaynar su	5.83	6.12	0.34	5.56
	6.04			
	6.5			
Otojen	3	2.94	0.06	2.04
	2.92			
	2.89			
Otoklav	7.61	7.74	0.14	1.82
	7.88			
	7.74			

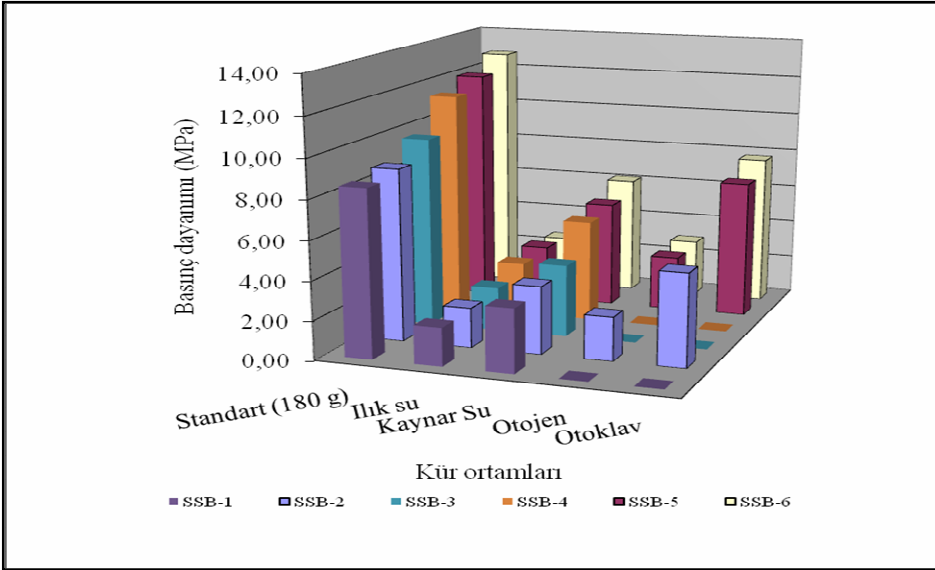
Daha kolay bir kıyaslama yapılabilmesi için tüm karışımların basınç dayanım değerleri Çizelge 10.7. ve 10.8.'de, grafikleri ise Şekil 10.1. ve 10.2.'de verilmiştir. Çizelge 10.7. ve Şekil 10.1.'de SSB karışımlarının farklı kür koşullarındaki ve 180 günlük standart kürde basınç dayanımları verilmiştir. Çizelge 10.8 ve Şekil 10.2.'de ise 7, 28, 90 ve 180 günlük standart kür ortamlarındaki basınç dayanımları verilmiştir.

Çizelge 10.7. Farklı yöntemlerle kürlenen SSB karışımlarının basınç dayanımı

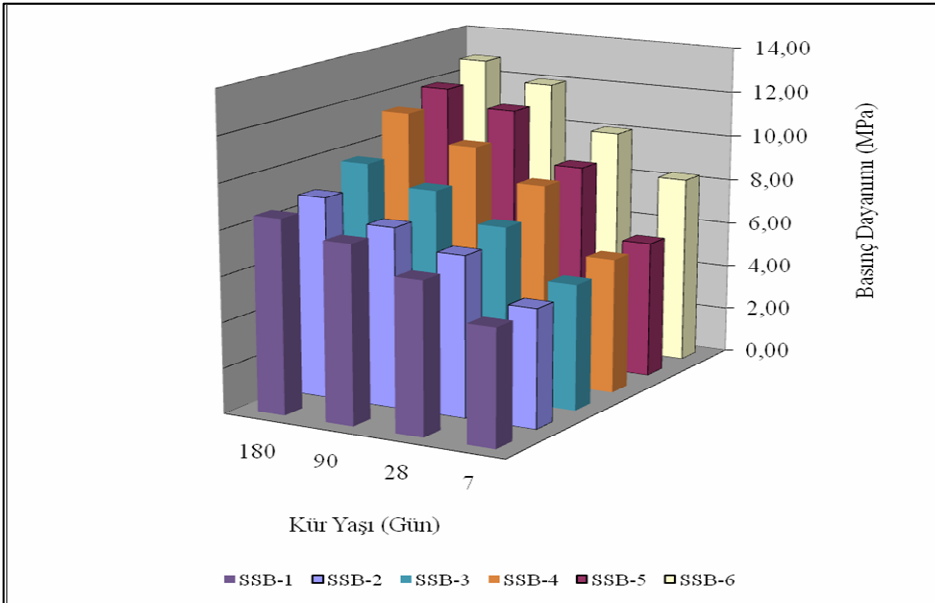
SSB karışımı	Çimento/Kül miktarı (kg)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)				
		Sta. kür 180 Günlük	Ilık su	Kaynar su	Otojen	Otoklav
SSB-1	60/25	8.56	1.97	3.27	---	---
SSB-2	60/30	8.84	2.05	3.47	2.24	4.76
SSB-3	60/40	9.74	2.23	3.71	---	---
SSB-4	60/50	11.43	2.71	5.21	---	---
SSB-5	60/60	12.03	2.82	5.46	2.82	7.08
SSB-6	60/90	12.83	3.04	6.12	2.94	7.74

Çizelge 10.8. Standart kürlenmiş SSB karışımlarının basınç dayanımı

SSB karışımı adı	Çimento/Kül miktarı (kg)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)			
		7 Günlük (MPa)	28 Günlük (MPa)	90 Günlük (MPa)	180 Günlük (MPa)
SSB-1	60/25	5.15	6.72	7.87	8.56
SSB-2	60/30	5.22	7.09	7.91	8.84
SSB-3	60/40	5.54	7.64	8.89	9.74
SSB-4	60/50	5.95	8.85	10.24	11.43
SSB-5	60/60	6.02	9.08	11.33	12.03
SSB-6	60/90	8.28	10.07	12.00	12.83



Şekil 10.1. Hızlandırılmış kür uygulanan SSB'lerin basınç dayanımı



Şekil 10.2. Standart kürlenen SSB'lerin basınç dayanımı

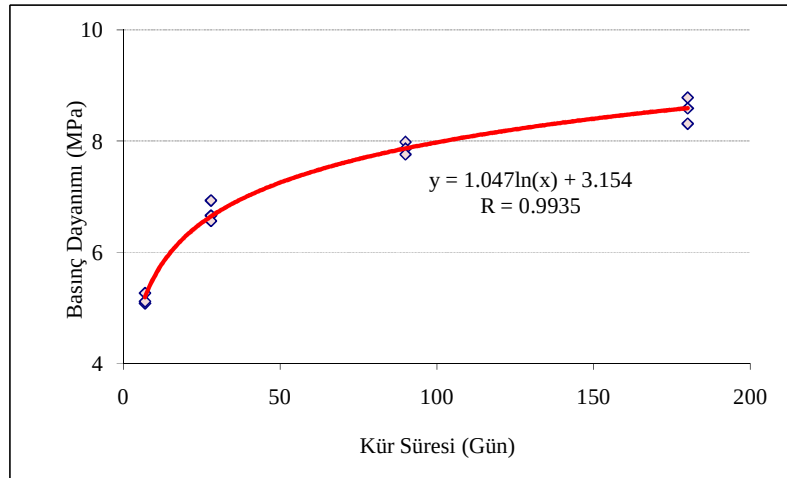
Çizelge 10.7. ve 10.8. ve Şekil 10.1 ve 10.2’de görüldüğü üzere çimento miktarları sabit tutularak yapılan karışımlarda normal betonlarda olduğu gibi uçucu kül artışı ile ortalama basınç dayanım değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

Uçucu kül artışıyla bazı karışımların varyasyon katsayılarında artış gözlemlenmiştir. Şekil 10.1.’de; 180 gün standart kürde tutulan numunenin basınç dayanımına en yakın olan kür ortamları sırasıyla otoklav, kaynar su, otojen ve ılık sudur.

10.2. Standart Kürlü Örneklerde Basınç Dayanımı

10.2.1. SSB-1 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi

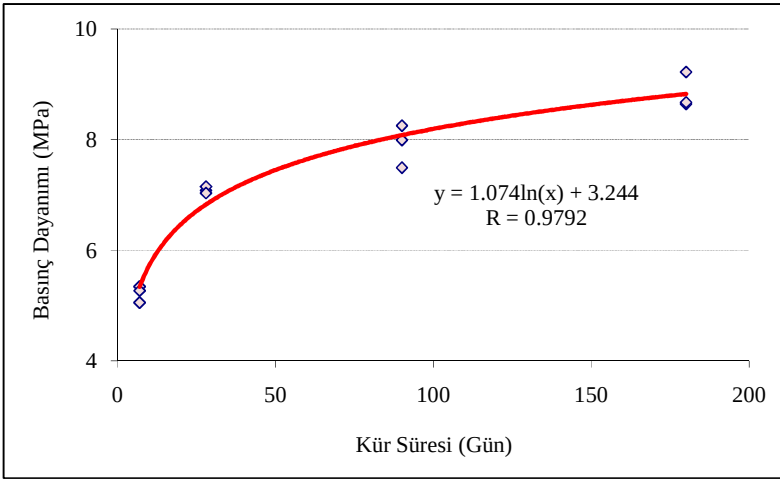
Şekil 10.3’te SSB-1 karışımına ait kür süresi-basınç dayanımı grafiği ve denklemi görülmektedir. Determinasyon katsayısı (R^2) 0.987, korelasyon katsayısı 0,9935’dir ve 1 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı zamanla logaritmik olarak artmaktadır.



Şekil 10.3. SSB-1 karışımı kür süresi-basınç dayanımı

10.2.2. SSB-2 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi

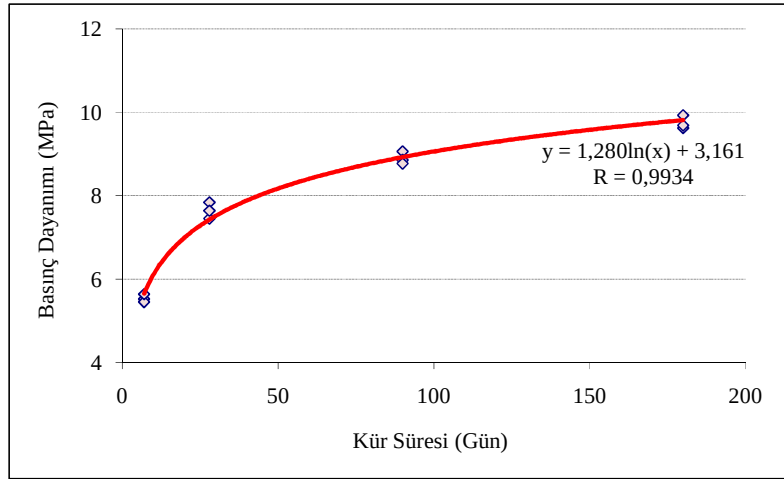
Şekil 10.4'te SSB-2 karışımına ait kür süresi-basınç dayanımı grafiği ve denklemi görülmektedir. Determinasyon katsayısı (R^2) 0.959, korelasyon katsayısı 0,9792'dir ve 1 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı zamanla logaritmik olarak artmaktadır.



Şekil 10.4. SSB-2 karışımı kür süresi-basınç dayanımı

10.2.3. SSB-3 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi

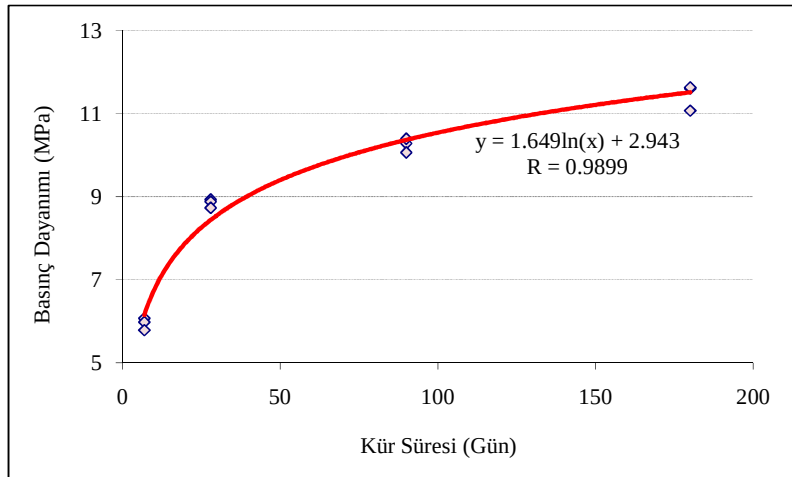
Şekil 10.5'te SSB-3 karışımına ait kür süresi-basınç dayanımı grafiği ve denklemi görülmektedir. Determinasyon katsayısı (R^2) 0.987, korelasyon katsayısı 0,9934'dir ve 1 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı zamanla logaritmik olarak artmaktadır.



Şekil 10.5. SSB-3 karışımı kür süresi-basınç dayanımı

10.2.4. SSB-4 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi

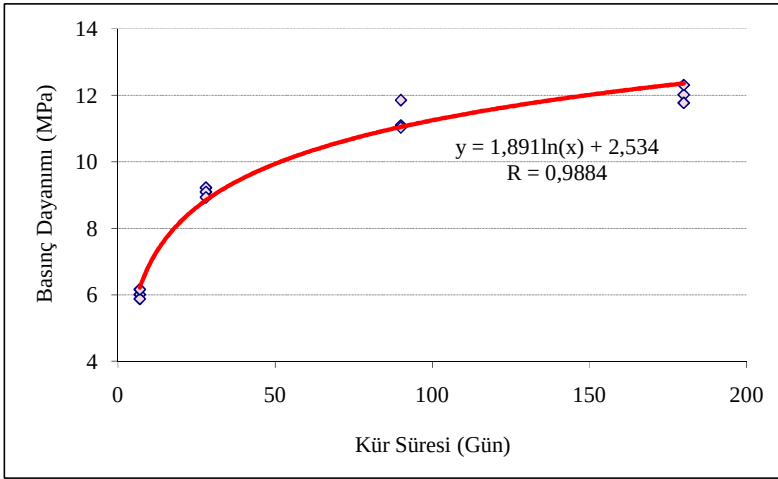
Şekil 10.6'te SSB-4 karışımına ait kür süresi-basınç dayanımı grafiği ve denklemleri görülmektedir. Determinasyon katsayısı (R^2) 0.987, korelasyon katsayısı 0,9899'tür ve 1 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı zamanla logaritmik olarak artmaktadır.



Şekil 10.6. SSB-4 karışımı kür süresi-basınç dayanımı

10.2.5. SSB-5 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi

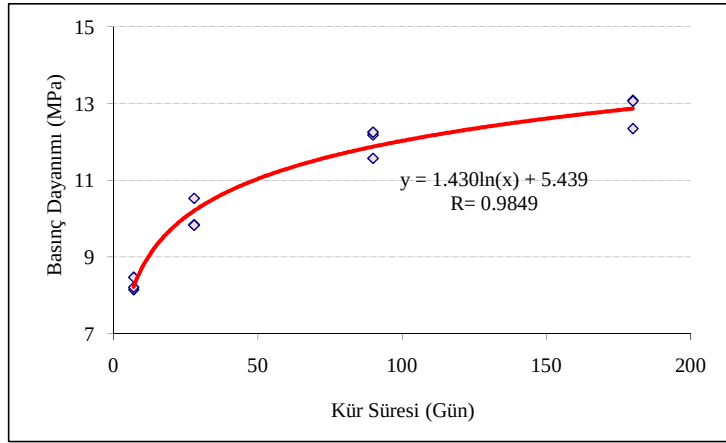
Şekil 10.7’te SSB-5 karışımına ait kür süresi-basınç dayanımı grafiği ve denklemi görülmektedir. Determinasyon katsayısı (R^2) 0.977, korelasyon katsayısı 0,9884’dir ve 1 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı zamanla logaritmik olarak artmaktadır.



Şekil 10.7. SSB-5 karışımı kür süresi-basınç dayanımı

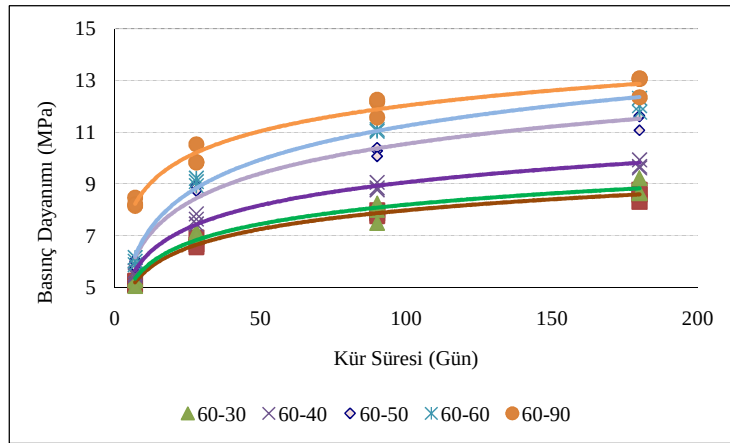
10.2.6. SSB-6 Karışımının Kür Süresi-Basınç Dayanımı İlişkisi

Şekil 10.8’de SSB-6 karışımına ait kür süresi-basınç dayanımı grafiği ve denklemi görülmektedir. Determinasyon katsayısı (R^2) 0.970, korelasyon katsayısı 0,9849’dir ve 1 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı zamanla logaritmik olarak artmaktadır.



Şekil 10.8. SSB-6 karışımı kür süresi-basınç dayanımı

Şekil 10.9’da standart kür uygulanan tüm SSB karışımlarına ait kür süresi-basınç dayanımı ilişkisi görülmektedir. Farklı uçucu kül oranlarında SSB karışımlarının kür süresi arttıkça basınç dayanımında bir artış göstermektedir. Uçucu külün kullanım oranı arttıkça sabit kür süresi için basınç dayanımı da artmaktadır.



Şekil 10.9. SSB Karışımlarına ait kür süresi-basınç dayanımı

Çizelge 10.9’da SSB-1 ve SSB-6 kontrol karışımlarının farklı günlerde uçucu kül miktarı artışı ile dayanma kazanma hızı arasındaki oranlar gösterilmiştir.

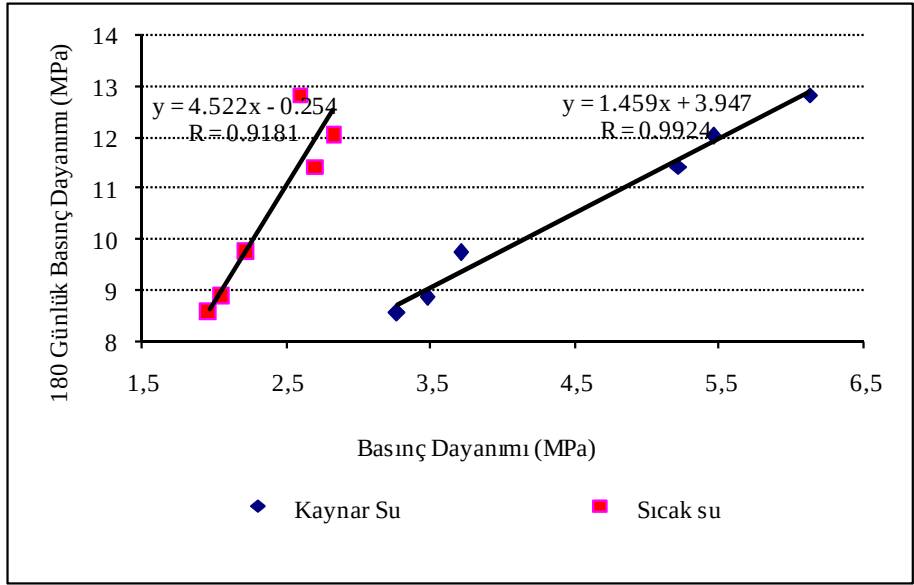
Çizelge10.9 Uçucu kül miktarı artışı-dayanım kazanma hızı

SSB Karışımları	% 7/28 Gün	% 90/28 Gün	% 180/28Gün
SSB-1	77	117	127
SSB-6	82	119	127

Çizelge 10.9’ da görüldüğü üzere SSB-1 ve SSB-6 karışımları 180 günün sonunda; 28 günlük basınç dayanımlarına göre basınç dayanımı kazanma hızı aynı olmaktadır.

10.3. Hızlandırılmış Kür Yöntemleri – 180 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

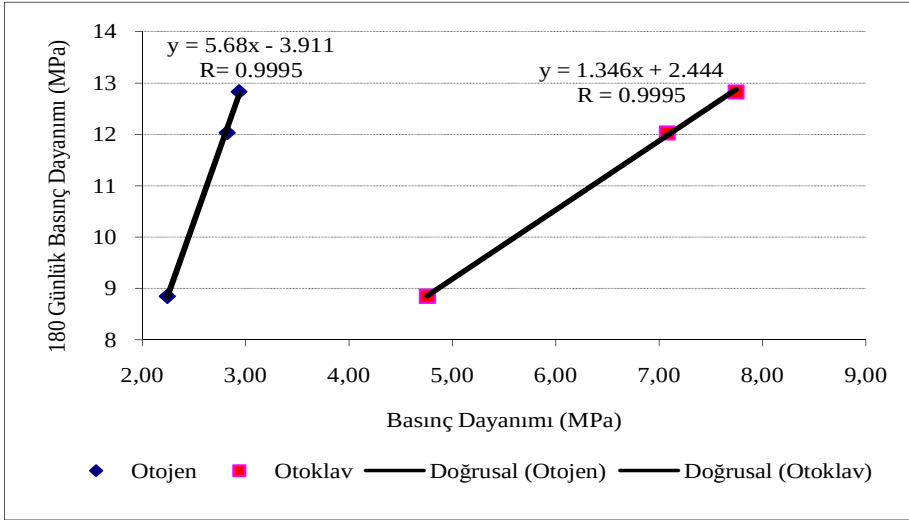
Şekil 10.10’da kaynar su ve ılık su yöntemleri kullanılarak yapılan karışımların 180 günlük standart kürde bekleyen karışımlar arasındaki bağlantı gösterilmiştir.



Şekil 10.10. Ilık su ve kaynar su kürü – 180 günlük basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 10.10’de kaynar su kürü ile 180 günlük basınç dayanımı arasındaki bağıntının determinasyon katsayısı (R^2) 0.985, korelasyon katsayısı (R) 0.9924’dur. Aynı şekilde ılık su kürü ile 180 günlük basınç dayanımı arasındaki bağıntının determinasyon katsayısı (R^2) 0.843 ve korelasyon katsayısı (R) 0.9181’dir. Korelasyon katsayıları 1 değerine oldukça yakındır.

Şekil 10.11’de ise otojen ve otoklav kür yöntemleri kullanılarak yapılan karışımların 180 günlük standart kürde bekleyen karışımlar arasındaki bağlantı gösterilmiştir.



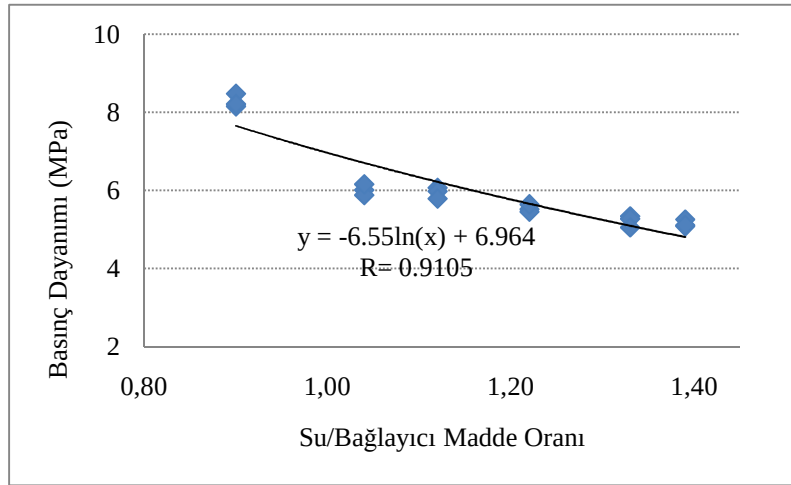
Şekil 10.11. Otojen ve otoklav kürü- 180 günlük basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 10.11’de otojen kürü ile 180 günlük basınç dayanımı arasındaki bağıntının determinasyon katsayısı (R^2) 0.999, korelasyon katsayısı (R) 0.9995’dir. Aynı şekilde otoklav kürü ile 180 günlük basınç dayanımı arasındaki bağıntının determinasyon katsayısı (R^2) 0.999 ve korelasyon katsayısı (R) 0.9995’dir. Korelasyon katsayıları 1 değerine oldukça yakındır.

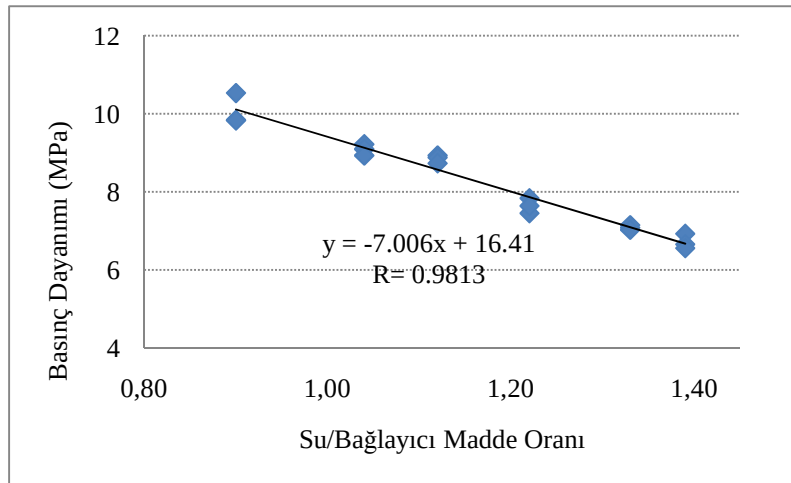
10.4. Su/Bağlayıcı Madde Miktarının Basınç Dayanımına Etkisi

Yapılan deneysel çalışmada farklı miktarda uçucu kül içeren SSB karışımlarının su/bağlayıcı madde miktarı ile 7, 28, 90, 180 günlük ve sıcak su, kaynar su, otojen ve otoklav küründe basınç dayanımı ilişkisi sırasıyla Şekil 10.12., 10.13. 10.14., 10.15., 10.16 ve 10.17’de gösterilmiştir. Denklemlerden elde edilen korelasyon katsayıları (R) ise

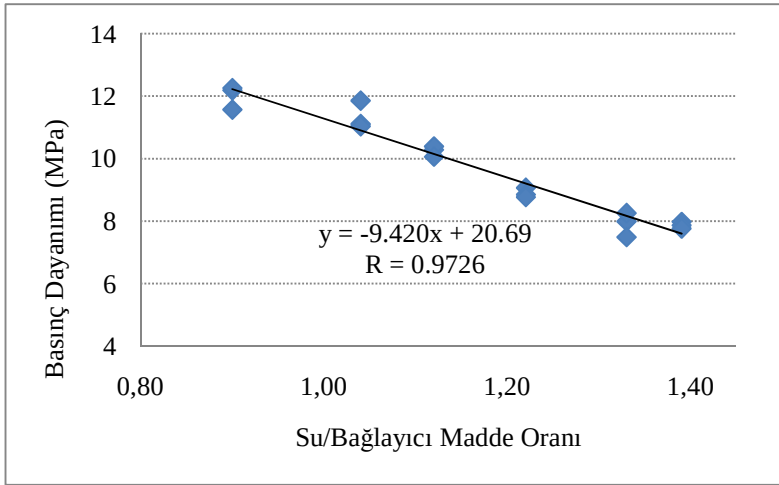
sırasıyla 0.9105, 0.9813, 0.9726, 0.9737, 0.9540, 0.9581, 0.9581, 0.9884'tür. Bu korelasyon katsayılarının (R) 1'e çok yakın olmasından dolayı su/bağlayıcı madde oranı ile basınç dayanımı arasında kuvvetli bir etkisi olduğu görülmüştür.



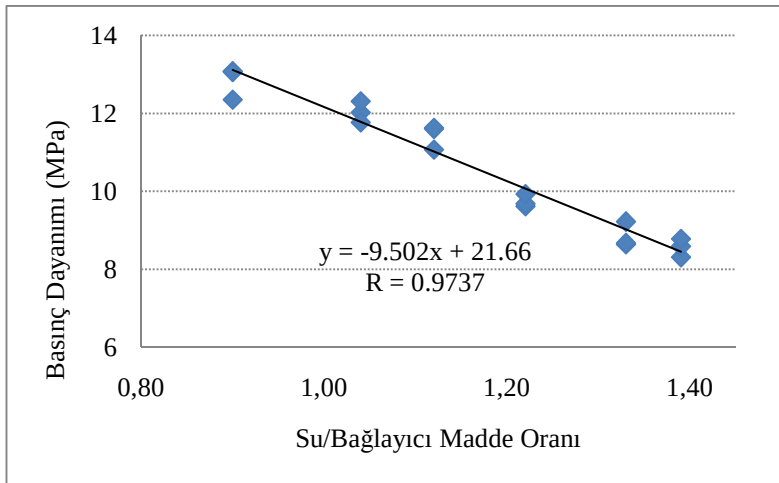
Şekil 10.12. Su/Bağlayıcı madde-7 günlük basınç dayanımı etkisi



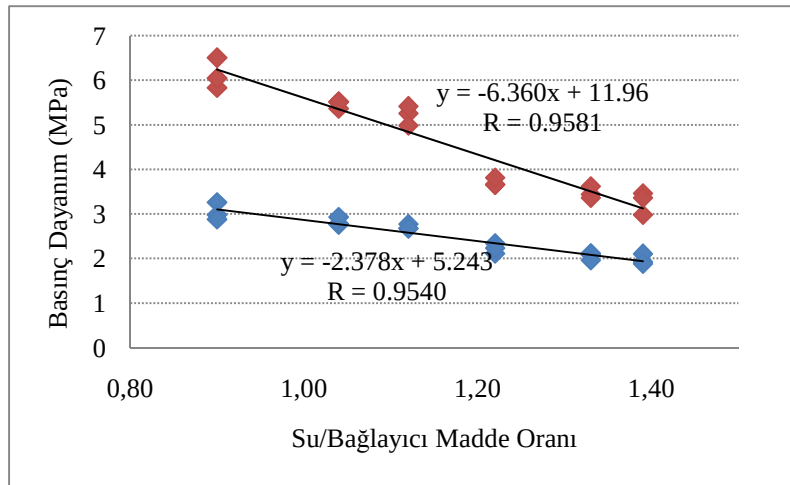
Şekil 10.13. Su/Bağlayıcı madde-28 günlük basınç dayanımı etkisi



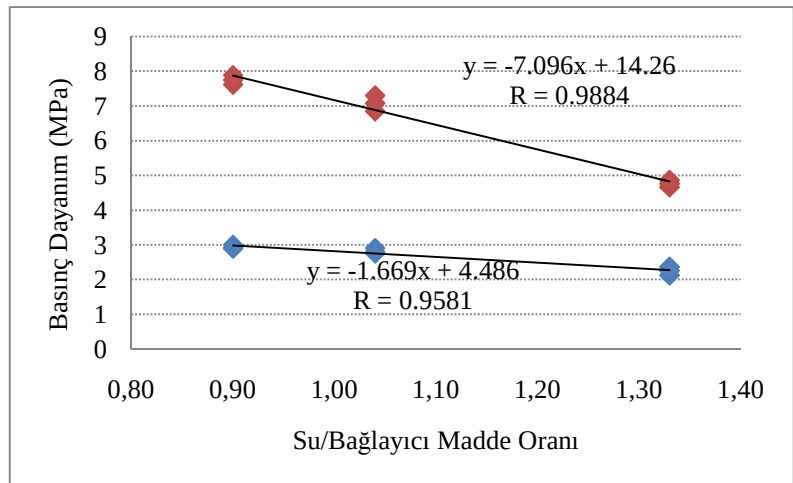
Şekil 10.14. Su/Bağlayıcı madde- 90 günlük basınç dayanımı etkisi



Şekil 10.15. Su/Bağlayıcı madde-180 günlük basınç dayanımı etkisi



Şekil 10.16. Su/Bağlayıcı madde-ılık su ve kaynar su kürü gören SSB'lerin basınç dayanımı etkisi



Şekil 10.17. Su/Bağlayıcı madde oranının otojen ve otoklav kürü gören SSB'lerin basınç dayanımı etkisi

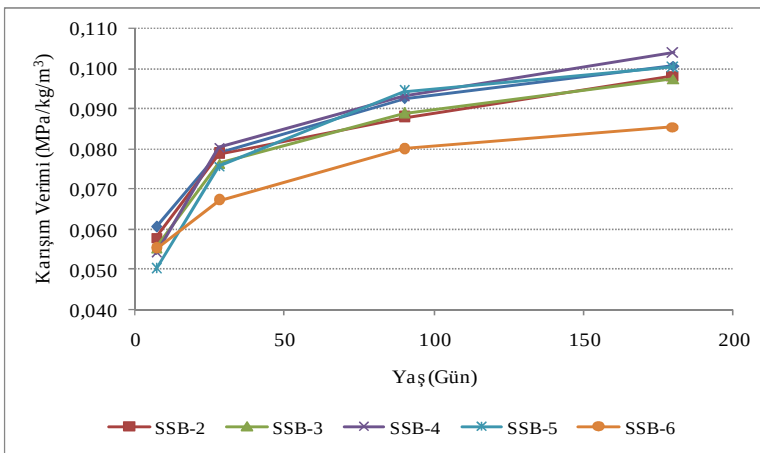
10.5. Karışım Verimleri

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda karışım verimleri hesaplanmıştır. Karışım verimi ortalama basınç dayanımının toplam bağlayıcı madde miktarına bölünmesiyle bulunmuştur (Çizelge 10.10).

Çizelge 10.10. SSB karışımlarına ait karışım verimleri

Numune	Karışım verimleri			
	7 Gün	28 Gün	90 Gün	180 gün
SSB-1	0.061	0.079	0.093	0.101
SSB-2	0.058	0.079	0.088	0.098
SSB-3	0.055	0.076	0.089	0.097
SSB-4	0.054	0.080	0.093	0.104
SSB-5	0.050	0.076	0.094	0.100
SSB-6	0.055	0.067	0.080	0.086

Şekil 10.18’de görüldüğü üzere genel olarak uçucu kül artışı ile karışım veriminin düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 10.18. SSB karışımlarına ait karışım verimi

10.6. Uçucu Külün SSB'nin Su İhtiyacına ve İşlenebilmeye Etkileri

SSB karışımlarının çimento miktarının sabit ve Vebe süresi 48 ± 2 sn alınarak yapılan karışımlarda uçucu kül miktarının artmasıyla karışımın su miktarında artış, su/bağlayıcı madde oranında ise bir azalma gözlenmiştir (Çizelge 10.11). Su miktarının artmasının sebebi toplam bağlayıcı miktarının artmasıdır. Su/bağlayıcı madde oranında ise yüksek oranda bir azalma gözlenmiştir. Bunun sebebi normal betonlarda olduğu gibi SSB karışımına giren uçucu kül; karışımın işlenebilirliğini arttırmaktadır. Bu yüzden sabit bir Vebe değeri için karışımdaki su miktarı azalma göstermektedir.

Çizelge 10.11. SSB karışımları nem oranı ve Vebe süresi

Karışımlar	Vebe süresi (sn)	Çimento miktarı (kg/m ³)	Uçucu kül miktarı (kg/m ³)	Su miktarı (kg/m ³)	Su / Bağlayıcı madde oranı	Su / çimento oranı
SSB-1	48	60	25	118	1.39	1.97
SSB-2	50	60	30	120	1.33	2.00
SSB-3	49	60	40	122	1.22	2.03
SSB-4	47	60	50	123	1.12	2.05
SSB-5	46	60	60	125	1.04	2.08
SSB-6	47	60	90	135	0.90	2.25

11.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında değişik oranlarda uçucu kül kullanılarak hazırlanan SSB karışımlarının üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Kullanılan malzeme ve uygulanan deneyler ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Hazırlanan karışımlarda Vebe değerleri sabit tutulmuştur. Bunun sonucunda; SSB karışımlarının uçucu kül artışıyla su/bağlayıcı madde miktarı azalmıştır.
2. SSB karışımlarının sıkışma yüzdesi %98-100 arasında değişmekte olup zemin yaklaşımı tasarımı kriterlerini sağlamıştır.
3. Zemin yaklaşımıyla yapılan SSB’lerde normal betonda olduğu gibi uçucu kül miktarındaki artışı ile basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Bu etki ileri yaşlarda daha da çarpıcıdır.
4. Ilık su, kaynar su, otojen ve otoklav kür yöntemleriyle kürlenene numunelerin basınç dayanımı kıyaslandığında en yüksek dayanım otoklav yöntemi ile bakımı yapılan numunelerde elde edildiği görülmüştür. Bunu sırasıyla kaynar su, ılık su ve otojen kür yöntemleri takip etmiştir.
5. Standart kür yöntemi ile elde edilen 180 günlük dayanımlar ile hızlandırılmış kür yöntemleri ile bulunan dayanımlar arasında istatistiki ilişki sunulmuştur.
6. Normal betona kıyasla su/bağlayıcı madde miktarının SSB basınç dayanımı üzerinde bir etkisi olduğu görülmüştür.
7. Karışım verimi uçucu kül artışı ile genel olarak bir düşme göstermiştir.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda; özellikle baraj inşaatları için çok gerekli olan SSB tabakaları arasındaki yatay derzlerin kesme dayanımı gibi özellikleri incelenebilir. Ayrıca, değişik santrallerden elde edilen uçucu küllerin dayanıma katkısı araştırılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- ACI Committee 207**, 1988, Roller Compacted Mass Concrete, ACI Materials Journal, 85p.
- ACI 207 5R-99**, 1999, Roller-compacted Mass Concrete. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1, USA 47p.
- Andriolo, F.R.**, 1998, The Use of Roller Compacted Concrete, Oficina de Textos Brasil, 554p.
- Ağar, E. ve Taşdemir, Y.**, 2007, Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar, Türkiye Hazır Beton Birliği, 6s, <http://www.thbb.org/Article.aspx?ID=4>.
- Ağralıoğlu, N.**, 2005, Baraj Planlama ve Tasarımı, Cilt 2, Su Vakfı Yayınları, İstanbul , 259s.
- Andriolo, F.R., Polat, O.**, 2006, Beydağ Barajı Gövde İnşaatında Kullanılacak SSKD Agregası Raporu, İzmir, 17p.
- Andriolo, F.R., Polat, F. ve Polat, O.**, 2006, Beydağ Barajı Gövde İnşaatında Kullanılacak SSKD Karışım Geliştirme Çalışmaları Değerlendirme Raporu, İzmir, 17p.
- Anık, F. ve Alkan, F.**, 2003, Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Barajlar ve Puzolan veya Uçucu Kül Kullanımı, 1. Ulusal Barajlar ve HES Sempozyumu, Ankara, 57-64s.
- ASTM C1170-91**, Standard Test Method for Determining Consistency and Density Of Roller Compacted Concrete Using a Vibrating Table, Annual Book of ASTM Standarts.
- ASTM C494/494M-99a**, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.
- ASTM C618-01**, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM standarts.
- ASTM C666-97**, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM standarts.

KAYNAKLAR (devam)

- ASTM C1040-93 (Reapproved 2000)**, Standard Test Methods for Density of Unhardened and Hardened Concrete, In Place By Nuclear Methods, Annual Book of ASTM standards.
- ASTM D1557-07**, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), Annual Book of ASTM Standards.
- Atiş C.D., Sevim, U.K., Özcan, F., Bilim., C., Karahan, O., Tanrikulu, A.H. and Ekşi, A.**, 2003, Strength Properties of Roller Compacted Concrete Containing a Non-Standard High Calcium Fly ash, Materials Letters, 1446-1450s.
- Atiş, C.D .**, 2005, Strength Properties of High-Volume Fly Ash Roller Compacted and Workable Concrete, and Influence of Curing Condition, Cement and Concrete Research, (35): 1112-1121s.
- Beydağ Barajı Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Malzeme Test Etme ve Karışım Geliştirme Teknik Şartnamesi**, 2006, Devlet Su İşleri (DSİ), 47s.
- Cao C., Sun W. and Qin H.**, 1999, The Analysis of Strength and Fly Ash Effect of Roller-Compacted Concrete with High Volume Fly Ash, Cement and Concrete Research, 30 (2000) 71–75p.
- Delatte, N., Amer, N. And Storey, C.**, 2003, Improved Management of RCC Pavement Technology, University Transportation Center for Alabama (UTCA) Report 01231, 46p.
- Dunstan, M.R.H.**, 1997. “RCC Dams (>15m),” 1997 Yearbook, International Water Power & Dam Construction, Wilmington Business Publishing, Dartford, Kent, UK, 108-115.
- Erdoğan, T.Y.**, 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 741s.
- Gao, P., W, S., Lin., Wu, Z. and Tang, M.**, 2006, The Characteristics of Air Void and Frost Resistance of RCC with Fly Ash and Expansive Agent, Construction and Building Materials, 586-590p.

KAYNAKLAR (devam)

- Gauthier, P. and Marchand J.**, 2005 Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements in Quebec, the Association béton Québec (ABQ), The Cement Association of Canada (CAC), 111p.
- Hansen, K.D. and Reinhardt, W.G.**, 1991, Roller Compacted Concrete Dams, McGraw-Hill, Inc., 298p.
- Mclean, G. and Pierce, S.**, 1988, Comparison of Joint Shear Strengths for Conventional and Roller Compacted Concrete, Proceedings Roller Compacted Concrete II Conference, ASCE, New York, 61-75p.
- Mehta P.K. and Monteiro P.J.M.**, 2006, Concrete Microstructure, Properties, and Materials, Third Editon, McGraw-Hill, 659p.
- Mindness, S., Young J.F. and Darwin D.**, 1981, Concrete, Second Edition, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458, 543p.
- Piggott, R. W.**, 1999, Roller Compacted Concrete Pavements, A Study of Long Term Performance, Portland Cement Concrete – “Research & Development” RP366.01P, 62p.
- Portland Cement Association (PCA)**, 2004, Frost Durabiliy of RCC Pavements, Research and Development Bulletin RD135, d’Expertise en Matériaux Inc, Canada, 140p
- Portland Cement Association (PCA)**, 2006, Production of Roller Compacted Concrete, Pub. IS332, 8p
- Schervish, M. J.** 1996, P-values: What They Are and What They Are Not, American Statistician, 50, 203-206
- TS 639**, 1975, Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 196-1**, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

KAYNAKLAR (devam)

- TS EN 196-2**, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 196-3**, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 197-1**, 2002, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 450**, 1998 Uçucu Kül – Betonda Kullanılan – Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrol, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 451-1**, 2000, Uçucu kül - Deney Metodu - Bölüm 1: Serbest Kalsiyum Oksit Muhtevasının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN12350-3**, 2002, Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 3: Vebe Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- U.S. Department of the Interior BR**, 1987, Guidelines for Designing and Constructing Roller-compacted Concrete Dams, ACER Technical Memorandum no.8, U.S. Deptt. Of Interior, Bureau of Reclamation, USA,86p
- US Army Corps of Engineers (USACE)**, 1995, Roller Compacted Concrete Pavement Design and Construction, Engineer Technical Letter 1110-3-475, Department of the Army, Washington, D.C. Engineer Technical Letter 1110-3-475p
- US Army Corps of Engineers (USACE)**, 2000, Roller Compacted Concrete, Engineer Manual, EM 1110-2-2006, 56p

ÖZGEÇMİŞ

Uğur Sefa HORZUM 01.01.1983 yılında İzmir’de doğdu. İlk okulu Bornova Dokuzeylül İlköğretim Okulunda tamamladı. Orta ve lise eğitimini Karşıyaka Anadolu Lisesi’nde 2001 yılında tamamladı. 2001 yılında başladığı Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümün’den 2005 yılında mezun oldu.

Mart 2006’dan beri İzmir Beydağ Barajı’nda teknik ofis şefi olarak görev yapmaktadır. 2006 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.