

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**UÇUCU KÜL VE POLİPROPİLEN LİF
KULLANIMININ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ
BETONUN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

A.Atacan ÜTE

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 624.05.00

Sunuş Tarihi: 02/06/2008

Tez Danışmanı: Yrd. Doç.Dr. Şemsi YAZICI

Bornova – İZMİR

A.Atacan ÜTE tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak sunulan “ **Uçucu Kül ve Polipropilen Lif Kullanımının Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Özelliklerine Etkisi**” 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 bulmuş ve 02/06/2008 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri :

İmza

Jüri Başkanı : Prof.Dr.Kambiz RAMYAR

Raportör Üye : Yrd.Doç.Dr.Şemsi YAZICI

Üye : Doç.Dr. Selçuk TÜRKEL

ÖZET
UÇUCU KÜL VE POLİPROPİLEN LİF KULLANIMININ
SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ

ÜTE, A.Atacan

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Yrd.Doç.Dr. Şemsi YAZICI

Haziran 2008, 193 sayfa

Bu tez çalışmasında yol kaplamaları için üretilen silindirle sıkıştırılmış betonlarda (SSB), polipropilen lif ve çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül kullanımının SSB özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında; bağlayıcı dozajının ağırlıkça %0, 20, 40 ve 60'ı oranlarında uçucu kül ve betonun hacimce %0, 0.25, 0.50 ve 0.75'i oranlarında polipropilen lif kullanılarak tasarlanan 16 farklı SSB'nin su muhtevaları, zemin yaklaşımı ile belirlenmiştir. İkinci aşamada ise; karışım oranları saptanan SSB'den yeterli sayıda 150/300 mm ayrıtlı silindir ve 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler 20 °C 'de su içerisinde 7, 28 ve 90 gün kür edilmiştir. Kür edilen örnekler üzerinde; tek eksenli basınç, yarmada çekme, eğilme, ultra ses ve darbe testleri gerçekleştirilerek ilgili özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca test edilen örneklerde gerilme-birim şekil değiştirme davranışları da incelenerek üretilen SSB'lerin elastisite modülleri de saptanmıştır.

Çalışma neticesinde, üretilen SSB örneklerinin başarı ile sıkıştırıldığı, uçucu kül ve polipropilen lif eklenmesi ile karışımların su muhtevalarının yükseldiği, birim ağırlık değerlerinin düştüğü görülmüştür. Üretilen SSB'lerde %40 ve %60 oranlarında uçucu kül kullanımı mekanik özellikleri olumsuz etkilemiş, polipropilen lif kullanımı ise, mekanik özellikler ve darbe etkisi açısından önemli bir oranda fayda sağlayamamıştır. Lifler sadece kırılma davranışlarını olumlu etkilemiştir.

Anahtar Sözcükler: Uçucu kül, polipropilen lif, silindirle sıkıştırılmış beton, mekanik özellikler.

ABSTRACT

**EFFECTS OF FLY-ASH AND POLYPROPYLENE FIBERS ON
THE PROPERTIES OF ROLLER COMPACTED CONCRETE**

UTE, A. Atacan

MSc in Civil Eng.

Supervisor: Yrd.Doç. Dr. Şemsi YAZICI

June 2008, 193 pages

In this thesis, effects of fly-ash and polypropylene fibers on the properties of roller compacted concrete (RCC) designed for highway pavement application were investigated.

In the first part of the study; water contents of 16 different RCC mixtures, containing 0, 20, 40 and 60% fly-ash by mass of binder material and 0, 0.25, 0.50 and 0.75% the polypropylene fibers by volume of concrete, were obtained by geotechnical method. In the second part of the study; 150/300 mm cylindrical specimens and 100/100/600 mm prismatic specimens were prepared. Specimens were cured at 20 °C in water for 7, 28 and 90 days. Uniaxial compression, splitting tensile strength, flexural strength, pulse velocity and impact tests were performed on the cured specimens and related properties were determined. Besides, stress-strain behaviour of the tested specimens were investigated to determine the modulus of elasticity of RCC mixtures.

It was observed that RCC specimens were compacted successfully, water contents of the specimens were increased and unit weight values were decreased with the addition of fly ash and polypropylene fibre. The use of 40% and 60% fly-ash for RCC mixtures influenced some of the mechanical properties adversely. However, polypropylene fibre has no significant effect on the mechanical and impact properties of RCC mixtures. Fibres only influenced fractural mechanism positively.

Keywords: Fly ash, mechanical properties, polypropylene fiber, roller compacted concrete.

TEŞEKKÜR

Yapı malzemesini bana sevdiren, yüksek lisans eğitimi boyunca bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşan değerli hocamız Sn. Prof.Dr. Kambiz RAMYAR'a,

Deneysel çalışmada kullanılan polipropilen lif malzemesinin temininde ve nakliyesinde yardımlarını esirgemeyen Sn. İnş.Müh. Murat ERBAŞ'a,

Deneysel çalışmada kullanılan çimento ve uçucu külün temininde ve nakliyesinde yardımlarını esirgemeyen Muhlis ALPER İnşaat'a,

Deneysel çalışmada sıkıştırma işlemleri için kullanılan beton kırıcının temininde yardımlarını esirgemeyen Sn. Murat SUÇSUZ'a,

Deneysel çalışmada yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım İnş.Müh.Kasım KASIM, İnş.Müh.İmdat ZEYNEL ve Ar.Gör.Cihat YÜKSEL'e,

Beni yüksek lisans yapmaya teşvik eden ve sonsuz destek sağlayan değerli mesai arkadaşım Dz.Dr.İNŞ.Y.Müh.Bnb.Gürkan ÖRER'e,

Tez aşamasında akademik katkılarıyla desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Sn. Yrd.Doç.Dr. Özge ANDIÇ ÇAKIR ve Sn. Yrd.Doç.Dr. Gözde İNAN'a,

Tez konusunun seçimi ve denemelerin yönlendirilmesinde yol gösteren ve tezin başından sonuna kadar hiçbir zaman desteğini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Sn. Yrd.Doç.Dr.Şemsi YAZICI'ya,

Ayrıca çalışmalarım sırasında, sayısız fedakârlıklarıyla desteğini esirgemeyen değerli eşim Tuba BEDEZ ÜTE'ye ve beni bu günlere getiren sevgili AİLEME sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	V
ABSTRACT	VII
TEŞEKKÜR	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XV
ÇİZELGELER DİZİNİ	XXIII
KISALTMALAR DİZİNİ	XXVII
 1. GİRİŞ	 1
2. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KAPLAMALAR	4
2.1. SSB Üretiminde Kullanılan Malzemeler	7
2.1.1. Agrega	7
2.1.2. Bağlayıcılar	11
2.1.2.1. Çimento	12
2.1.2.2. Puzolanlar ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu	12
2.1.2.3. Uçucu kül	14
2.1.2.4. Granüle yüksek fırın cürufu	18
2.1.2.5. Silis dumanı	20
2.1.3. Su	21
2.1.4. Kimyasal katkıları	21
2.2. SSB Karışım Oranları	23
2.2.1. Optimal hamur hacmi metodu	24
2.2.2. Katı askı modeli	24
2.2.3. Zemin sıkıştırma metodu	25

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.2.4. Beton kıvam test metodu.....	28
2.3. Numune Alınması	29
3. TAZE VE SERTLEŞMİŞ SSB ÖZELLİKLERİ	34
3.1. Taze SSB Özellikleri.....	34
3.1.1. İşlenebilirlik	34
3.1.2. Birim ağırlık	37
3.1.3. Hava içeriği	40
3.1.4. Segregasyon	40
3.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri	41
3.2.1. Mekanik özellikler	41
3.2.1.1. Basınç dayanımı	42
3.2.1.2. Eğilme dayanımı	48
3.2.1.3. Çekme dayanımı.....	51
3.2.1.4. Elastisite modülü.....	52
3.2.1.5. Büzülme	53
3.2.1.6. Yorulma davranışı.....	54
3.2.2. Durabilite.....	56
3.2.2.1. SSB'nin yüzey özellikleri	60
4. POLİPROPİLEN LİFLERİN BETONDA KULLANIMI	76
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	81
5.1. Amaç	81
5.2. Kapsam.....	81
5.2.1. Çimento.....	82
5.2.2. Uçucu kül	83

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2.3. Agregat.....	84
5.2.4. Su	86
5.2.5. Polipropilen lif	86
5.2.6. Silindire sıkıştırılmış beton karışımlarının hazırlanması	87
5.2.6.1. Optimum su muhtevasının belirlenmesi	88
5.2.6.2. SSB karışımlarının hazırlanması ve üretilmesi	100
5.2.7. Yapılan deneyler	105
6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	110
6.1. Optimum Su Muhtevası, Maksimum Birim Ağırlık ve Sıkışma Yüzdesi Sonuçları	110
6.2. Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	114
6.3. Silindir Yarma Deneyi Sonuçları.....	131
6.4. Eğilme Dayanımı Sonuçları	142
6.5. Ultrases Dalga Hızı Ölçümü Sonuçları	148
6.6. Elastisite Modülü Sonuçları	152
6.7. Darbe Deneyi Sonuçları	160
6.8. Dayanım Özellikleri Arasındaki İlişkiler.....	165
6.9. Maliyet Analizi Sonuçları	170
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	175
KAYNAKLAR DİZİNİ	183
ÖZGEÇMİŞ	193

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 SSB'nin taşınması ve yerleştirilmesi	5
2.2 Kaplama maliyetlerinin karşılaştırılması (Ağar vd., 2002).	6
2.3 Uçucu küle ait SEM fotoğrafı, (Gauthier and Marchand, 2005) ...	18
2.4 Yüksek fırın cürufuna ait SEM fotoğrafı (Gauthier and Marchand, 2005)	19
2.5 Silis dumanına ait SEM fotoğrafı, (Hassani ve Saghafi, 2006).	20
2.6 SSB karışımları için tipik su muhtevası – kuru birim ağırlık eğrisi.....	26
2.7 Su muhtevası ve sıkıştırma enerjisinin kuru birim ağırlık üzerine etkisi.....	27
2.8 SSB için optimum harç parametreleri, (Gauthier and Marchand, 2005).	29
2.9 Titreşimli tokmak ile silindir numune hazırlanması, (a) Titreşimli tokmak, (b) Titreşimli tokmak ile numunenin sıkıştırılması	32
2.10 Sıkıştırma öncesi ve sıkıştırma sonrası durum.....	33
3.1 Vebe kıvam aparatı ve modifiye Vebe aparatı (Delatte et.al., 2003).....	36
3.2 SSB karışımının sıkışma eğrisi (PCA, 2004).....	38
3.3 Nükleer ölçüm aleti.....	39
3.4 Çimento içeriği ile basınç dayanımı ilişkisi, (USACE, 2000).	43
3.5 Basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı ilişkisi (Koçak, 1998)	44
3.6 İnce malzeme içeriğinin betonun basınç dayanımına etkisi (PCA, 2004)	45
3.7 Bağlayıcı tip ve miktarının SSB'nin basınç dayanımına etkisi (PCA, 2004)	46
3.8 Uçucu kül içeriğinin SSB'nin basınç dayanımına etkisi.....	47
3.9 SSB ve geleneksel beton karışımlarına ait eğilme dayanımları.....	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.10 Üçte bir noktalarından yüklenmiş kiriş eğilmede çekme deney düzeneği, (Çivici ve Eren, 2004).....	50
3.11 Uçucu kül içeriğinin SSB'nin eğilme dayanımı üzerinde etkisi	51
3.12 Farklı tip çimento ve S/B oranlarındaki SSB karışımlarına ait elastisite modülleri	53
3.13 SSB için yorulma ilişkisi (PCA, 1987)	55
3.14 Kompaksiyon boşluklarının optik mikroskop görünüşleri (a) SSB için, (b) Geleneksel beton için (Gao et.al., 2006)	57
3.15 Durabilite faktörü ile boşluklar arası mesafe faktörü ilişkisi (PCA, 2004)	58
3.16 Sıkışmış SSB numunesinin üst yüzeyine ait bir görünüş.....	60
4.1 Polipropilen lifler	76
4.2 Yüksek sıcaklıklarda eriyen polipropilen liflerin oluşturduğu boşluklardan buharın dışarı çıkması (Walraven, 1999).	80
5.1 Deneysel çalışmada kullanılan agrega gradasyon eğrisi ve limitleri	88
5.2 İlave halka ve çelik bastırma plakası	89
5.3 Çelik bastırma plakasına ait kesit ve görünüş	90
5.4 Kontrol karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	92
5.5 0.25 PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	92
5.6 0.50PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	93
5.7 0.75PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	93

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.8 20UK karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi.....	94
5.9 20UK0.25PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	94
5.10 20UK0.50PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	95
5.11 20UK0.75PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	95
5.12 40UK karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi.....	96
5.13 40UK0.25PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	96
5.14 40UK0.50PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	97
5.15 40UK0.75PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	97
5.16 60UK karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi.....	98
5.17 60UK0.25PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	98
5.18 60UK0.50PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	99
5.19 60UK0.75PL karışımına ait optimum su muhtevası - maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi	99
5.20 Kontrol ve %0.75 polipropilen lifli karışımların kıvamı	102
5.21 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik numune elde etmek için sıkıştırma işlemi (sağdan sola 1 pas geçiş)	103
5.22 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik numune elde etmek için sıkıştırma işleminde kullanılan çelik bastırma plakası detayı.....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.23 150/300 mm ayrıtlı silindir numunelerde tek taraflı kükürt başlık	105
5.24 Darbe deneyi (a) Deney test aparatı, (b) Numunenin nihai kırılmadaki durumu	107
5.25 Darbe deneyinin şematik diyagramı (Nataraja et. al., 2005).....	107
5.26 Darbe deneyi test düzeneğinin planı (Nataraja et. al., 2005)	108
5.27 Darbe deneyi test aletinin A-A kesiti (Nataraja et. al., 2005).....	108
5.28 Deneysel çalışmada ultrases dalga hızı ölçüm şekli	109
6.1 Uçucu kül ve polipropilen lif miktarı ile optimum su muhtevası ilişkisi	112
6.2 Maksimum kuru birim ağırlık - optimum su muhtevası ilişkisi...	113
6.3 Deneysel çalışmada elde edilen 7günlük ortalama basınç dayanımı değerleri.....	115
6.4 Deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri.....	116
6.5 Deneysel çalışmada elde edilen 90 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri.....	117
6.6 Kontrol karışımlarında çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi	119
6.7 %0.25 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi	119
6.8 %0.50 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi	120
6.9 %0.75 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi	120

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.10 Kontrol karışımlarında farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi	121
6.11 %20 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi.....	121
6.12 %40 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi.....	122
6.13 %60 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi.....	122
6.14 SSB numunelerine ait 7, 28 ve 90 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımı değerleri ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki.....	124
6.15 Uçucu küllü ve lifli SSB numunelerine ait deneysel çalışmada elde edilen 7 günlük basınç dayanımı değerleri ile tahmin edilen basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki	129
6.16 Uçucu küllü ve lifli SSB numunelerine ait deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri ile tahmin edilen basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki	130
6.17 Uçucu küllü ve lifli SSB numunelerine ait deneysel çalışmada elde edilen 90 günlük basınç dayanımı değerleri ile tahmin edilen basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki	130
6.18 Deneysel çalışmada elde edilen 7 günlük ortalama silindir yarma dayanımları	133
6.19 Karışımların 28 günlük ortalama yarmada çekme dayanım değerleri	134
6.20 Karışımların 90 günlük ortalama yarmada çekme dayanım değerleri	135
6.21 Kontrol karışımlarında çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi.....	137

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.22 %0.25 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi	137
6.23 %0.50 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi	138
6.24 %0.75 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi	138
6.25 Kontrol karışımlarında farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi	139
6.26 %20 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi	139
6.27 %40 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi	140
6.28 %60 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi	140
6.29 Yarmada çekme deneyinde polipropilen lifsiz ve polipropilen lifli 150/300 mm ayrıtlı silindir örneklerin kırılma davranış fotoğrafları (a) lifsiz örnek, (b) lifli örnek.....	141
6.30 Karışımların 28 günlük ortalama eğilme dayanımı değerleri	144
6.31 Eğilme deneyinde polipropilen lifsiz ve polipropilen lifli 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örneklerin kırılma davranış fotoğrafları (a) lifsiz örnek, (b-c) lifli örnek	145
6.32 Uçucu küllü karışımlara ait ortalama eğilme dayanım değerleri ile tahmin edilen eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki	147

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.33 Karışımlara ait ortalama eğilme dayanım değerleri ile tahmin edilen eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki	147
6.34 Karışımlara ait ortalama ultrases dalga hızı değerleri ile polipropilen lif oranı arasındaki ilişki.....	149
6.35 Karışımların ultrases dalga hızları ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki	151
6.36 Karışımların ultrases dalga hızları ile 28 günlük basınç dayanımları arasındaki ilişki	151
6.37 Karışımların ultrases dalga hızları ile maksimum kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişki	152
6.38 Hesaplanan elastisite modülleri ile dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki	155
6.39 Lifli ve lifsiz karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı – birim kısıalma eğrileri.....	156
6.40 %20 uçucu küllü karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı - birim kısıalma eğrileri.....	156
6.41 %40 uçucu küllü karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı - birim kısıalma eğrileri.....	157
6.42 %60 uçucu küllü karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı - birim kısıalma eğrileri.....	157
6.43 Farklı oranlarda uçucu kül içeren karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı - birim kısıalma eğrileri.....	158
6.44 Kontrol ve uçucu küllü karışımların lif oranına bağlı olarak 28 günlük elastisite modülleri.....	159
6.45 Kontrol ve polipropilen lifli karışımların uçucu kül oranına bağlı olarak 28 günlük elastisite modülleri.....	160
6.46 Uçucu kül ve polipropilen lif miktarına bağlı olarak ilk çatlak oluşturan darbe sayıları	162

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.47 Uçucu kül ve polipropilen lif miktarına bağlı olarak kırılma oluşturan darbe sayıları	163
6.48 Darbede kırılma tokluğu ile basınçta kırılma tokluğu ilişkisi	164
6.49 7, 28 ve 90 günlük silindir dayanımları ile basınç dayanımları ilişkisi	167
6.50 28 günlük eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi	168
6.51 28 günlük eğilmede çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı ilişkisi	169
6.52 SSB yol kaplaması inşaatında kullanılan iş makineleri	171

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 1 m ³ SSB yol kaplaması için karışım dizayn örnekleri, (USACE, 1995).....	7
2.2 Agregada gradasyon limitleri (PCA, 2006).....	9
2.3 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Aruntaş, 2006).	14
2.4 ASTM C618'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması	15
2.5 Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları (Erdoğan, 2003)	16
2.6 Türkiye'deki bazı UK'lerin kimyasal kompozisyonları, (Aruntaş, 2006)	17
3.1 SSB ve geleneksel beton karışımlarının kıyaslanması.....	43
3.2 Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan SSB karışımının basınç dayanımına agrega tipinin etkisi (Gauthier and Marchand, 2005)	45
3.3 Şekil 3.8'de gösterilen karışımların bağlayıcı dozajları	47
3.4 SSB yorulma dizaynında kullanılan gerilme oranları ve müsaade edilebilir yük tekrarları (PCA, 1987)	55
5.1 Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri	82
5.2 Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	83
5.3 Deneysel çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri ile dayanım aktivite indeksi değerleri	84
5.4 İnce agreganın (0/5 mm) elek analizi sonucu	85
5.5 Kaba agreganın (5-15 mm) elek analizi sonucu	85
5.6 Kaba agreganın (15-25 mm) elek analizi sonucu	85
5.7 Deneysel çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri...	86
5.8 Deneysel çalışmada kullanılan polipropilen lifin teknik özellikleri	87

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.9 Deneysel çalışmada SSB'nin sıkıştırılmasında kullanılan Bosch GSH 11 E tipi titreşimli tokmağın teknik özellikleri	89
5.10 Deneysel çalışmada üretilen SSB karışımlarının isimlendirilmesi ve bağlayıcı malzeme ile polipropilen lif kompozisyonları	91
5.11 SSB karışımlarının su miktarları	100
6.1 SSB karışımlarına ait optimum su muhtevası, maksimum birim ağırlık ve sıkışma yüzdesi değerleri	111
6.2 SSB karışımlarına ait deneysel çalışmada elde edilen 7, 28 ve 90 günlük ortalama basınç dayanım değerleri	114
6.3 Uçucu küllü SSB karışımlarına ait 7, 28 ve 90 günlük tahmini basınç dayanım değerleri, (Nipatsat ve Tangtermsirikul, 2000)	126
6.5 SSB karışımlarına ait deneysel çalışmada elde edilen 7, 28 ve 90 günlük ortalama silindir yarma dayanımları, f_{ctk} , (MPa)	131
6.6 SSB karışımlarının 28 günlük ortalama eğilme dayanımı değerleri	142
6.7 28 günlük örneklerle ait ultrases dalga hızı ölçümü sonuçları ...	148
6.8 Ultrases hız ölçümü değerleri ile beton kalitesinin değerlendirilme kriterleri	149
6.9 28 günlük 150/300 mm ayrıtlı silindir numuneler üzerinde yapılan elastisite modülü deney sonuçları, dinamik elastisite modülleri ve tokluk değerleri	153
6.10 28 günlük numuneler üzerinde yapılan darbe deneyinde ilk çatlak oluşturan ve kırılma oluşturan darbe sayıları ile tokluk değerleri	161
6.11 2007 Bayındırlık birim fiyatları ile deneysel çalışmada üretilen SSB'lerin maliyeti ile SSB dayanımlarına karşılık gelen hazır betonların maliyetinin karşılaştırılması	170
6.12 0.75 PL karışımına ait 2007 BBF ile oluşturulmuş SSB fiyat analizi	172

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.13 40UK karışımına ait 2007 BBF ile oluşturulmuş SSB fiyat analizi	173

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
BHA	Birim hacim ağırlık
DYK	Doygun yüzey kuru
g	Gram
HES	Hidroelektrik santral
L	Litre
PCA	Portland cement association
PL	Polipropilen lif
SD	Silis dumanı
SR	Gerilme oranı
SSB	Silindirle sıkıştırılmış beton
S/B	Su/bağlayıcı malzeme oranı
UK	Uçucu kül
USACE	US Army Corps of Engineers
Kontrol	Uçucu kül ve polipropilen lif içermeyen SSB karışımı
0.25PL	Hacimce %0.25 oranında polipropilen lif içeren SSB karışımı
0.50PL	Hacimce %0.50 oranında polipropilen lif içeren SSB karışımı
0.75PL	Hacimce %0.75 oranında polipropilen lif içeren SSB karışımı
20UK	Çimento yerine ağırlıkça %20 oranında uçucu kül kullanılan SSB karışımı
20UK0.25PL	Çimento yerine ağırlıkça %20 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.25 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
20UK0.50PL	Çimento yerine ağırlıkça %20 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.50 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı
20UK0.75PL	Çimento yerine ağırlıkça %20 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.75 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı
40UK	Çimento yerine ağırlıkça %40 oranında uçucu kül kullanılan SSB karışımı
40UK0.25PL	Çimento yerine ağırlıkça %40 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.25 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı
40UK0.50PL	Çimento yerine ağırlıkça %40 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.50 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı
40UK0.75PL	Çimento yerine ağırlıkça %40 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.75 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı
60UK	Çimento yerine ağırlıkça %60 oranında uçucu kül kullanılan SSB karışımı
60UK0.25PL	Çimento yerine ağırlıkça %60 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.25 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı
60UK0.50PL	Çimento yerine ağırlıkça %60 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.50 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı
60UK0.75PL	Çimento yerine ağırlıkça %60 oranında uçucu kül kullanılan ve karışıma hacimce %0.75 oranında polipropilen lif katılan SSB karışımı

1. GİRİŞ

Günümüzde kullanımda ortaya çıkan ihtiyaçlar nedeni ile çeşitli özellikleri geliştirilmiş veya üretim ve uygulama teknikleri farklı bazı özel betonlar yaygın biçimde kullanılmaktadır. Üretilen betonların kullanım amacına yönelik olarak tasarımının yapılması ve ekonomik olması çok önemlidir. Yol kaplamalarında ve barajlarda kullanılan silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), dayanıklılığı, ekonomikliğı ve hızlı yerleştirme tekniğı ile son zamanlarda tüm dünyanın ilgisini çekmiş özel bir beton türüdür.

Yol kaplaması ve beton ağırlık barajlarının yapımında başarı ile kullanılmış olan silindirle sıkıştırılabilen beton bu kullanımların dışında çok geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bu uygulama alanlarından bazıları, normal yollar, fabrika içi yollar, yapım için kullanılacak geçici yollar, park alanları, servis alanları, depo alanları, malzeme stok alanları, havaalanı pist ve ulaştırma yolları, ağır trafikle yüklü yollar ve otoyolların temel ve kaplama tabakalarıdır (Atiş, 2001).

1970’li yıllardaki petrol krizi nedeniyle bitümlü bağlayıcı fiyatlarının yükselmesi, SSB kaplamalarının gündeme gelmesini sağlamıştır. SSB kaplamaların bilinen ilk modern örneğı 1970 yılında, İspanya’da, düşük hacimli trafiğı sahip olan bir yolda uygulanmıştır. Ağır trafik taşıyan diğeri bir SSB kaplama uygulaması da 1976 yılında Kanada’da yapılmıştır. 1980 yılından sonra, Fransa, Almanya, Norveç, İsveç, Finlandiya, Danimarka, Almanya, Avusturya, Arjantin ve Japonya gibi ülkelerin her birinde 100000 m² den fazla SSB inşa edilirken, Şili, Uruguay, Meksika, Kolombiya, Ekvator ve Güney Afrika gibi ülkelerde

çok az veya deneme yolu olarak kullanılmıştır. Uygulanan SSB miktarı 1990 yılının sonunda toplam 12000000 m²,yi aşmış olup SSB uygulamasının yarısı İspanya'da yapılmıştır. Otoyollarda kullanılan 1500000 m² SSB üzerine, yüzey düzgünlüğü sağlamak için beton asfalt aşınma tabakası yerleştirilmiştir. Geriye kalan 10500000 m² SSB kaplama, ikinci sınıf yol, sanayi ve askeri alanlar gibi düşük hızlı trafiğin olduğu yerlerde kullanılmıştır. Bu kadar geniş alanda kullanılması, özel bir ekipmana ihtiyaç duyulmamasından ve beton asfalt kaplamaların yapıldığı makinelerle inşa edilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte; yapım kolaylığı, çalışan eleman sayısını azaltması ve yüksek üretim hızı ve bunlara bağlı olarak maliyetinin düşmesi de büyük oranda kullanılmasının nedenleri olarak sıralanabilir. Ayrıca, SSB kaplamalar, geleneksel beton kaplamalara göre daha kısa bir sürede trafiğe açılabilmektedir (Ağar ve Taşdemir, 2007).

Türkiye'de ise ilk olarak Karakaya Barajı memba batardosunda uygulanan SSB daha sonra Atatürk, Sır, Berke ve Kürtün barajlarının belirli yapılarında uygulanmıştır. Ayrıca Çindere Barajı ve HES, Çine Barajı ve HES gövde yapıları da SSB olarak projelendirilmiştir (Çakmakoglu, 2002).

Türkiye petrolde dışa bağımlı bir ülke olmasına karşılık çimento sanayi çok gelişmiştir. Bir petrol ürünü olan asfalt çimentosu kullanılarak yapılan kaplamalar yerine SSB kaplama kullanımına başlanması ile daha ekonomik ve uzun ömürlü yollar inşa edilmeye başlanabilecektir. SSB karışımının gelişmiş ülkelerde olduğu gibi hazır beton üreticilerinden alınmasıyla, kaliteli bir kaplama elde edilebilecektir (Taşdemir et.al., 2002).

Bu çalışmada, değişik oranlarda polipropilen lif ve uçucu kül kullanımının SSB'nin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında, tasarımı yapılan lifli ve lifsiz 16 SSB karışımının geoteknik metotla maksimum kuru birim ağırlığına karşılık gelen optimum su muhtevaları tayin edilmiştir. Tayin edilen optimum su muhtevası değerleri çalışmanın birinci aşamasında üretilen lifli ve lifsiz SSB'lerde karışım suyu olarak dikkate alınmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, üretilen lifli ve lifsiz SSB'lerden hazırlanan silindir/prizmatik örnekler üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Testler için hazırlanan örnekler standart koşullarda suda kr edilmiştir. Basıncı ve yarmada çekme deneyleri 7, 28 ve 90 günlük 150/300 mm ayrıtlı silindirlerde, eğilme deneyi 28 günlük 100/100/600 mm ayrıtlı prizmalarda, ultra ses deneyleri 100/100/600 mm ayrıtlı prizmalarda 28 gün sonunda, darbe testleri 150/300 mm ayrıtlı silindir örneklerden kesilen 150/64 mm ayrıtlı diskler üzerinde 28 gün sonunda uygulanmıştır. Ayrıca lifli ve lifsiz SSB'lerde elastisite modülü ölçümleri 28 günlük 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde yapılmıştır.

2. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KAPLAMALAR

Silindirle sıkıştırılmış beton, normal betona göre su içeriği az ve işlenebilirliği yok denecek (sıfır çökme) düzeyde olan ve taze durumda iken normal betondan çok zemin dolgu malzemesi gibi, katılaştığında ise normal beton gibi davranan bir malzemedir. Hansen'e (1996) göre SSB yeni bir malzemedir çok yeni bir yapım yöntemidir (Atış, 2001).

Geleneksel beton kaplamalara göre daha düşük su/bağlayıcı oranına sahip olan SSB kaplamalar, bitümlü kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınabilmekte, serilebilmekte ve sıkıştırılabilmektedir (Şekil 2.1). SSB karışımları, hem kesikli hem de sürekli karıştırma tesislerinde üretilmektedir. Malzemeler için ağırlık kontrolüne sahip olan sürekli karışım tesisleri, kolayca taşınabilmekte ve kurulabilmekte olduğundan ve kesikli karışım tesislerine göre birim zamanda daha fazla üretim sağlayabildiğinden en çok kullanılan ve önerilen tesistir. SSB, tesisten uygulama alanına damperli kamyon ile taşınmakta olup beton, kamyonun sericiye doğrudan dökülmektedir. SSB karışımları, istenilen kotta serim yapabilecek şekilde hassas cihazlarla donatılmış kaplama makineleri ile serilmektedir. Titreşimli master ve en az bir tokmağa sahip olan geliştirilmiş beton asfalt sericisi ile kabul edilir performans elde edilmiştir. Bu serici ön sıkıştırma yaptığı için, yolun yüzey düzgünlüğünü artırmaktadır. Serme işleminde tabaka kalınlığı kontrolünün doğru şekilde yapılabilmesi için, otomatik master kullanılmaktadır. İlk sıkıştırma 10 ton ağırlığa sahip çift tamburlu titreşimli silindir ile en az dört geçiş ile yapılmaktadır. İlk sıkıştırma ardından 20-30 tonluk lastik tekerlekli silindir ile iki veya daha fazla

geçiş yapılmaktadır. Lastik tekerlekli silindir ile yapılan sıkıştırma sayesinde titreşimli sıkıştırma sonrasında ortaya çıkan kusurlar ve küçük boşluklar kapatılmaktadır. SSB’de belirlenen yoğunluğu elde edecek kadar yeterli sıkıştırma yapılmadığında, kaplamanın dayanımı düşük olacaktır. Enine derzler, iklim koşullarına ve SSB’nin dayanımına bağlı olarak birkaç saat ile birkaç gün arasında kesilmektedir. Fransa, Almanya ve İspanya’da, kaplama tam olarak kurumadan kesilerek derzler yapılmaktadır. Her beton türü gibi SSB kaplamanın performansı için de çok önemli olan kür işlemi su püskürtülerek veya ıslak bezle yapılabilmekte olup genellikle sulama boruları ve su püskürtme başlıkları ile yapılmaktadır. Yetersiz kür işlemi sonunda, zayıf aşınma tabakaları elde edilmektedir (Ağar ve Taşdemir, 2007).

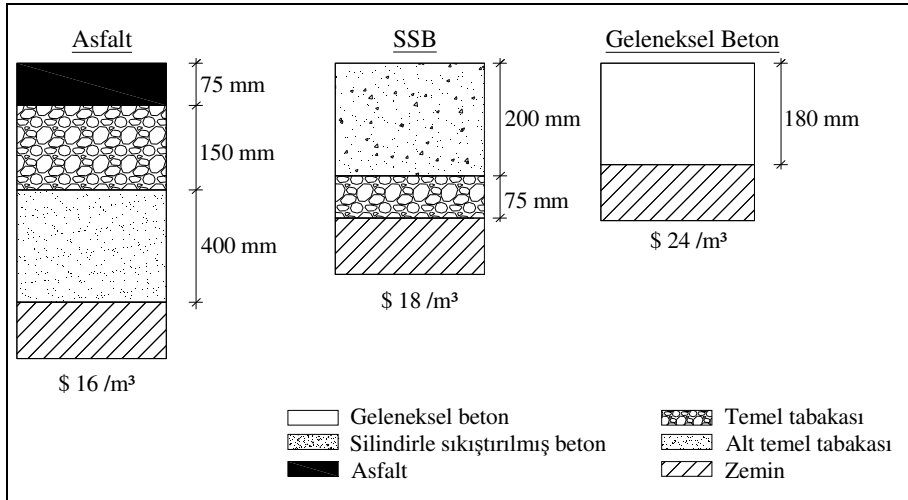


Şekil 2.1. SSB’nin taşınması ve yerleştirilmesi

SSB ismini, kaplamanın yapım yönteminden almaktadır. Bu yapım tekniği kullanılarak, büyük miktarda beton, donatısız olarak yerleştirilmektedir. SSB kaplamaların maliyeti, geleneksel beton

kaplamalardan %10 ile %30 arasında daha düşüktür. SSB kaplamalar; genellikle düşük hızlı ağır trafiğe sahip olan yol kesimleri ile havaalanı pist ve taksi yolları gibi mukavemet, dayanıklılık ve ekonominin çok önemli olduğu yerlerde kullanılmaktadır (Ağar ve Taşdemir, 2007).

ERES Danışmanlık Şirketinin hazırladığı bir raporda, beton asfalt kaplamadan beklenen servis ömrünün 17 yıl, bir beton kaplamadan beklenen servis ömrünün ise 34 yıl olduğu açıklanmıştır. Bu raporda, beton asfalt kaplamaların her 3-5 yılda bir bakım gerektirdiği ve başlangıçtan 17 yıl sonra sık sık büyük onarımlara ihtiyaç duyduğu, beton kaplamalarda ise servise açıldıktan 12 yıl sonra küçük bakımların gerektiği ve 18 yıl sonra da beton yüzeyinin yenilendiği belirtilmektedir. Bu yüzden, bakım ve onarım nedeniyle oluşan masraflar ve gecikmeler azalacak ekonomiye katkı sağlanacaktır (Ağar ve Taşdemir, 2007).



Şekil 2.2. Kaplama maliyetlerinin karşılaştırılması (Ağar vd., 2002).

Beton asfalt kaplama, geleneksel beton kaplama ve SSB kaplamalarının ilk yapım maliyetleri Şekil 2.2’de karşılaştırılmıştır. Beton asfalt kaplamanın ilk maliyeti düşük görünmesine rağmen beton kaplamaya göre daha sık bakım gerektirmesi toplam maliyetini artıracaktır (Taşdemir et.al., 2002).

2.1. SSB Üretiminde Kullanılan Malzemeler

SSB yol kaplamalarında, geleneksel betonlarda kullanılan kaba ve ince agregalar, çimento, uçucu kül, katkı maddeleri ve su kullanılmaktadır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.20 ile 0.40 arasında olmaktadır (Ragan, 1988; Taşdemir et al.’dan, 2002).

US Army Corps of Engineers [USACE] (1995), tarafından pek çok SSB yol kaplamalarında kullanılmış olan karışım dizaynları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Delatte et al., 2003).

Çizelge 2.1. 1 m³ SSB yol kaplaması için karışım dizayn örnekleri, (USACE, 1995)

Yer	Tip-1 çimento (kg)	Uçucu kül (kg)	Su (kg)	S/B oranı	Kaba agrega (kg)	İnce agrega (kg)	Çimento % si (ağırlıkça)	Su % si (ağırlıkça)
Austin, TX	154	154	108	0.35	955	955	6.6	4.6
Ft. Campbell, KY	237	126	122	0.34	1059	869	9.8	5.0
Ft. Drum, NY	267	89	125	0.35	1377	586	10.9	5.1
Spring Hill, TN	237	89	114	0.35	1121	920	9.6	4.6
Ft. Hood, TX	174	87	104	0.40	1190	990	6.8	4.1

2.1.1. Agregalar

Diğer beton türlerinde olduğu gibi, SSB’nin ekonomikliğini ve kalitesini belirlemedeki en önemli faktörlerden biri, uygun agregalar kaynağının seçilmesidir. Agregalar SSB kaplama karışımlarının hacminin

%70-80'ini oluşturduğundan, taze ve sertleşmiş beton özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Ragan, 1988; Taşdemir et al.'dan, 2002).

Kaba agrega; kırılmış veya kırılmamış çakıl, yeniden kullanılan beton, kırmataş veya karışımından oluşmaktadır. Kırmataş veya kırılmış çakıldan yapılmış SSB'lerin sıkıştırılması, yuvarlak çakıldan yapılmış SSB'lerden daha zor olmasına karşılık, taşıma ve yerleştirme sırasında daha az ayrışma ortaya çıkmaktadır. Kaplama yüzey dokusunun önem kazandığı durumlarda maksimum dane çapı 19 mm'yi geçmeyen agregalar kullanılmalıdır. (DOA, 1995; Taşdemir et al.'dan, 2002).

Ragan'a (1988) göre, ayrışmalardan sakınmak ve karıştırma işlemini kolaylaştırmak için maksimum dane çapı 25 mm olan agregalar kullanılmalıdır (Taşdemir et al., 2002).

İnce agregalar, doğal kum, kırılarak üretilen kum veya her ikisinin karışımından meydana gelmektedir. Yüksek oranda plastik olmayan silt parçacıkları içeren kumlar, mineral filler olarak görev yaptığı gibi ihtiyaç duyulan çimento gereksinimini de azaltmaktadır. Bunun aksine, yüksek oranda kil içeren ince agregalarla yapılmış olan karışımlarda kullanılan su miktarı artmakta, büzülme ve çatlama oluşmakta, dolayısıyla mukavemet azalmaktadır. Bu yüzden karışımda kullanılacak kumların su emme kabiliyeti ve özgül ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir (DOA, 1995; Taşdemir et al.'dan, 2002).

SSB ve geleneksel betonda kullanılan agregalar arasındaki en önemli farklılıklardan biri agrega gradasyonudur. Portland Cement Association [PCA] (2006)'nın, SSB yol kaplamaları için önerdiği agrega gradasyon limitleri Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Agregada gradasyon limitleri (PCA, 2006).

Elek boyutu	% Geçen (Ağırlıkça)	
	Minimum	Maksimum
1-in. (25 mm)	100	100
3/4-in. (19 mm)	90	100
1/2-in. (12.5 mm)	70	90
3/8-in. (9.5 mm)	60	85
No. 4 (4.75 mm)	40	60
No. 16 (1.18 mm)	20	40
No. 100 (150 µm)	6	18
No. 200 (75 µm)	2	8

Çizelge 2.2’de gösterilen gradasyon limitlerinde, SSB karışımlarında kullanılan 200 no.lu elekten geçen ince tane miktarının geleneksel betona kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. SSB’de kullanılacak agregaların yıkanmasına ve temizlenmesine ihtiyaç duyulmamaktadır. 200 no.lu elekten geçen, plastik olmayan az miktarda ince malzemenin (ağırlıkça %2 ve %8 mertebesinde) varlığı SSB’nin özelliklerini geliştirmek için yeterli olmaktadır. Yıkanmış agregaların kullanılması durumunda 200 no.lu elekten geçen ince malzeme %2-%8 aralığındaki şartname kriterlerini sağlamayacaktır. Bu gibi durumlarda istenilen ince malzeme miktarını sağlamak için karışıma uçucu kül eklenebilmektedir (PCA, 2006).

Murphy (1987), Avustralya’da üretilen SSB’lerin gradasyonunda 200 no.lu elekten geçen malzeme miktarının ağırlıkça %5 ile 10 arasında olduğunu belirtmiştir (Ludwig et al., 1994).

Piggott (1986), Kanada’da üretilen SSB’lerin gradasyonunda maksimum tane çapı 19 mm olan iyi gradasyonlu agregaların

kullanıldığını, 200 no.lu elekten geçen malzeme miktarının ağırlıkça %2 ile 14 arasında olduğunu belirtmiştir (Ludwig et al., 1994).

Jofre, Fernandez ve Molina (1988), İspanya’da segregasyonu önlemek ve doyurucu yüzey kalitesi elde etmek için SSB gradasyonunda maksimum tane çapının 25 mm olarak sınırlandırıldığını ancak, 19 mm’nin daha sık kullanıldığını ve 200 no.lu elekten geçen malzeme miktarının ağırlıkça %10 ile 20 arasında olduğunu belirtmiştir (Ludwig et al., 1994).

Yüksek yoğunluk elde etmek için SSB karışımında sürekli granülometrilik agrega kullanılması, SSB yüzeyinde düzgünlük elde etmek için ise ince agreganın ayarlanmasına ve miktarına özen gösterilmesi ve ince agrega miktarının normal betona göre bir miktar fazla olması gerektiği Schrader ve McKinnon (1984) ve diğer birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Atiş, 2001). Bu ise iki türlü sağlanabilmektedir, birincisi geleneksel olarak kum yüzdesini arttırmak, ikincisi ise ince ve iri agreganın ya da çimentonun bir kısmının uçucu kül ya da benzeri mineral katkı ile yer değiştirmesidir. İnce agreganın fazlalığı, ikinci yol ile elde edildiğinde puzolanik özelliği olan bir malzemenin karışım içinde yer alması sağlanmış olur. Bu katkı hem işlenebilirlik açısından faydalı olmakta hem de karışımın daha ekonomik olmasını sağlamaktadır. Beton karışımı uygun tasarlandığında standartlara uymayan mineral katkılar karışımında kısmen agrega yerine kullanılabileceği gibi standartlara uygun mineral katkılar kısmen çimento yerine de kullanılabilecektir. Puzolanik özelliğe sahip atık bir malzeme olan çeltik kabuğu külleri de SSB’de bir mineral katkı olarak kullanılmış

ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Kajorncheappungam ve Stewart, 1992; Atiş'den 2001).

2.1.2. Bağlayıcılar

SSB karışımları, herhangi bir çimento tipi veya çimento-puzolan birleşimi ile üretilmektedir. SSB'de kullanılmak üzere uygun bağlayıcı malzemenin (çimento+puzolan) seçimi yapı amacı ve boyutu, çevre koşulları ve agrega karakteristiklerine bağlıdır. SSB'nin dayanımı esas olarak agrega kalitesi, sıkışma derecesi ile çimento, puzolan ve su miktarlarına bağlıdır. Bağlayıcı malzeme tipinin hidratasyon hızı ve dayanım gelişmesi üzerinde önemli etkisi vardır (Koçak, 1998).

Koçak (1988), çoğu SSB karışımlarının başlıca gereksinimlerinden birinin yeterli hamur hacmi sağlayarak agrega daneleri arasındaki boşlukları doldurmak olduğunu belirtmiştir. Aksi taktirde, karışımda hapsolmuş hava içeriğinin artacağını, agregaların ayrışacağını, betonun sıkışmasında zorluk çıkacağını bunun ise düşük dayanıma, katmanlar arasında aderans kaybına, dolayısıyla, sızıntılara sebep olacağını belirtmiştir.

PCA (2006)'ya göre, SSB karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak Tip I (normal), Tip IP (%40 oranına kadar puzolan içeren) veya Tip II (modifiye) portland çimentoları veya katkılı hidrolik çimento, F yada C sınıfı uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu kullanılmaktadır.

2.1.2.1. Çimento

Bağlayıcı malzemenin seçimi ve dozajı, hedeflenen dayanıma, mekanik özelliklerin gelişme hızına ve durabilite kriterlerine bağlıdır. Genel olarak, endüstriyel yada şehir içi kaplamalar için dizayn edilen ve üretilen SSB karışımlarında çimento içeriği $250-350 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Bu da karışımdaki toplam kuru malzemenin ağırlıkça %12 ile % 16'sı oranlarına denk gelmektedir. Çimento dozajının fazla olması büzülme çatlaklarının ve üretim maliyetinin artmasına sebep olacaktır (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB yol kaplamalarında Tip I (normal) ve Tip II (modifiye) portland çimentosu kullanılmaktadır. Çalışma süresinin kısa olması gereken yerlerde erken priz yapan Tip III çimentolarının kullanılması önerilmektedir. Ancak çoğu SSB uygulamalarında Tip III çimento kullanımı sıkıştırma süresini kısalttığı için pratik olmamaktadır (DOA, 1995; Taşdemir et al.'dan, 2002).

2.1.2.2. Puzolanlar ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu

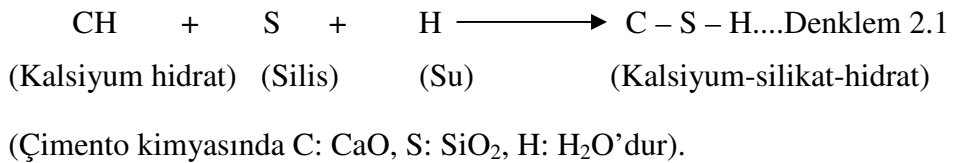
ASTM C 618'e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir.

Puzolanların sınıflandırılmasına ilişkin çeşitli öneriler olmakla birlikte, günümüzde yaygın olarak kabul edilen bu malzemelerin

kökenine dayanmaktadır. Buna göre puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki temel gruba ayrılırlar. En bilinen yapay puzolanlar çeşitli endüstrilerin atık malzemesi olan uçucu kül, endüstriyel cürufklar ve silis dumanıdır. Ayrıca bazı doğal malzemelerin ısıtılma işlemine tabi tutulmasıyla elde edilen puzolanik malzemeler de bu grup altında sınıflandırılmaktadır (Erdoğan vd., 2003).

Doğal puzolanlar; volkanik küller ve tüfler (traslar) ile pomza taşlarıdır. Volkandan çıkan tüfler yüksek sıcaklıktan ani olarak soğuduklarından camlaşıp, amorf bir yapı kazanırlar. Aktif hale geçmesi kireçle birleşebilme yeteneği kazanma anlamına gelir. Silis ve alümin asit karakterlidir. Kireç de bazik karakterde bir malzeme olduğundan puzolanik reaksiyon bir tür asit-baz reaksiyonudur (Baradan, 2004).

Doğal puzolanlar ince öğütülme yetenekleri sayesinde çimento hamurundaki mikro boşluklara kolayca girmekte ve çimento hamurunun iskelet yapısını değiştirerek dayanıklılığını artırmaktadırlar. Buna ilaveten doğal puzolanlar, ince taneli olmaları sayesinde çimento harcı ve beton üzerinde kayganlaştırıcı bir etki de ortaya koymaktadırlar. Bu etki taze betonun kıvamını ve dolayısıyla işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Ancak doğal puzolanlar, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını da artırabilmektedirler (Yetgin ve Çavdar, 2005). Nemli ortamda ince öğütülmüş puzolan ile kalsiyum hidroksit arasında gerçekleşen reaksiyon aşağıdaki gibi gösterilebilir.



2.1.2.3. Uçucu kül

Uçucu kül en yaygın kullanılan puzolandır. Bu malzeme, termik santrallerinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce, bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrate oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir (Taşdemir, 2002).

Uçucu külün fiziksel özellikleri, genel olarak termik santralde yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sistemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uçucu kül, genellikle gri renktedir ve rengi, içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça daha koyu bir hal almaktadır. Uçucu kül, % 60–90 camsı bileşen ihtiva eden çok ince taneciklerden meydana gelmektedir. Taneciklerin yaklaşık % 75’inin çapı 45 μm ’den, % 50’den çoğu ise 20 μm ’den daha küçüktür. Uçucu külün özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakın olup öğütme yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.3’te özetlenmiştir (Aruntaş, 2006).

Çizelge 2.3. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Aruntaş, 2006).

Çap (μm)	Şekil	Renk	Yoğunluk (g/cm^3)	İncelik
1 – 200	yuvarlak	gri	2.2 - 2.7	~ çimento İnceliğinde

ASTM C 618 no’lu standart, uçucu külleri kimyasal içeriklerine göre C ve F sınıfı ve kireç oranına bağlı olarak da; düşük kireçli ve yüksek kireçli olmak üzere sınıflandırmaktadır. Genellikle, antrasit veya

bitümlü kömürlerden elde edilen ve CaO içeriği %10'dan az olan küllere *Düşük Kireçli Uçucu Küller*, linyit veya düşük kalorili bitümlü kömürlerden elde edilen ve CaO oranı %10'dan daha fazla olan küllere *Yüksek Kireçli Uçucu Küller* adı verilmektedir. ASTM C 618'de kimyasal içeriklerine bağlı olarak C ve F sınıfı küllerde aranan özellikler Çizelge 2.4'te verilmiştir (ASTM C618, 2002).

Çizelge 2.4. ASTM C618'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması

Sınıf	Tarif
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$, antrasit ve bitümlü kömürün yakılmasından elde edilmiş, puzolanik özelliğe sahip
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$, linyit veya bitümlü olmayan kömürün yakılmasından elde edilmiş, puzolanik özelliğinin yanı sıra kendiliğinden bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip

Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları yakıt olarak kullanılan kömürün tipine ve de yanma işlemine göre değişiklik göstermektedir. Çizelge 2.5'te değişik termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin içerikleri görülmektedir. Buradan da görülebileceği gibi birçok uçucu küldeki " $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ " miktarı %85'in üzerindedir. Uçucu küllerin yeterli puzolanik özellik gösterebilmeleri için bu oksitlerin toplam miktarının F tipi ve C tipi küllerde, sırasıyla, %70 ve %50'den az olmaması gerekmektedir. F tipi uçucu küllerdeki CaO oranı %10'dan daha düşüktür. Bu tür küller sadece puzolanik özellik gösterebilmektedir.

C tipi uçucu küllerdeki CaO oranı, genellikle %10'dan daha fazladır. Yüksek miktarda CaO içeren küller, bir miktar kendiliğinden bağlayıcı özelliğe sahiptirler (Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerde az miktarda da olsa MgO, SO₃, alkali ve karbon yer almaktadır. Bunların oranının yüksek olması istenmemektedir. MgO, hidrasyon sonucunda betonda genleşmeye yol açmaktadır.

Çizelge 2.5. Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları (Erdoğan, 2003)

Kimyasal özellik	F tipi (CaO<%10)	C tipi (CaO>%10)
SiO ₂	43.6 – 64.4	23.1 – 50.5
Al ₂ O ₃	19.6 – 30.1	13.3 – 21.3
Fe ₂ O ₃	3.8 – 23.9	3.7 – 22.5
CaO	0.7 – 6.7	11.5 – 29.0
MgO	0.9 – 1.7	1.5 – 7.5
Na ₂ O	0.0 – 2.8	0.4 – 1.9
C, (Kızdırma kaybı)	0.4 – 7.2	0.3 – 1.9

SO₃, sertleşmiş betonda etrenjit oluşumuna ve böylece çok büyük genleşmelere neden olmaktadır. Alkali miktarının yüksek olması reaktif silis içeren agregalarla reaksiyon olasılığını arttırarak betonda genleşmelere yol açabilmektedir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerle yapılan hava sürüklenmiş betonlarda, daha çok miktarda hava sürükleyici katkı malzemesinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Erdoğan, 2003).

Türkiye’de elde edilen bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları, TS 639 ve ASTM C 618 sınır değerleri ile birlikte Çizelge 2.6’da verilmiştir. Afşin-Elbistan uçucu külü dışında diğerlerinin

genel olarak TS 639’da belirtilen sınır değerlere uygun olduğu, ASTM C 618’e göre ise Afşin-Elbistan uçucu külünün C sınıfı, diğer uçucu küllerin F sınıfı olduğu görülmektedir (Aruntaş, 2006).

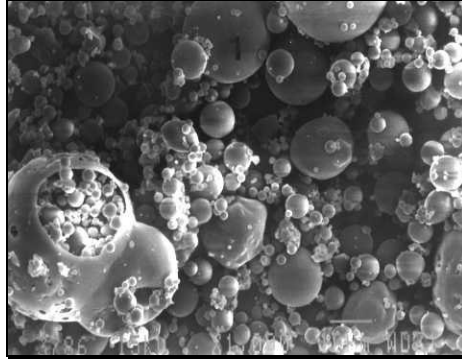
Çizelge 2.6. Türkiye’deki bazı UK’lerin kimyasal kompozisyonları, (Aruntaş, 2006)

Bileşim %	Afşin - Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 sınırları	ASTM C 618 sınırları	
						F	C
SiO ₂	27.4	56.8	58.59	49.13	-	-	-
Al ₂ O ₃	12.8	24.1	21.89	15.04	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5.5	6.8	9.31	8.25	-	-	-
S+A+F	45.7	87.7	89.79	72.42	>70	>70	>50
CaO	47.0	1.4	4.43	13.2	-	-	-
MgO	2.5	2.4	1.41	4.76	<5	<5	<5
Na ₂ O	(N+K)0.3	(N+K)3.0	0.24	2.2	-	<1.5	<1.5
K ₂ O	-	-	1.81	1.76	-	-	-
SO ₃	6.2	2.9	0.41	3.84	<5	<5	<5
K.K	2.4	0.6	1.39	0.72	<10	<12	<6

Keifer (1988), SSB kaplamalarda F tipi ve C tipi uçucu küllerin toplam bağlayıcının %25 - %45’i oranında kullanıldığını söylemektedir (Taşdemir et. al., 2002).

Uçucu kül SSB’nin işlenebilirliğini arttırmakta ve karışımının çatlama davranışını önemli derece etkilemektedir. Uçucu kül kullanımı, özellikle sıcak havalarda yol yapımı sırasında avantaj sağlamaktadır. İklimin soğuk olduğu bölgelerde ise uçucu kül ilave edilmesi donma-çözülme dayanıklılığını da azaltmaktadır. Bu yüzden, kış aylarının sert geçtiği bölgelerde uçucu kül kullanılmamalıdır. (Ağar ve Taşdemir, 2007)

SSB karışımlarında çimento yerine bir miktar uçucu kül kullanılması ekonominin yanında, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri esnasında da bir takım yararlar sağlar. Uçucu kül kullanımı taze SSB karışımında ince malzeme yüzdesini arttırarak sıkıştırma işlemlerini kolaylaştırır ve böylece sık dokulu bir kaplama yüzeyi elde edilir. Uçucu kül aynı zamanda sertleşmiş SSB'nin özelliklerine de etki eder. Genellikle kısa süreli dayanımını azaltır fakat uzun vadede mekanik özelliklerini geliştirir. Uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak çekilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Gauthier and Marchand, 2005).

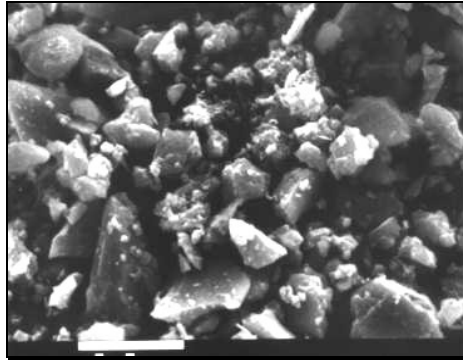


Şekil 2.3. Uçucu küle ait SEM fotoğrafı, (Gauthier and Marchand, 2005)

2.1.2.4. Granüle yüksek fırın cürufu

Demir üretiminde kullanılan yüksek fırında, demir cevherinden demir alındıktan sonra geri kalan maddeye cüruf denilmektedir. Bunun içinde alümin, silis ve kireç bulunmaktadır (Baradan, 2004).

Yoğunlukları 2.85 ile 2.95 arasında değişmektedir. Cüruf kaynağı ve inceliği, taze ve sertleşmiş SSB'nin özelliklerini etkilemektedir. Yüksek fırın cürufunun taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak çekilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 kıyaslandığında cüruf tanelerinin uçucu kül'e göre daha köşeli olduğu görülmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).



Şekil 2.4. Yüksek fırın cürufuna ait SEM fotoğrafı (Gauthier and Marchand, 2005)

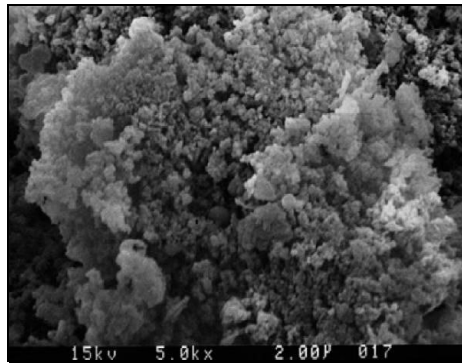
Granüle yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak, ya da ince öğütülerek ve Portland çimentosunun hidratasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)_2 'ı kullanmak suretiyle, hidrolik özelliğe sahip olur. Aktivasyon sonunda kalsiyum silikat hidratlar meydana gelir (Tokyay ve Erdoğan, 2001; Özkan'dan 2006).

2.1.2.5. Silis dumanı

Ferrosilikon ve silikonlu metal elektrik ark fırınlarında hammadde olarak kullanılan saf kuvarzın kömürle redüklenmesi sonucu elde edilen yan ürüne silis tozu veya dumanı adı verilir (Baradan, 2004).

Endüstriyel bir atık olan silis dumanının (SD) betona katılmasıyla daha yüksek performanslı betonlar elde edilebilmektedir. SD'yi oluşturan bileşiklerin arasında SiO_2 % 85'ten fazla bulunmasından dolayı SD kendi başına bağlayıcılık özelliği olmayan çok iyi bir yapay puzolandır. SD taneleri çimento tanelerinin yaklaşık 100 katı daha küçüktür. SD'nin puzolanik reaksiyonu sonucunda oluşan ürünler, betonun mikroyapısının da doluluk sağlamakta ve geçirimsizliğini arttırmaktadır. Ancak SD'nin betonda plastik rötreği arttırdığı bilinmektedir (Erdoğan, 2003).

Silis dumanının, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak çekilen mikroyapı fotoğrafı Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Hassani ve Saghafi, 2006).



Şekil 2.5 Silis dumanına ait SEM fotoğrafı, (Hassani ve Saghafi, 2006).

2.1.3. Su

Silindirle sıkıştırılabilen betonlardaki karışım suyunun kalitesi geleneksel beton karışımlarında kullanılan su ile aynı standartları sağlamalıdır. SSB karışımlarında kullanılan su miktarı tipik olarak 90 ile 120 kg/m³ arasında değişmektedir. SSB kaplama karışımlarında suyun bağlayıcı malzemeye oranı genellikle 0.30 ile 0.45 arasında olmaktadır. SSB kaplamalarda bu aralıktaki su/bağlayıcı malzeme oranı ile 28 günlük basınç dayanımı 41 MPa'ı geçen değerler elde edilebilmektedir (PCA, 2006).

SSB karışımlarında toplam suyun kuru malzemelerin ağırlığına oranı genellikle %4.6 ile %5.6 arasında değişmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

2.1.4. Kimyasal katkıları

Geleneksel betonlar için uygun olan çoğu kimyasal katkıları SSB üretiminde kullanılabilmektedir. Ancak SSB karışımlarında kullanılan katkıları dozajları geleneksel betonlardan farklıdır. Daha az su içeriğine sahip olduğundan ve karıştırma süresinin kısa olmasından dolayı SSB'de kimyasal katkıları etkisi daha azdır. Sonuç olarak; kullanılan katkıının etkisini gösterebilmesi için dozajları arttırılmalıdır. SSB kaplamalarda donatı çeliği kullanılmadığı için kimyasal katkılarda bulunan az miktardaki klor iyonları sorun yaratmamaktadır. Priz hızlandırıcı ve geciktirici katkıları kullanımında titiz davranılmalıdır (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB karışımlarında kullanılan kimyasal katkıları ASTM C 494 kriterlerini sağlamalıdır. Su azaltıcı ve priz geciktirici katkıların eklenmesi bağlayıcı malzemenin priz süresini geciktirir ve SSB üretim yeri ile inşaat sahası arasındaki mesafenin fazla olduğu durumlarda kullanışlı olabilir. Su azaltıcı katkıları, çimento hamurunun karışımında üniform bir biçimde dağılmasına yardımcı olmak ve kaplama esnasında işlenebilirliği geliştirmek amacıyla SSB karışımlarında başarı ile uygulanmaktadır (PCA, 2006).

Çalışmalar, SSB karışımlarında kullanılan su azaltıcı katkı dozajının geleneksel betona kıyasla üretici firmanın önerdiği minimum dozajın genellikle 4 katını gerektirdiğini göstermiştir. Yüksek dozajda su azaltıcı katkıları, karışımında priz geciktirici etki yaratmaktadır. Örneğin geleneksel beton için üretici firmanın önerdiği minimum dozaj 100 kg çimentoda 100 ml iken, SSB için yaklaşık olarak 100 kg çimentoda 400 ml olmaktadır. Bu dozajlarda, 1 m³ betonda kullanılan bağlayıcı malzeme miktarı 250- 300 kg iken katkı malzemesi dozajı yaklaşık olarak 1000 ml- 1200 ml arasında olmaktadır. Su azaltıcı kimyasal katkıların yaklaşık %50-60'ı sudur. Hedef S/B oranı ile istenilen işlenebilirliği elde edebilmek için bu miktar toplam karışım suyundan düşülmektedir. Yüksek etkili su azaltıcılar veya süperakışkanlaştırıcılar SSB'de yaygın olarak kullanılmamaktadır. Kullanılması halinde, SSB'nin sıkıştırılması işleminde titreşimli silindiri taşımak için gerekli olan stabilite sağlanamayacaktır (Gauthier and Marchand, 2005).

Karışımın kuru olarak hazırlandığı santrallerde üretim esnasında işlenebilirliği arttırmak ve karıştırma zamanını kısaltmak amacıyla polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkıları karışıma

eklenmektedir. Süperakışkanlaştırıcı katkılar üretim hızını önemli derecede artırmaktadır. Yolun trafiğe erken açılması gereken durumlarda, SSB karışımlarında priz hızlandırıcı katkılar da kullanılabilir (PCA, 2006).

Piggott (1999), SSB'nin kabul edilebilir limitlerdeki donma-çözünmeye dayanıklılığının hava sürükleyici katkı kullanmadan da elde edilebildiğini, bu sebeple hava sürükleyici katkıların, SSB'de yaygın olarak kullanılmadığını belirtmiştir. Ayrıca, karışım santralinde hava sürüklenme işlemi zor olmaktadır. Kullanılacak olan kimyasal katkının etkisini ve uygun dozajını belirlemek için arazi ve laboratuvar testleri yapılmalıdır (PCA, 2006).

2.2. SSB Karışım Oranları

SSB karışımlarında genellikle 0.20 ile 0.40 arasında değişen düşük S/B oranı kullanılmaktadır. SSB karışımları, karıştırma esnasında hamur fazının kütleyi saracak şekilde dağılmasına müsaade edecek kadar ıslak, sıkıştırma esnasında titreşimli silindiri taşıyacak kadar kuru olmalıdır (Tarun et.al., 2001).

Malzeme seçiminde olduğu gibi, kaliteli bir SSB karışımı elde etmek için bileşenlerin doğru olarak oranlanması gerekmektedir. SSB kaplamalar için yaygın kullanılan karışım dizayn yöntemleri;

- a. Optimal hamur hacmi metodu,
- b. Katı askı modeli,
- c. Zemin sıkıştırma metodu,

d. Beton kıvam test metodu

olmak üzere 4 ana başlıkta toplanabilir. Hangi dizayn metodu kullanılırsa kullanılsın amaç karışımda agregayı saran ve boşlukları dolduran yeterli hamur hacmine sahip bir karışım üretmektir (ACI Committee 325.10, 1995; PCA'dan, 2006).

2.2.1. Optimal hamur hacmi metodu

Optimal hamur hacmi metodu SSB kütle beton karışımlarını dizayn etmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu metot, sıkıştırma işlemi esnasında granüler yapının maksimum yoğunluğa ulaşmasıyla, partiküller arasında kalan boşlukların yeterli hamur hacmi ile doldurulması esasına dayanır. Eğer daha az miktarda hamur kullanılırsa, sıkıştırma sonrasında oluşacak boşluklar, SSB'nin mekanik özelliklerini azaltacak ve geçirgenliği arttıracaktır. Metot üç ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, belirli bir sıkıştırma enerjisi altında minimal boşluk hacmi içeren agrega gradasyonunun seçilmesidir. İkinci aşama, istenilen işlenebilirliği elde etmek için kalan boşluk hacminden faydalanarak optimal hamur hacminin belirlenmesidir. Son aşama ise, istenilen dayanımı sağlamak için yeterli bağlayıcı kapasitesine sahip hamur üreterek, su/bağlayıcı oranı ile çimento ve puzolanik malzeme miktarlarının belirlenmesidir (PCA, 2004).

2.2.2. Katı askı modeli

Son yıllarda, SSB karışımlarının oranlamasında katı askı modeli gibi daha teorik ve esas yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu oranlama metodu ile her kuru bileşenin (çimento, uçucu kül, silis dumanı, kum ve

kaba agrega) oranı belirlenmekte ve SSB karışımının kuru sıkışma yoğunluğu optimize edilmektedir. Optimize kuru sıkışma yoğunluğunu kullanarak, kuru bileşenlerin arasındaki boşlukları dolduracak yeterli su miktarı kolayca hesaplanabilmektedir (PCA, 2006).

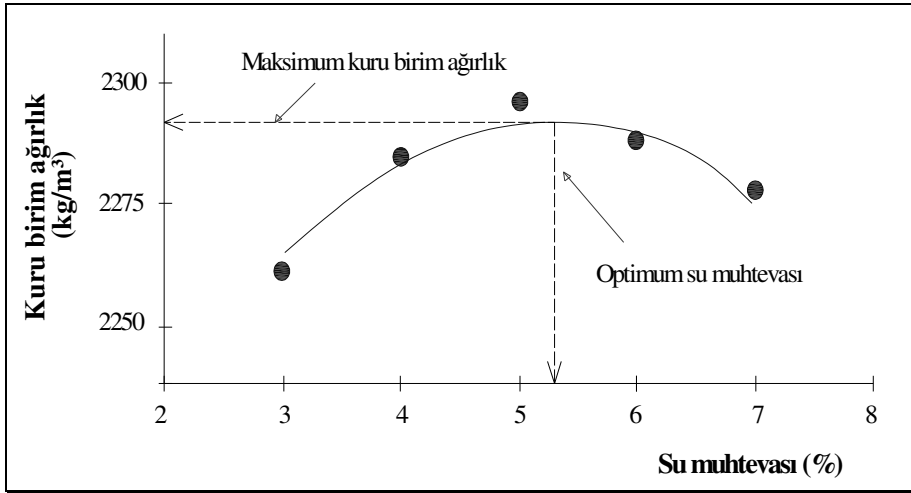
Bu model ile kuru bileşenlerin gradasyon, özgül ağırlık, boşluk indeksi gibi malzeme karakteristiklerinin bilinmesiyle güvenilir bilgisayar simülasyonları yapılabilmektedir. Aslında, bu oranlama metodunun sistematik kullanımı beton kıvam testlerinden elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Katı askı modelinin esas avantajı, SSB karışımının optimum oranlarını çok sayıda deneme karışımları hazırlamaya gerek kalmadan çok çabuk olarak tekrar hesaplanabilmesidir (PCA, 2006). Ayrıca, arazide, agrega ve çimento kaynağının değiştiği durumlarda da önemli bir avantaj sağlamaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

2.2.3. Zemin sıkıştırma metodu

Bu metot, maksimum tane çapının daha küçük ve bağlayıcı dozajının daha yüksek olduğu SSB yol kaplamaları karışımları için daha uygundur (ACI Committee 207, 1998). Bu oranlama metodu, SSB karışımının su muhtevası ile yoğunluğu arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu metotta standart Proktor testi (ASTM D 698) veya modifiye Proktor testi (ASTM D 1557) uygulanmaktadır. Her iki test metodu da optimum su muhtevasına karşılık gelen maksimum kuru yoğunluğu hesaplamak için kullanılmaktadır. Standart Proktor ile modifiye Proktor testleri arasındaki fark, sıkıştırma esnasında test numunelerine uygulanan enerji miktarıdır (PCA, 2004).

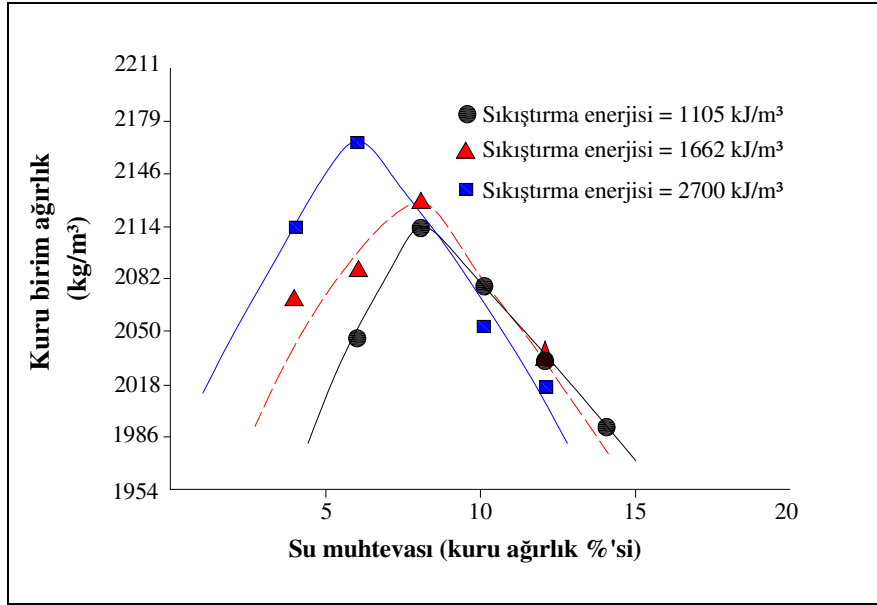
Arazideki SSB uygulamalarında titreşimli çelik bandajlı silindirler ile sıkıştırma işlemleri yapıldığından, tecrübeler modifiye proktor testinin SSB için daha uygun olduğunu göstermektedir. Standart Proktor ve modifiye Proktor testlerinin her ikisi de zemin mekaniği için geliştirilmiştir. Modifiye Proktor ile numune 2700 kJ/m^3 'lük bir enerji ile sıkıştırılabilirken, standart Proktor testi ile numune 600 kJ/m^3 'lük bir enerji ile sıkıştırılabilmektedir (PCA, 2004).

Modifiye Proktor testinden elde edilen tipik sıkışma eğrisi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Su, zemin taneleri arasında yağ görevi görmekte ve sıkıştırma işlemi sırasında tanelerin birbirinin üstünden kayarak daha sıkı bir şekilde yeniden düzenlenmelerine yardımcı olmaktadır (PCA, 2006).



Şekil 2.6. SSB karışımları için tipik su muhtevası – kuru birim ağırlık eğrisi

SSB'nin sıkışma test sonuçlarından elde edilen su muhtevası ile sıkışma enerjisinin sıkışmış yoğunluğa etkisi Şekil 2.7'de gösterilmiştir (ACI Committee 207, 1988).



Şekil 2.7. Su muhtevası ve sıkıştırma enerjisinin kuru birim ağırlık üzerine etkisi

Şekil 2.7'den;

- Maksimum kuru birim ağırlığın ve optimum su muhtevasının, kompaksiyon enerjisinin seviyesine bağlı olduğu,
- Kompaksiyon enerjisi arttıkça maksimum kuru birim ağırlığın arttığı,
- Kompaksiyon enerjisi arttıkça optimum su muhtevasının azaldığı görülmektedir.

Bu metotta; ilk aşama olarak SSB karışımının hacimce %90'ını ince ve iri agregalar oluşturduğundan yoğun, iyi gradasyonlu ve Çizelge 2.1'de belirtilen aralıklara uygun agregaya seçilmektedir (PCA, 2006).

Daha sonra değişik bağlayıcı içeriklerine sahip deneme karışımları hazırlanır. Bağlayıcı malzeme içeriği toplam kuru ağırlığın %12-17'si arasında değişebilmektedir. Her deneme karışımı için ise değişik su muhtevalarında karışımlar hazırlanır. ASTM D 1557'ye göre her seri için maksimum kuru birim ağırlığa karşılık gelen optimum su muhtevaları seçilir (PCA, 2004).

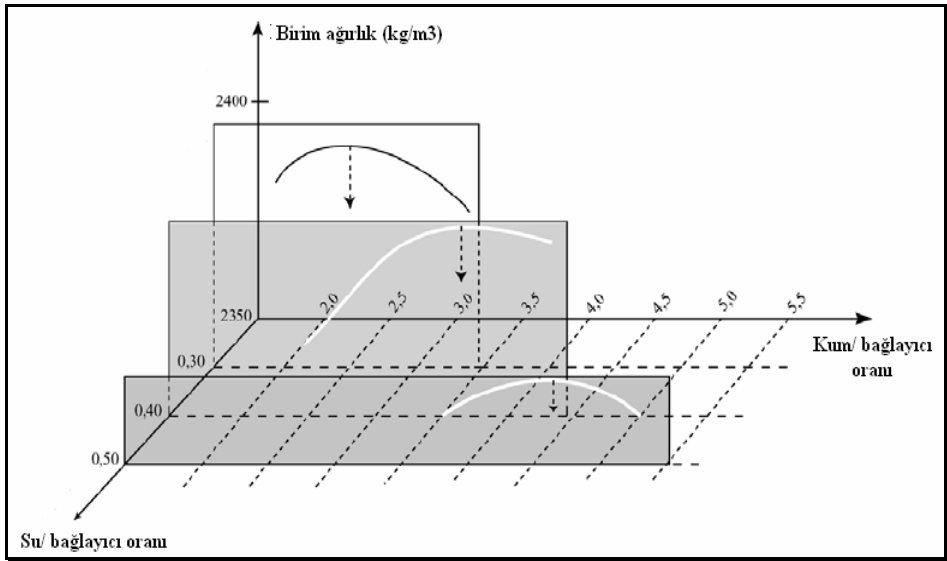
Geleneksel betondan farklı olarak SSB karışımlarında S/B oranı ana dizayn faktörü değildir. Su içeriği, SSB karışımlarının maksimum sıkışma yoğunluğuna, proje kriterlerine ve karışımda kullanılan kimyasal katkıya bağlıdır. Su muhtevası (w), aşağıdaki bağıntıda gösterildiği gibi genellikle karışımdaki toplam katı miktarının ağırlıkça yüzdesi cinsinden ifade edilmektedir (PCA, 2006).

$$w (\%) = \frac{\text{Karışımdaki su ağırlığı}}{\text{Fırın kurusu agregaya ağırlığı} + \text{Bağlayıcı malzeme ağırlığı}} \times 100 \dots \text{Denklem 2.2}$$

2.2.4. Beton kıvam test metodu

SSB karışımlarının belirli bir kıvama göre oranlanması üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, minimum hamur hacmini hesaplayabilmek için değişik su/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranlarından oluşan deneme harç karışımları hazırlanmakta ve her karışımın birim

ağırlığı ölçülmektedir. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, sabit bir su/bağlayıcı oranında, belli bir kum/bağlayıcı oranı vardır ki bu değer karışımın optimum birim ağırlığını vermektedir. İkinci aşamada, istenilen mekanik dayanımı sağlayan su/bağlayıcı oranı seçilmekte, üçüncü aşamada ise, elde edilen su/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranları ile istenilen işlenebilirliği sağlayacak kaba ve ince agregaların oranları ayarlanmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).



Şekil 2.8. SSB için optimum harç parametreleri, (Gauthier and Marchand, 2005).

2.3. Numune Alınması

SSB'nin mekanik özelliklerini saptayabilmek için geleneksel betondaki gibi 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde test silindirleri kullanılmaktadır. Zemin sıkıştırma metodu yaklaşımında, SSB silindir numunelerini hazırlamak için 2 yaygın yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

Modifiye Proktor tokmağı (ASTM D 1557) ile titreşimli tokmak (ASTM C 1435)'dir.

a. Modifiye proktor tokmağı ile silindir numune hazırlanması:

Modifiye Proktor (ASTM D 1557) testinde, SSB karışımı proktor kalıbına 5 kademede doldurulur. Her kademede 4.5 kg ağırlığındaki tokmak, 457 mm yükseklikten kalıba yerleştirilmiş olan SSB'nin üzerine 25 kez düşürülür. 2700 kJ/m³'lük sıkıştırma enerjisi ile numune sıkıştırılır (Choi et.al., 2001).

Sıkıştırma enerjisi Denklem 2.3'te gösterilen bağıntı ile elde edilmektedir.

$$E = \frac{G \cdot h \cdot a \cdot n}{V} \dots\dots\dots \text{Denklem 2.3}$$

Burada;

G : tokmak ağırlığı (kg),

h : tokmağın düşme mesafesi (mt),

a : tokmağın her tabakadaki düşme sayısı,

n : sıkıştırılacak tabaka sayısı,

V : kalıp hacmi (m³),

E : sıkıştırma enerjisini (kJ/m³) cinsinden ifade etmektedir.

Ancak, 150 mm çapındaki silindir kalıp, proktor kalıbından (102 mm çapında) daha geniş olduğundan aynı sıkıştırma enerjisini elde edebilmek için standart prosedürde ayarlama yapmak gerekmektedir.

Bunun için aynı tokmak kullanılarak, numunenin 6 katmanda ve her katmanda 122 düşüşle sıkıştırılması genel olarak kabul edilmektedir.

Casias ve arkadaşları (1988), sıkıştırma esnasında her katmandaki 122 vuruşun, tanelerde önemli kırılmalara yol açtığını, agrega gradasyonunu ve SSB'nin dayanımını olumsuz etkilediğini belirtmektedir. Bu sebeple numunenin her katmanda 50 vuruş ile sıkıştırılması önerilmektedir (Choi et.al., 2001).

b. Titreşimli tokmak ile silindir numune hazırlanması :

Modifiye Proktor testine alternatif olan bu metot ile sıkıştırma daha pratik olup, sıkıştırma işlemi, 10 ± 0.2 kg ağırlığında, minimum 900W güç ile çalışan ve dakikada en az 2000 darbe sağlayan tokmak ile yapılmaktadır. Hilti TE 804 ile Kango 900 modelleri tavsiye edilmektedir. Matkap ucunun darbe vurduğu bastırma plakası çapının 140 ± 3 mm, ağırlığının ise 3 ± 0.1 kg olması gerekmektedir (ASTM C 1435, 1999).

Şekil 2.9'da titreşimli tokmak ile numunenin sıkıştırılması gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.9. Titreşimli tokmak ile silindir numune hazırlanması, (a) Titreşimli tokmak, (b) Titreşimli tokmak ile numunenin sıkıştırılması

Bu metot, maksimum tane çapı 50 mm'den küçük olan agregaların kullanılması durumunda uygundur. Numune, karışım hazırlandıktan sonra 45 dakika içerisinde kalıplara yerleştirilmelidir. 150/300 mm ayrıtlı silindir kalıba SSB karışımı 3 eşit kademeyle doldurulmakta ve her kademeyle 15-20 sn darbe verilerek numune hazırlanmaktadır. Bu sıkıştırma metodunda, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi bastırma plakası ile kalıp iç yüzeyi arasında harç tabakası yüzük şeklinde oluştuğu an sıkıştırma işlemine son verilmekte ve bir sonraki katman için karışım kalıba konulmaktadır. Yüzük şekli yaklaşık 5-15 sn.'de oluşmaktadır. Eğer 20 sn sonra sıkıştırma esnasında bastırma plakası ile kalıp iç yüzeyi arasında harç tabakası oluşmaz ise sıkıştırma işlemine yine son verilmektedir (ASTM C 1435, 1999).



Şekil 2.10. Sıkıştırma öncesi ve sıkıştırma sonrası durum

3. TAZE VE SERTLEŞMİŞ SSB ÖZELLİKLERİ

Taze halde iken kuru kıvamda olan silindirle sıkıştırılmış betonun özellikleri geleneksel betondan belirgin bir biçimde farklıdır. Geleneksel betona nazaran daha düşük çimento dozajında uygun bir biçimde dizayn edilen SSB karışımının donma-çözünme dayanıklılığı kadar mekanik özelliklerinin (elastisite modülü, basınç/eğilme dayanımı) gelişimi de iyi olmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

3.1. Taze SSB Özellikleri

Taze SSB'nin ana özellikleri; işlenebilirlik, yoğunluk, segregasyon ve karışım suyu miktarındaki değişimlere karşı yüksek hassaslıştır. Taze haldeki geleneksel betonun özelliklerini belirlemek için kullanılan test metotları SSB'de uygulanmamaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

3.1.1. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik SSB'nin segregasyona uğramadan kolayca yerleşmesini ve sıkıştırılmasını belirleyen önemli bir özelliktir. SSB'nin işlenebilirliği geleneksel betonda uygulanan slump testi ile ölçülmemektedir. Doğru dizayn edilmiş SSB karışımı sıfır çökmeye sahip olsa bile bu değer SSB işlenebilirliği için anlamlı olmamaktadır. SSB karışım dizaynında kritik aşama SSB'nin istenilen işlenebilirlik düzeyinin belirlenmesidir (USACE, 2000).

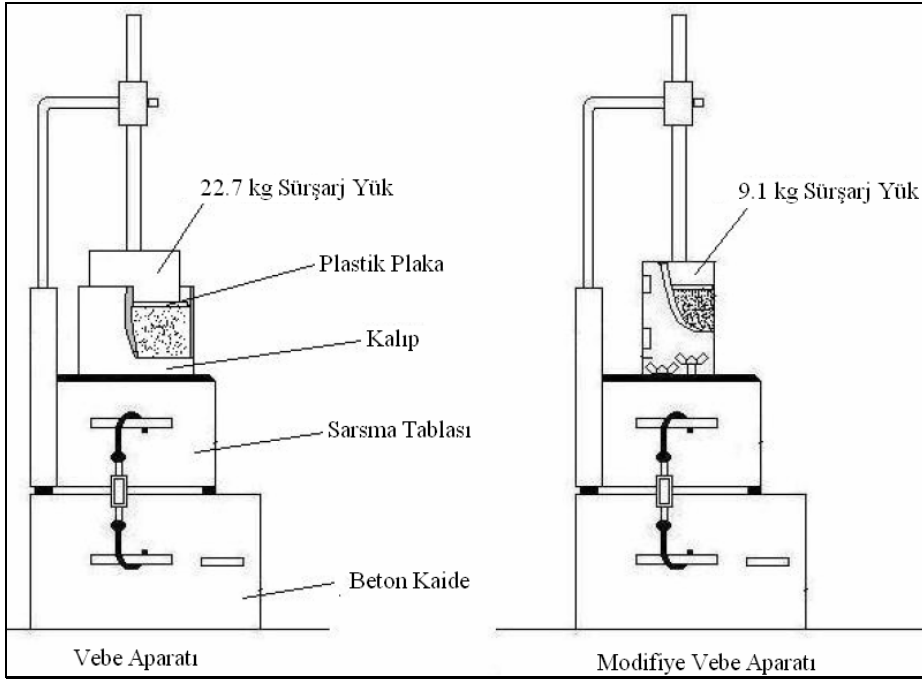
Hamur hacmi ve akıcılığı SSB'nin işlenebilirliğine direk etki etmektedir. Sıkışma esnasında, agregalar arasındaki boşlukları doldurmak için hamur fazı, yeterli akıcılığa sahip olmalıdır.

İşlenebilirliğin yetersiz olması, kaplamanın mekanik özelliklerin gelişimini, yerleştirme işlemlerini, kalitesini ve durabilitesini olumsuz etkilemektedir. SSB karışımının çok işlenebilir olması (daha ıslak karışım gibi) karışımın su yada hamur miktarının fazla olduğunu göstermektedir. S/B oranının artması mekanik özellikleri ve durabiliteyi olumsuz etkilemektedir. Arazide, karışımın fazla akıcı olması sıkışmış betonda interstisyel (çatlak oluşturan) basınç yaratma eğilimi göstermekte olup bu basınç kaplama yüzeyinde dalgalanma şeklinde deformasyona sebep olabilmektedir. İşlenebilirliği yüksek olan karışımlarda hamur miktarının fazla olması, sıkıştırma işlemleri esnasında titreşimli çelik bandajlı silindirlerin tamburuna çimento hamurunun yapışmasına yol açmakta, bu ise kaplama yüzeyinin kalitesini düşürmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB karışımının işlenebilirliğinin aşırı düşük olması (daha kuru karışım), karışım suyunun yetersiz olması durumunda oluşmaktadır. Karışımın kuru olması halinde, sıkıştırma esnasında hamur, agrega taneleri arasındaki boşlukları dolduramayarak SSB'nin mekanik özelliklerini ve durabilitesini olumsuz etkileyen boşluk hacmini artırmaktadır. Ayrıca işlenebilirliğin düşük olması, SSB'nin üretimi, yüklenmesi, taşınması ve yerleştirilmesi esnasında segregasyonu artırmaktadır. Sonuç olarak işlenebilirliğin olmayışı, katmanlar ve derzler arasında daha zayıf bir bağ oluşturmaktadır. Su dozajındaki $1-2 \text{ L/m}^3$ gibi ufak değişimler karışımın işlenebilirliğini ve yerleştirme işlemlerini fark edilir şekilde etkilemektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB'nin işlenebilirliği, ASTM C 1170'e göre Vebe aleti kullanılarak ölçülmektedir (Şekil 3.1). Test, SSB numunesinin 22.7 kg

sürşarj yük altında sarsılmasını ve yükün uygulandığı pleksiglas plaka ile kalıp iç yüzeyi arasında yüzük şeklinde harç tabakasının oluşması (Bkz. Şekil 2.8) için gereken sürenin ölçülmesini içermektedir. Vebe kıvam süresi, agrega taneleri arasındaki boşlukların tamamıyla hamur ile doldurulması için geçen süredir (Gauthier and Marchand, 2005).



Şekil 3.1. Vebe kıvam aparatu ve modifiye Vebe aparatu (Delatte et.al., 2003)

Uygulanan sürşarj yük, Japonya’da 20 kg alınmaktadır. Ancak 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 su içeriğinin fazla olduğunu ve karışımın daha akıcı kıvama sahip olduğunu göstermektedir (Andriolo, 1998).

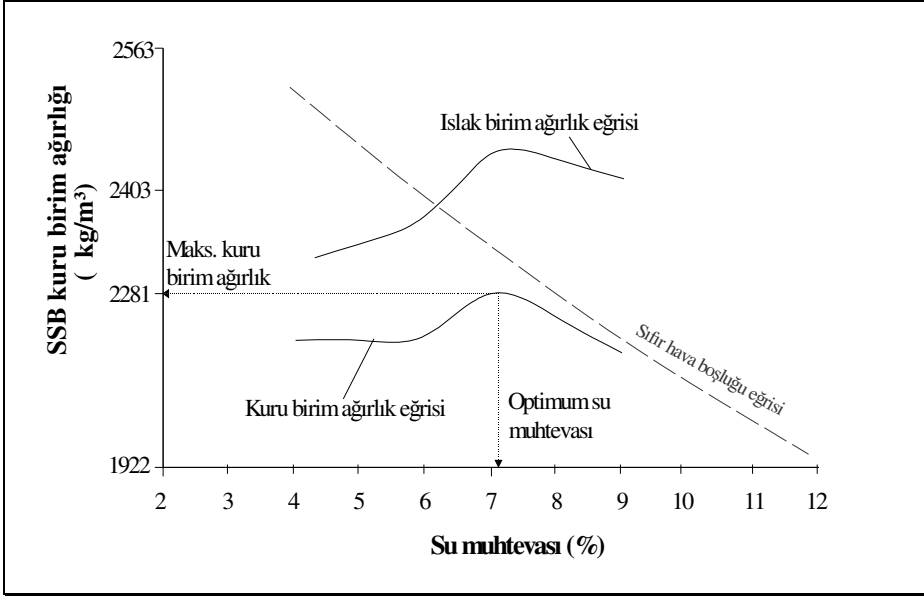
Arazi çalışmalarından SSB için Vebe kıvam süresinin genellikle 40-90sn arasında olduğu elde edilmiştir. Yerleştirme işlemi için maksimum süre 60 sn. olarak sınırlandırılmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

3.1.2. Birim ağırlık

Taze SSB karışımının ıslak birim ağırlığın ölçülmesi ile üretimin uniform olup olmadığı kontrol edilebilmekte ve yerleştirilmiş betonun sıkışma yüzdesi hakkında referans bir değer elde edilebilmektedir. Ayrıca, bu referans ıslak birim ağırlıkla laboratuvar çalışmalarından elde edilen teorik birim ağırlıklar kıyaslanabilmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB'nin ıslak birim ağırlığı laboratuvar ortamında modifiye Proktor (ASTM D 1557) test prosedürüne göre hesaplanabilmektedir. Bu ıslak birim ağırlık SSB'nin referans birim ağırlığıdır. Sıkıştırma esnasında agregalar kırılabileceğinden ve agregaların tane boyut dağılımı değişebileceğinden bu metodun uygulanması özel dikkat gerektirmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

Teorik olarak, malzemenin kuru birim ağırlığı sıfır hava boşluğu eğrisine (doygunluk eğrisi) paralel olacaktır (Şekil 3.2). Sıfır hava boşluğu eğrisi, sıkıştırılmış karışımda hiç hava boşluğu bulunmadığı durumlardaki kuru birim ağırlık-su muhtevası bağıntısını gösteren eğridir.



Şekil 3.2. SSB karışımının sıkışma eğrisi (PCA, 2004)

Yüksek su muhtevalarında, karışımın hava içeriği ve plastisitesi (şekillenebilirliği) daha fazla, birim ağırlığı daha az olmaktadır. Kuru birim ağırlık ile ıslak birim ağırlık arasındaki ilişki Denklem 3.1’de gösterilmiştir (PCA, 2004)

$$\gamma_d = \frac{\lambda_w}{(1 + w)} \dots\dots\dots \text{Denklem 3.1}$$

Burada;

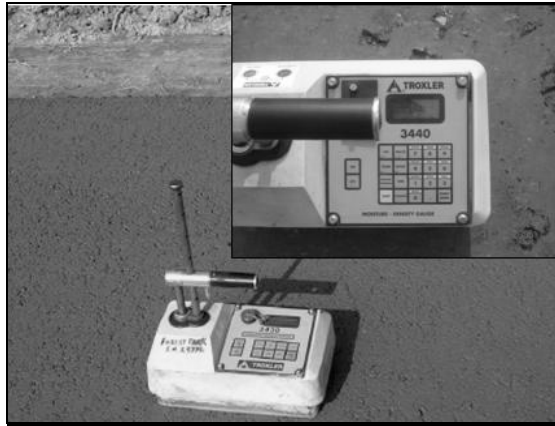
γ_d : kuru birim ağırlık (kg/m^3),

γ_w : ıslak birim ağırlık (kg/m^3),

w : su muhtevası (%)’dır.

Sıkıştırılmış SSB'nin arazideki ıslak birim ağırlığın ölçümü ASTM C 1040'a uygun nükleer yoğunluk test aleti ile yapılmaktadır (Şekil 3.3). Nükleer cihaz, gama ışını ve nötron yayan bir kaynak ile bir dedektörden ibarettir. Alet deney yapılacak zemin üzerine yerleştirilerek geri saçılan ışınlar dedektörle sayılır. Geri saçılan ışın miktarı ne kadar az ise zeminin birim ağırlığı o kadar fazladır. Yüzeyi bozmadan anında sonuç vermesi bir avantaj olmaktadır (Karayolları Genel Md.lüğü, 1991).

Nükleer ölçüm aleti ile arazide elde edilen ıslak birim ağırlığın, modifiye Proktor testi ile laboratuvarında elde edilen referans ıslak birim ağırlığa oranı SSB'nin sıkışma yüzdesini vermektedir (Gauthier and Marchand, 2005).



Şekil 3.3. Nükleer ölçüm aleti

Sıkışma yüzdesi hesabında, hataların kaynağını (agreganın nem içeriği, karışımın toplam su muhtevası vb.) minimize etmek amacıyla kuru birim ağırlıkların yerine ıslak birim ağırlık değerleri

kullanılmaktadır. Elde edilen sıkışma yüzdesi değerinin %98'in altına düşmemesi önerilmektedir (PCA, 2006).

3.1.3. Hava içeriği

Basınç tipi hava ölçer metodu ile SSB'nin hava içeriği ölçülememektedir. Geleneksel betondan farklı olarak, SSB'de agrega taneleri arasındaki yakın temastan dolayı plastik olmayan bir matris üretildiğinden, SSB bu test metodu için, istenilen şekil değiştirebilme karakteristiğine sahip değildir. Proktor testi ile hesaplanan referans ıslak birim ağırlık ile teorik birim ağırlık kıyaslandığında, SSB'deki toplam hava içeriği hakkında bir kanıya varılabilir. ASTM C 457 (sertleşmiş betonda hava boşluğunun karakterize edilmesi) ile küresel hava kabarcıkları ve kompaksiyon boşlukları dahil, hava boşluklarının yüzdesini belirlenebilmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

Uygun bir şekilde karışım dizaynı yapılmış ve tamamen sıkıştırılmış SSB karışımının hava içeriği %0.5 ile %1.5 arasında değişmektedir. Geleneksel betona nazaran daha düşük hava içeriğine sahiptir (Koçak, 1998).

3.1.4. Segregasyon

SSB karışımları düşük hamur içeriğine sahip olduğundan segregasyona yatkındır. Segregasyon aynı zamanda tane boyut dağılımının, kaba agreganın maksimum tane boyutunun ve hamur karakteristiğinin bir işlevidir. SSB'nin kamyonlara yüklenmesi sürecinde segregasyon oluşabileceğinden tedbirler alınmalıdır. SSB, damperli kamyonlara ilk boşaltıldığında, serbest düşüş mesafesi minimum

tutulmalı ve ayrıca kamyon gövdesi uzunluğunca (üçte biri öne, üçte biri ortaya, üçte biri ise arkaya koyularak) üniform bir şekilde bırakılmalıdır. SSB'nin finişerle serilmesinden sonra da ayrışma oluşan bölgelere rastlanabilmektedir. Bu gibi durumlarda, sıkıştırma işleminden önce segregasyona uğramış alanlar elenmiş malzeme (<5 mm) ile düzeltilebilmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

3.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Son zamanlarda karışım dizayn metodundaki gelişmeler optimal sıkışabilirlikte SSB üretmeyi mümkün kılmıştır. Uygun bir şekilde oranlanmış SSB'nin bağlayıcı içeriği ve S/B oranı geleneksel betonla aynı miktarda olsa da SSB'nin sertleşmiş beton özellikleri daha üstün olmaktadır. SSB'nin sertleşmiş beton özellikleri geleneksel betondaki gibi bağlayıcı tipine, dozajına, S/B oranına ve agregâ karakteristiklerine bağlıdır. Sıkışma derecesi de ayrıca önemlidir. Farklı sıkışma derecelerine sahip SSB numuneleri üzerinde yapılan bir çalışmada, (referans ıslak yoğunluğa oranı %90, %95 ve %98 olan) sıkışma derecesinde %3 oranında bir düşüşün SSB'nin basınç dayanımında yaklaşık %30'lara varan bir azalmaya sebep olduğu gösterilmiştir. Ayrıca basınç ve eğilme dayanımı için SSB numunelerinin hazırlanma prosedürü geleneksel betondan oldukça farklıdır (Gauthier and Marchand, 2005).

3.2.1. Mekanik özellikler

SSB'nin mekanik davranışı esas olarak düşük hamur miktarından etkilenmektedir. Geleneksel betonla kıyaslandığında, SSB karışımında agregaların yan yana sıkı bir şekilde yapılanması bu betonun mükemmel

mekanik performans göstermesine katkıda bulunmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

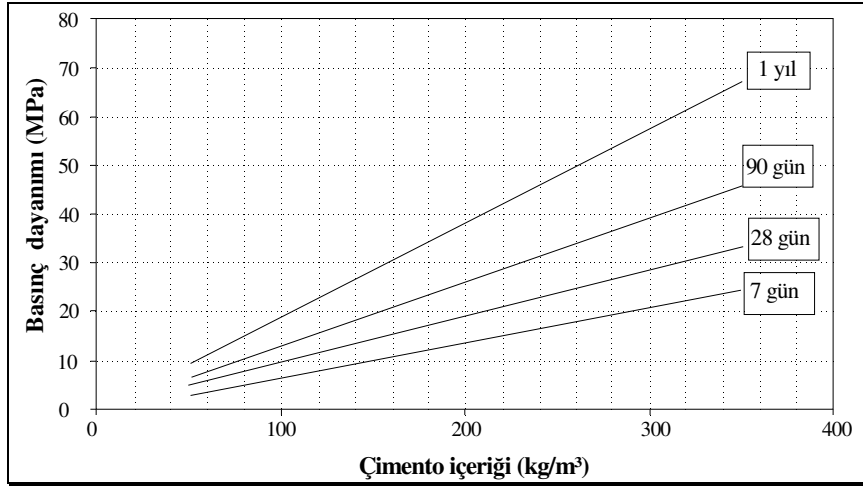
3.2.1.1. Basınç dayanımı

Düşük bağlayıcı içeriğine rağmen SSB karışımında karışıma giren kuru bileşenlerin optimizasyonu, çok iyi basınç dayanımlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Agregaların yüksek mertebede sıkışması sonucunda agregaları saracak bağlayıcı miktarı (çimento, silis dumanı, uçucu kül, cüruf vb.) daha düşük olmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB yol kaplaması olarak dizayn edilen karışımların 28 günlük basınç dayanımları 27.6 MPa ile 69 MPa arasında değişmektedir (Halsted, 2005).

Geçmiş çalışmalardan elde edilen verilerle, maksimum tane çapı 19 ile 75 mm arasında olan ve puzolan içermeyen SSB karışımlarının ortalama basınç dayanımı ile çimento dozajı arasındaki ilişki Şekil 3.4'te gösterilmiştir (USACE, 2000).

Çizelge 3.1'de SSB ile geleneksel betonun basınç dayanımları kıyaslanmıştır. Burada, bağlayıcı dozajları geleneksel betona kıyasla %20 ve %28 daha az olan SSB karışımlarının 28 günlük basınç dayanımlarının geleneksel betonla aynı olduğu görülmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).



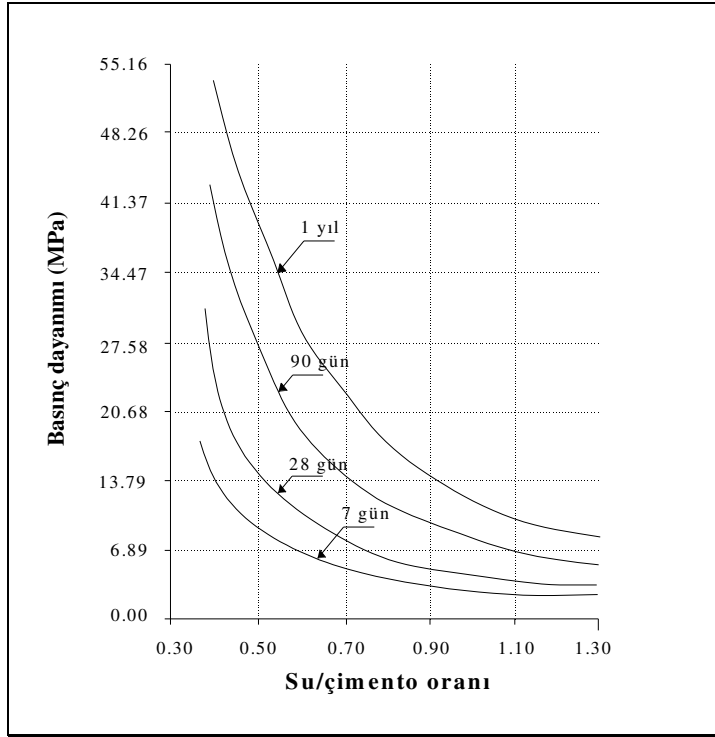
Şekil 3.4. Çimento içeriği ile basınç dayanımı ilişkisi, (USACE, 2000).

Çizelge 3.1. SSB ve geleneksel beton karışımlarının kıyaslanması

	Geleneksel beton (hava sürüklenmiş)	SSB (hava sürüklenmemiş)
Basınç dayanımı 45 MPa – Tip 10 Çimento		
Bağlayıcı (kg/m³)	350	270
Su/bağlayıcı oranı	0.40	0.40
Basınç dayanımı 60 MPa – Tip 10E-SF Çimento		
Bağlayıcı (kg/m³)	420	300
Su/bağlayıcı oranı	0.34	0.35

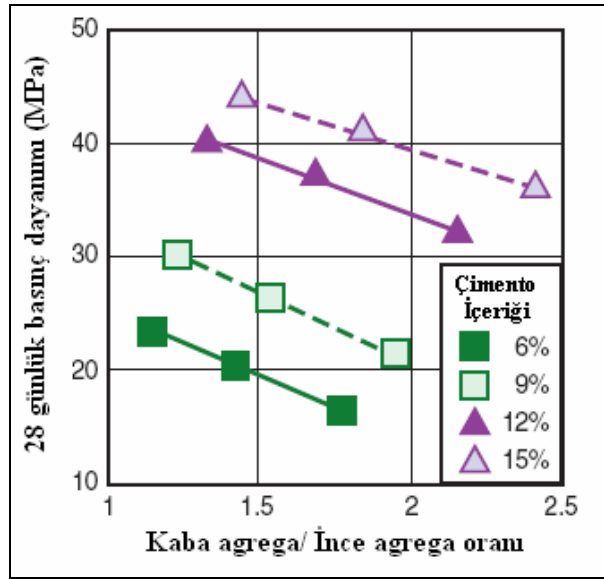
SSB'nin basınç dayanımı esas olarak bağlayıcı malzeme tipi, bağlayıcı malzeme miktarı, agrega kalitesi ve gradasyonu ile sıkışma yüzdesine bağlıdır (USACE, 2000).

Geçmiş çalışmalardan elde edilen verilerle, SSB karışımlarının basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki Şekil 3.5'te gösterilmiştir (Koçak, 1998).



Şekil 3.5. Basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı ilişkisi (Koçak, 1998)

Kaba agreganın ince agregaya oranı basınç dayanımında önemli rol oynamaktadır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi bağlayıcı dozajına bağlı kalmaksızın, karışımdaki ince malzeme miktarı arttıkça SSB'nin basınç dayanımı da artış göstermektedir (PCA, 2004).



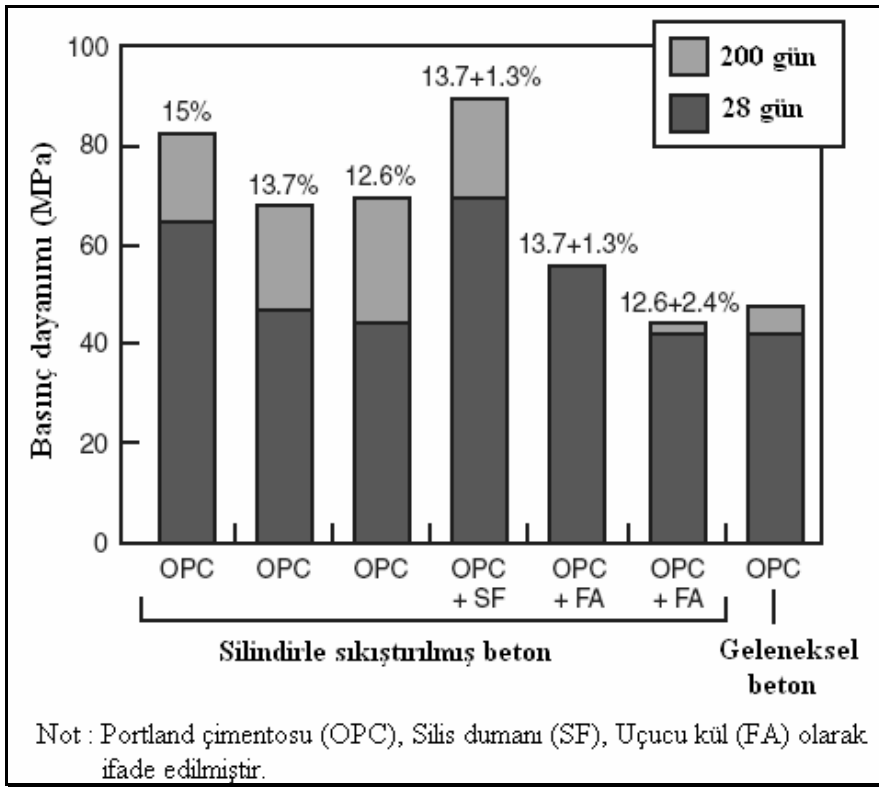
Şekil 3.6. İnce malzeme içeriğinin betonun basınç dayanımına etkisi (PCA, 2004)

Sabit su çimento oranında, kırılmış ve yuvarlak agrega tipleri kullanılarak hazırlanan SSB karışımlarının 28 günlük basınç dayanımları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir (Gauthier and Marchand, 2005).

Çizelge 3.2. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan SSB karışımının basınç dayanımına agrega tipinin etkisi (Gauthier and Marchand, 2005)

Agrega tipi	28 günlük basınç dayanımı, MPa	
	Tip 10E-SF çimento	Tip 10 çimento
Kırılmış agrega	61.4	54.8
Yuvarlak agrega	53.6	49.7

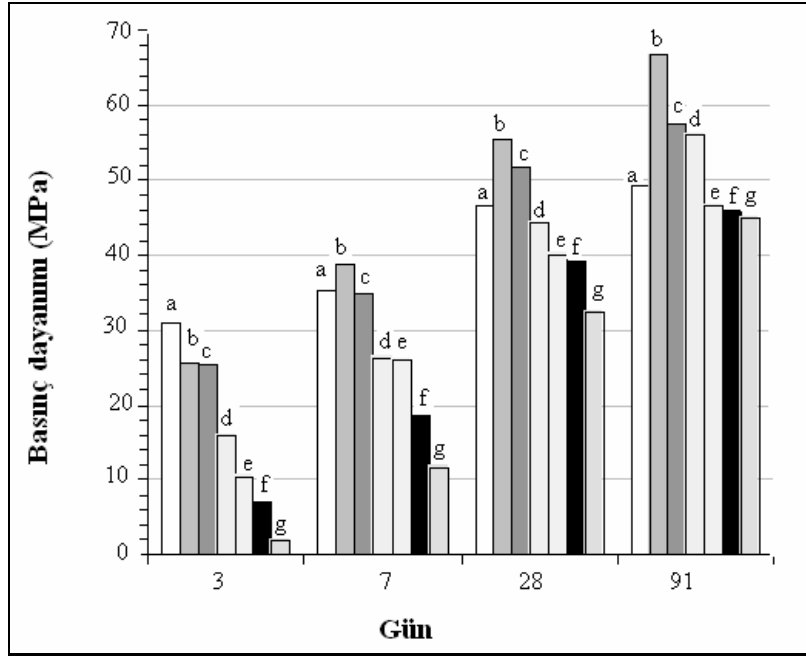
Değişik tip ve miktarlardaki (karışıma giren kuru malzemelerin ağırlıkça %10 ile %15’i arasında) bağlayıcı malzeme ile hazırlanan karışımlara ait 28 ve 200 günlük basınç dayanımları Şekil 3.7’de gösterilmiştir (PCA, 2004).



Şekil 3.7. Bağlayıcı tip ve miktarının SSB'nin basınç dayanımına etkisi (PCA, 2004)

Yüksek miktarda uçucu kül içeren (çimento yerine %40'ı aşan mertebelerde kullanılması) SSB karışımlarına ait basınç dayanımları Şekil 3.8'de, karışımlara ait bağlayıcı dozajları ise Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Erken yaşlarda uçucu küllü karışımların SSB'nin basınç dayanımını düşürdüğü ancak ileriki yaşlarda hidratasyon sonucunda uçucu külsüz karışımlarla aynı yada daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu; 91 günlük kür sonrasında ise %39 uçucu küllü (b) karışımın, uçucu külsüz (a) karışımına göre yaklaşık %35 daha

yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).



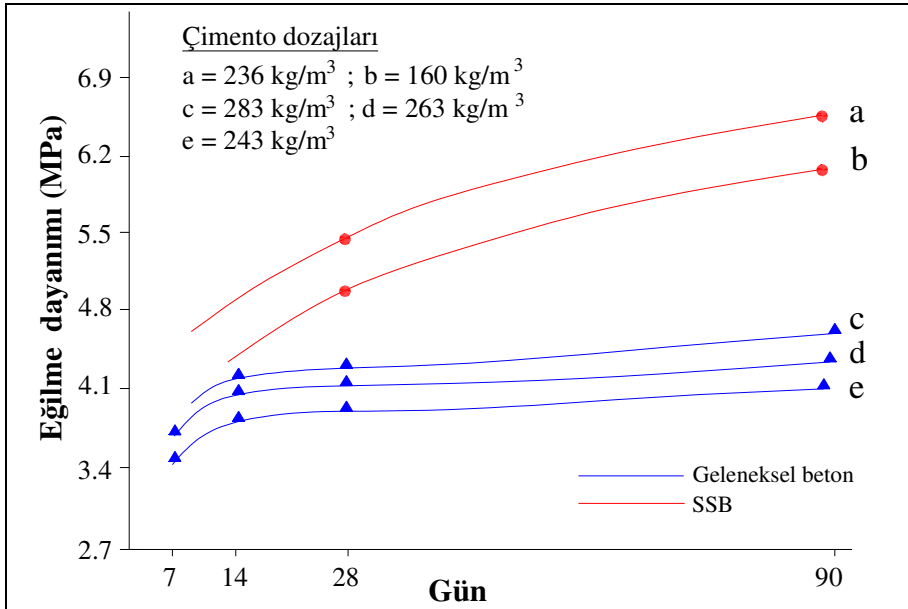
Şekil 3.8. Uçucu kül içeriğinin SSB'nin basınç dayanımına etkisi

Çizelge 3.3. Şekil 3.8'de gösterilen karışımların bağlayıcı dozajları

Karışım adı	Tip 10 çimento kg/m ³	Uçucu kül kg/m ³	Toplam bağlayıcı kg/m ³	Uçucu kül (%)
a	300	0	300	0
b	210	135	345	39
c	190	165	355	46
d	170	195	365	53
e	150	225	375	60
f	130	255	385	66
g	110	285	395	72

3.2.1.2. Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımı geleneksel beton kaplama dizaynında ve silindirle sıkıştırılmış beton kaplama dizaynında en önemli anahtar parametredir. Uygun dizayn edilmiş SSB karışımının eğilme dayanımı genel olarak geleneksel betonun eğilme dayanımından daha yüksektir. SSB'nin bu performansı direk olarak sıkışmış yoğun agregaların kullanılmasıyla ilişkilidir. Yoğun sıkışmış agregaların kullanılması ile çatlak artışına engel olunmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005). Şekil 3.9'de farklı çimento dozajlarına sahip geleneksel beton ve silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarına ait eğilme dayanımları gösterilmiştir. SSB'nin 28 günlük eğilme dayanımı 3.4 MPa ile 6.9 MPa arasında değişmektedir (Halsted, 2005).



Şekil 3.9. SSB ve geleneksel beton karışımlarına ait eğilme dayanımları

Eğilme dayanımı, genel olarak Denklem 3.2’de gösterilen formülle betonun basınç dayanımından tahmin edilebilmektedir.

$$f_e' = 0.6\sqrt{f_c'} \dots\dots\dots\text{Denklem 3.2}$$

Bu ampirik ilişki SSB için uygun görülmemektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar ile SSB’nin 28 günlük basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki Denklem 3.3’teki gibi geliştirilmiştir (Gauthier and Marchand, 2005).

$$f_e' = (f_c')^{0.459} \dots\dots\dots\text{Denklem 3.3}$$

Burada;

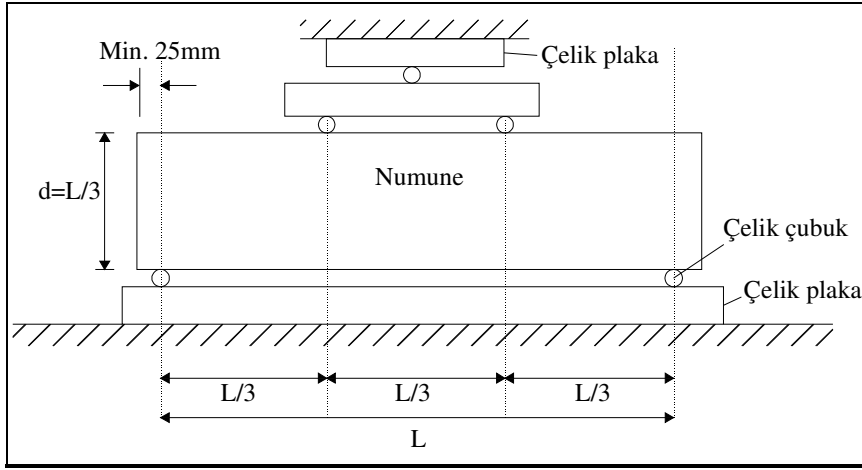
f_e' : SSB’nin 28 günlük tahmini eğilme dayanımı (MPa),

f_c' : SSB numunelerinin 28 günlük ortalama basınç dayanımını (MPa) ifade etmektedir.

Geleneksel betonun eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki oran genellikle 0.10 civarında iken SSB’de bu oran 0.12 ile 0.15 arasında olmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB numunelerinin eğilme dayanımı ASTM C 78 standardına göre tespit edilmektedir (PCA, 2004).

ASTM C 78’e göre beton kirişin oturtulduğu mesnetlerden L/3 uzaklıktaki iki noktadan yüklenmesi durumundaki deney yöntemi anlatılmaktadır. Bu yöntem ile çekme dayanımı, Denklem 3.4’te gösterilen formülle hesaplanmaktadır (Çivici ve Eren, 2004).



Şekil 3.10. Üçte bir noktalarından yüklenmiş kiriş eğilmede çekme deney düzeneği, (Çivici ve Eren, 2004)

$$f_e = \frac{PL}{bd^2} \dots\dots\dots \text{Denklem 3.4}$$

Burada;

P : maksimum yük (N),

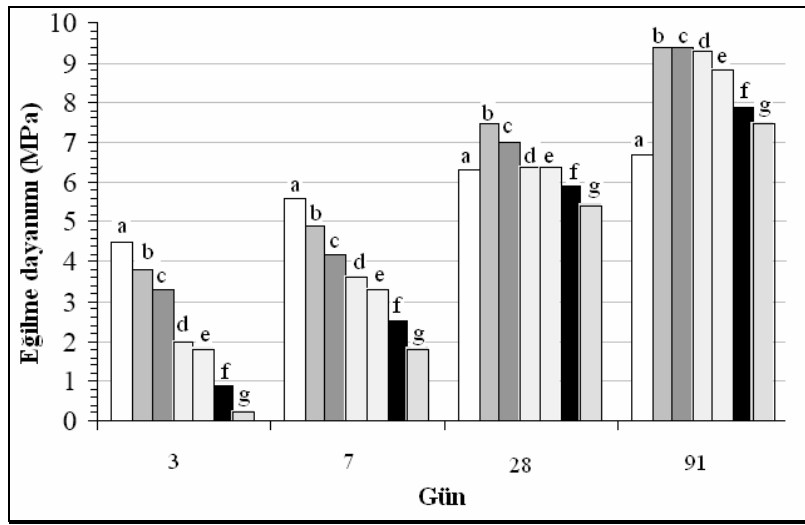
L : mesnetler arası mesafe (mm),

b : numunenin kesitteki genişliği (mm),

d : numunenin kesitteki yüksekliği (mm),

f_e : hesaplanan eğilme dayanımı (MPa)'dir.

Farklı miktarlarda uçucu kül içeren karışımların eğilme dayanımları Şekil 3.11’de, karışımlara ait bağlayıcı dozajları ise Çizelge 3.3’te gösterilmiştir. Burada; uçucu kül içeren bütün SSB karışımların 91 günlük eğilme dayanımının uçucu külsüz karışımlardan daha yüksek olduğu görülmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).



Şekil 3.11. Uçucu kül içeriğinin SSB’nin eğilme dayanımı üzerinde etkisi

3.2.1.3. Çekme dayanımı

SSB’nin çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki oran, bağlayıcı malzeme içeriğine, agrega kalitesine, su muhtevasına ve yaşa bağlı olarak %7 ile %13 arasında değişmektedir. Yüksek bağlayıcı malzeme dozajında, düşük su içeriğinde ve kırılmış kaba agregaların kullanılması durumlarında SSB’nin çekme dayanımı artmaktadır (Koçak, 1998).

Yarmada çekme testinin uygulaması direk çekme testine göre daha kolay olmaktadır. Aynı zamanda yarmada çekme testi, kuruma ve mikro çatlaklara karşı daha az hassas olduğundan bu test metodu ile daha istikrarlı değerler elde edilebilmektedir (USACE, 2000).

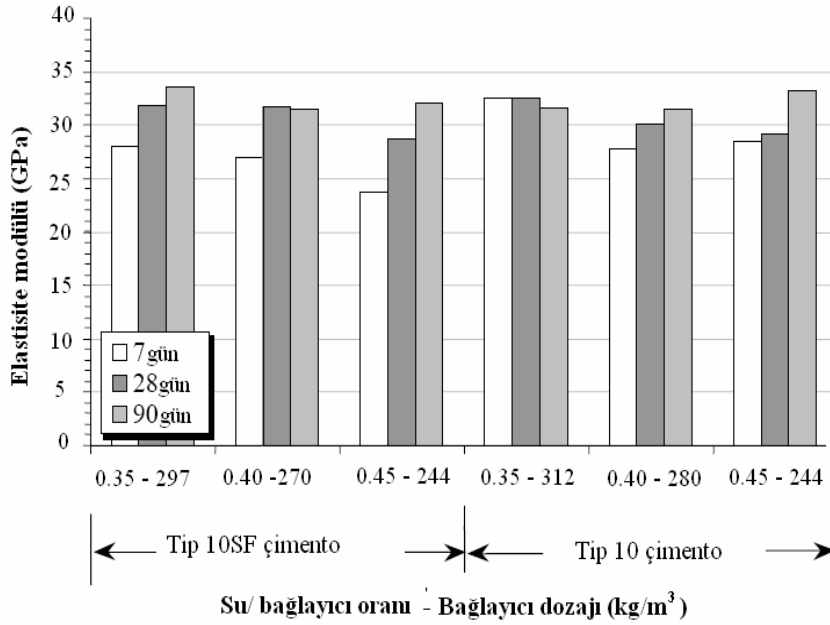
Delatte et.al (2003), ACI Committee 325'e göre SSB'nin 28 günlük yarmada çekme dayanımının 2.75 ile 4.14 MPa arasında değiştiğini belirtmiştir.

3.2.1.4. Elastisite modülü

Beton karışımında iki fazın (agrega ve hidrate olmuş çimento hamuru) özellikleri elastisite modülüne etki etmektedir. SSB'de kullanılan agrega miktarı hamur miktarına göre daha fazla olduğundan elastisite modülünde agregaların etkisi, bağlayıcı tipi veya su/bağlayıcı oranı gibi diğer parametrelerden daha fazla olmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB kaplamalarının 28 günlük elastisite modülleri 20 GPa ile 38 GPa arasında değişmektedir (Halsted, 2005).

Tip 10 (katkısız) ve Tip10SF (silis dumanı katkılı) çimentosuyla, 0.35, 0.40 ve 0.45 su/bağlayıcı oranlarında üretilen SSB karışımlarının farklı yaşlardaki elastisite modülü değerleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Şekil 3.12'de, SSB karışımlarının 28 günlük elastisite modüllerinin 30 GPa civarında olduğu görülmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).



Şekil 3.12. Farklı tip çimento ve S/B oranlarındaki SSB karışımlarına ait elastisite modülleri

3.2.1.5. Büzülme

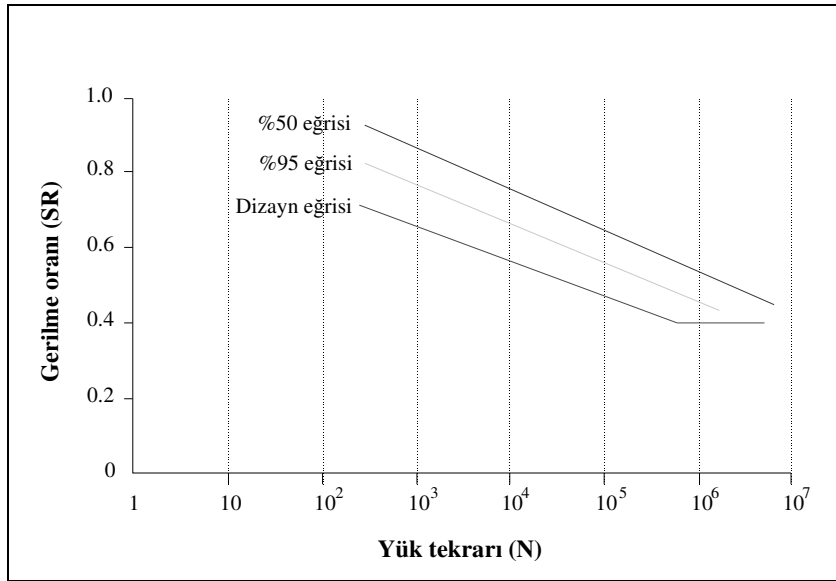
Kuruma büzülmesine neden olan esas etken S/B oranı ile agrega miktarıdır. S/B oranı arttıkça kuruma büzülmesi de artmaktadır. Agregalar, hamurda oluşan büzülme ve deformasyonları engellemektedir. Bu engellenme miktarı agreganın elastik özelliklerine bağlıdır. SSB’de agrega miktarı fazla olduğundan ve agregalar sıkışık bir şekilde bulunduğu için, agregaların kuruma büzülmesini azaltma etkisi, su/bağlayıcı oranının kuruma büzülmesini azaltma etkisinden daha fazladır. Geleneksel betonda, kuruma büzülmesi değeri 700 $\mu\text{m/m}$ ve üzeri bir değerde iken, tipik bir SSB karışımında maksimum kuruma büzülmesi 400 ile 500 $\mu\text{m/m}$ değerleri arasında değişmektedir. Ayrıca

çimento dozajının düşük olması da kuruma büzülmesini azaltmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

3.2.1.6. Yorulma davranışı

Geleneksel beton ve diğer mühendislik malzemeleri gibi SSB’de tekrarlanan yüklere maruz kaldığında, statik dayanımın daha altında bir taşıma gücü göstermektedir. SSB’de kritik gerilmeler; eğilme gerilmeleri ile kalınlık dizaynında kullanılan ve eğilme gerilmesine bağlı olan yorulma gerilmeleridir. Yorulmada bahsedilen gerilme oranı (SR), eğilme gerilmesinin eğilme dayanımına oranıdır. Örneğin, bir tekerlek yükünün neden olduğu eğilme gerilmesi 2.76 MPa, SSB kaplamanın eğilme dayanımı ise 4.48 MPa ise; gerilme oranı (SR) 0.62’dir (PCA, 1987).

Eğilme yorulması üzerinde yapılan araştırmalar, SSB’nin geleneksel betona benzer davranış sergilediğini göstermiştir. Şekil 3.13’de dört farklı SSB karışımı için kirişler üzerinde yapılan yorulma testi sonuçları gösterilmiştir. %50 eğrisi, araştırma verilerine uyan en uygun doğruyu, %95 eğrisi, araştırma verilerinin %95’ini kapsayan doğruyu göstermektedir. Bu eğrilerin altında kalan SSB dizayn eğrisi ise; Portland Cement Association’un karayolu ve havaalanları için önerdiği geleneksel beton dizayn prosedürü ile benzerlik sağlanması amacıyla kullanılmaktadır Bu dizayn eğrilerinden elde edilen veriler dizayn problemlerinde kullanılmak üzere Çizelge 3.4’te gösterilmiştir (PCA, 1987).



Şekil 3.13. SSB için yorulma ilişkisi (PCA, 1987)

Çizelge 3.4. SSB yorulma dizaynında kullanılan gerilme oranları ve müsaade edilebilir yük tekrarları (PCA, 1987)

Gerilme oranı	Müsaade edilebilir tekrar	Gerilme oranı	Müsaade edilebilir tekrar
0.41	465.000	0.56	9700
0.42	360.000	0.57	7500
0.43	260.000	0.58	5800
0.44	210.000	0.59	4500
0.45	165.000	0.60	3500
0.46	130.000	0.61	2700
0.47	100.000	0.62	2100
0.48	76.000	0.63	1600
0.49	59.000	0.64	1200
0.50	46.000	0.65	950
0.51	35.000	0.66	740
0.52	27.000	0.67	570
0.53	21.000	0.68	440
0.54	16.000	0.69	340
0.55	12.000	0.70	260

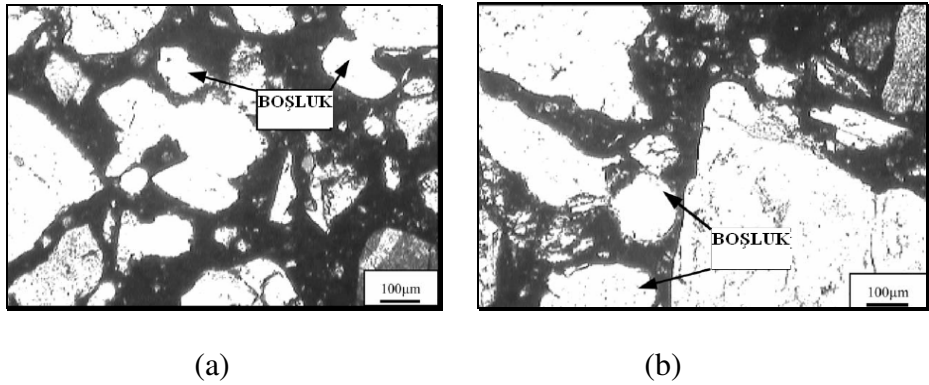
3.2.2. Durabilite

Betonun durabilitesi, zararlı maddelerin betonun boşluklu yapısına nüfuz etmesine karşı gösterdiği dirence bağlıdır. Hidrate olmuş çimento hamurunda bulunan boşlukların dağılımı kadar toplam porozite de betonun durabilitesini önemli ölçüde etkilemektedir. SSB karışımı geleneksel betona nazaran daha az çimento hamuru içerir. Bu düşük hamur içeriği, malzemenin iç yapısında iki önemli etki yaratmaktadır. Birincisi; kuru kıvamdaki SSB’de karıştırma suyunun dağılmasındaki zorluktan dolayı hamur fazı yayılımının geleneksel betona kıyasla daha az homojen olması, diğeri ise; donma çözünme direncine etkisi olan kompaksiyon boşlukları içermesidir. Sıkıştırma boşluklarının birbirine bağlı bir form oluşturması betonun durabilitesini tehlikeye sokar. Ancak sıkıştırma boşlukları yeterli küçüklükte ve iyi dağılmışsa bu boşluklar betonun durabilitesinde olumlu rol oynayabilir (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB kaplamalar gibi beton yapılar, kış koşullarında donma çözünme tekrarı sonucunda genellikle iki tip hasara maruz kalabilirler. Bunlar; iç yapıda mikroçatlakların oluşması ve kabuk atmasıdır. Bazı durumlarda her iki hasar aynı anda da oluşabilmektedir. SSB karışımı, donma çözünme tekrarı sonucunda oluşabilecek bu etkilere karşı dayanıklı olacak şekilde dizayn edilmelidir. Donma çözünme etkisine maruz kalan betonlarda boşluk şekline bakmaksızın, uygun hava-boşluk sisteminin yer alması mikroçatlaklara karşı yeterli bir koruma sağlayabilmektedir. SSB’de kompaksiyon boşlukları, boşluklar arası mesafe ve boyutları önemli faktörlerdir. Eğer kompaksiyon boşlukları iyi

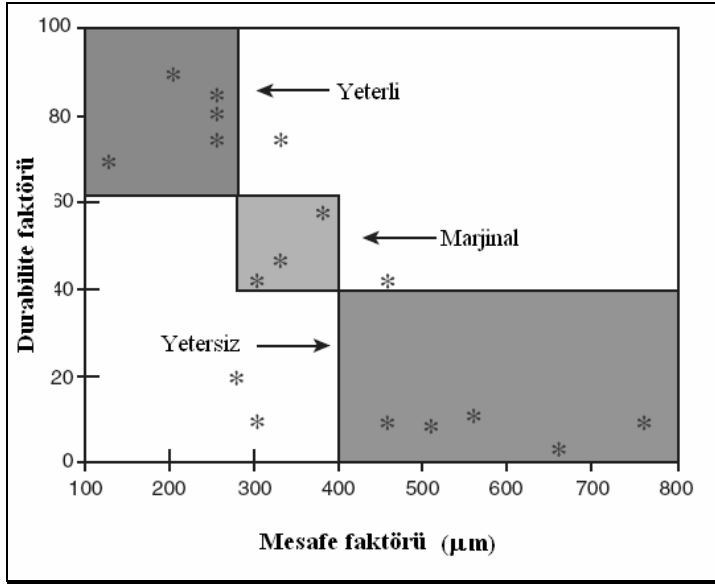
dağılmışsa, birbirleri ile bağlantılı değilse ve yeteri kadar küçükse SSB dona karşı dayanıklı olmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

Geleneksel betondaki küresel hava boşluklarından farklı olan SSB'deki düzensiz şekilli kompaksiyon boşlukları Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Bu kompaksiyon boşluklarının sürekli olmayışından yada boşluklar arası mesafenin yakın olmayışından dolayı, SSB'nin geçirgenliği geleneksel betona kıyasla daha düşük olabilmektedir (Gao et. al., 2006).



Şekil 3.14. Kompaksiyon boşluklarının optik mikroskop görüntüleri (a) SSB için, (b) Geleneksel beton için (Gao et.al., 2006)

SSB'nin dona dayanıklılığı esas olarak hava boşluk mesafe faktörüne bağlıdır. Şekil 3.15'ten görüldüğü gibi betonun iyi bir durabiliteye sahip olabilmesi için bu değerin 250 µm'nin altında olması gerekmektedir (PCA, 2004).



Şekil 3.15. Durabilite faktörü ile boşluklar arası mesafe faktörü ilişkisi (PCA, 2004)

Çalışmalar, %97 ve daha altı sıkıştırma derecelerine sahip olan SSB kaplamalarda kompaksiyon boşlukları oluştuğu için dona dayanıklılığının yeterli olmadığını göstermiştir. Eğer SSB karışımı uygun dizayn edilmiş ve %100 sıkışma oranında (referans ıslak birim ağırlığa oranı) sıkıştırılmış ise dona direnci yeterli olmaktadır. Ayrıca, silis dumanı kullanılması da SSB'nin dona dayanıklılığını artırmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

Pigeon and Marchand (1996), 50 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda numuneler ile değişik S/B oranlarında, silis dumanı içeriklerinde, kür tekniklerinde ve çimento inceliklerinde SSB'nin permeabilitesini ölçmüş, SSB'nin geleneksel kütle betonlarına kıyasla daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğunu göstermiştir. Silis dumanı ve

daha ince çimento kullanıldığında permeabilite katsayısının düştüğü gözlemlenmiştir (Tarun et. al., 2001).

Ghafoori ve Zhang (1995)'ın yaptığı bir çalışmada, %20-%40 aralığında çimento yerine düşük kalsiyumlu uçucu kül kullanılması sonucunda SSB'nin sülfata karşı direncinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, karışımlarda ince kum yerine %10-20 oranlarında F sınıfı uçucu kül kullanımının, SSB'nin sülfat direncini ve basınç dayanımını arttırdığı belirtilmiştir (Tarun et. al., 2001).

Cannon (1993)'e göre donma-çözünmeye karşı yüksek direnç gösteren bir SSB elde etmek için karışım oranları optimum olmalı ve yüksek sıkıştırma enerjisi düzeyinde hava sürükleyici katkı kullanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmelidir (Tarun et. al., 2001).

Marchand ve arkadaşları (1997), Rollings (1988), Prusinski (1997), Liu (1991) ve Gagne (1999) tarafından yapılan arazi gözlemlerinde, SSB kaplamalarının soğuk iklimlerde yeterli performans sergilediğini bildirilmiştir (Tarun et. al., 2001).

Portland Cement Association (1994)'a göre; hava sürükleyici katkı kullanmadan hazırlanan SSB karışımlarının 28 günlük basınç dayanımlarının 51 ile 59 MPa arasında değiştiği ve ASTM C 672'ye göre 35 donma-çözünme tekrarı sonucunda şiddetli hasara uğradığı; hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan SSB karışımlarının ise 28 günlük basınç dayanımlarının 32 ile 53 MPa arasında değiştiği ve ASTM C 672'ye göre 80 donma-çözünme tekrarı sonucunda orta seviyede hasara uğradığı bildirilmiştir (Tarun et. al., 2001).

3.2.2.1. SSB'nin yüzey özellikleri

Piggott (1999)'a göre yüzey dokusu görünüşünde agrega tipi ve boyutu önemli rol oynamakta olup maksimum dane çapı daha küçük olan agregaların kullanılmasıyla daha sıkı bir yüzey dokusu elde edilebilmektedir (Delatte et.al., 2003).

Daha pürüzsüz SSB kaplama yüzeyi elde etmek için asfalt kaplama makineleri kullanılmaktadır. SSB kaplamalar otoyollar hariç her tip trafik yükünü taşıyabilmektedir. SSB kaplamalar genellikle hız limitinin 55-65 km/sa'ten az olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Ayrıca SSB kaplamanın üzerine asfalt kaplama yapılarak da yüzey düzgünlüğü sağlanmakta ve hız limiti artabilmektedir (Piggott 1999; Delatte et.al.'dan 2003).

Şekil 3.16'da sıkışmış SSB kaplamasının üst yüzeyine ait bir görünüş gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Sıkışmış SSB numunesinin üst yüzeyine ait bir görünüş

Silindirle sıkıştırılmış beton hakkında geçmişte yapılmış bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Qasrawi ve arkadaşları (2005), yaptıkları çalışmada, sıcak hava koşullarında yerel malzemeleri kullanarak silindirle sıkıştırılmış beton kaplamasının optimum karışım oranlarını incelemiştir. Deneyde, maksimum tane çapı 20 mm olan ve Kanada gradasyon limitlerini sağlayan agregalar ile 250-315 kg/m³ arasında değişen miktarlarda normal portland çimentosu kullanılarak;

- beş farklı su/bağlayıcı oranında (0.30, 0.35, 0.40, 0.45 ve 0.50),
- dört farklı toplam agrega/çimento oranında (5.4, 5.8, 6.4 ve 7.0),
- iki farklı kaba agrega/ince agrega oranında (1.00 ve 1.40),
- toplam üç farklı sıkıştırma enerjisi seviyesinde (50, 100 ve 150 vuruş sayısı),

SSB karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan SSB karışımları 400/100/100 mm ayrıtlı prizmatik kalıplara California Kneading Compactor ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Kiriş numunelerin üzeri 24 saat ıslak çuvallarla örtüldükten sonra, 28 gün standart koşullarda kür edilmiş, ASTM C683'e göre eğilme dayanımları ölçülmüş, eğilme dayanımları ölçülen kiriş numunelerden 100/100/100 mm ayrıtlı örnekler kesilerek yine aynı gün basınç dayanımları test edilmiştir. Yazarlar, normal ve soğuk hava koşullarında üretilen SSB karışımlarına ait S/B oranlarının 0.30 ile 0.40 arasında değiştiğini ancak sıcak hava koşullarında üretilen SSB karışımlarına ait S/B oranlarının 0.40 ile 0.50 arasında daha uygun sonuçlar verdiğini göstermiştir. Zemin sıkıştırma

metodu kullanılarak, SSB kaplama karışımlarının başarıyla oranlanabildiğini, optimum birim ağırlığın karışım dizaynı hedefi olarak dikkate alındığını, su/bağlayıcı oranı 0.45 olan karışımlarda optimum birim ağırlık ile optimum çekme dayanımlarının elde edildiğini, bu oranda çekme dayanımının birim ağırlığa oranının en yüksek değeri aldığını göstermiştir. Çimento içeriği ile çekme dayanımı arasında lineer bir ilişki olduğunu, karışım oranları bilindiği takdirde betonun çekme dayanımının Denklem 3.5'te gösterilen formül ile tahmin edilebileceğini söylemektedirler.

$$f_t = \left[\begin{array}{l} 7.44 - 1.18(TA/\zeta) + 1.81 \sin \left[\left(\frac{S/\zeta - 0.30}{0.15} \right) \times \frac{\pi}{2} \right] \\ + 1.94(KA/\dot{A}) + 0.0059N \end{array} \right] \dots\dots\dots \text{Denklem 3.5}$$

Burada;

TA/Ç : toplam agregâ/ çimento oranını,

S/B : su/ çimento oranını,

KA/Ā : kaba agregâ/ ince agregâ oranını,

N : numuneyi sıkıştırmak için gerekli vuruş sayısını,

f_t : betonun çekme dayanımını (MPa), ifade etmektedir.

SSB kaplamaların basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki ilişkinin ACI 325.10'da gösterilen ilişkiye benzemekte olduğunu ancak çekme dayanımlarının ACI 325.10'da belirtilen değerlerden biraz daha düşük değerler aldığı gösterilmiştir. Geleneksel betonun aksine; S/B oranının optimum değerin (0.45) altına düşmesinin betonun dayanımında

artışla sonuçlanmayacağını, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini kontrol etmede çimento içeriğinin ana rol oynadığını söylemektedirler.

Atiş (2001), yaptığı çalışmada uçucu kül içeren SSB'lerin özelliklerini incelemiştir. Deneyde, normal portland çimentosu ağırlıkça %0, 50 ve 70 oranlarında iki farklı F sınıfı uçucu kül ile (standartlara uygun Drax uçucu külü ile standartlara uymayan ve kızdırma kaybı yüksek olan Aberthaw uçucu külü) yer değiştirmiş ve beş farklı karışım elde edilmiştir. Uçucu kül kullanılmadan hazırlanan örnek kontrol numunesi olarak belirlenmiştir. Deneyde, tane dağılımı İngiliz standardı BS812'ye göre M bölgesine düşen maksimum tane çapı 10 mm olan, kırılmamış- temiz, kuvarsitik doğal agrega kullanılmış, su/bağlayıcı oranları 0.29 ile 0.40 arasında değişen karışımlar üretilmiştir. Üretilen betonlara ait karışım suyu miktarları maksimum sıkışabilirlik için optimum su içeriğini veren Cabrera Sarsma Çökmesi deneyi ile bulunmuştur. Beton basınç dayanımları bir kenarı 100 mm olan küp numunelerden elde edilmiş olup, eğilme-çekme dayanımları 100/100/500 mm ayrıtlı prizmatik numunelerden, yarmada çekme dayanımları ise çapı 150/300 mm ayrıtlı silindir numunelerden elde edilmiştir. Basınç ve eğilme-çekme dayanımları 1, 3, 7, 28 gün, 3, 6 ay ve 1 yıl sonunda alınmış olup, silindir yarma deneyi sonuçları sadece 7 ve 28 inci günlerde alınmıştır. Beton küp, silindir ve prizma numunelerin hazırlanması sarsma masası üzerinde sarsma ile gerçekleştirilmiştir. Yazar, uçucu kül içeren SSB numunelerinin erken yaşta oldukça yüksek yada yeterli dayanım gelişmesi gösterdiğini, uçucu kül içeren SSB numunelerinin dayanım özellikleri arasındaki ilişkinin normal betonun ilişkisine benzediğini gözlemlemiştir. Ayrıca çimentonun %50 oranında

uçucu kül ile yer değiştirmesi sonucunda, kontrol betonunun dayanımına eşdeğer yada daha yüksek dayanım elde etmenin olası olduğunu, iki uçucu külün kullanımıyla üretilen betonların, çimentonun %70 gibi çok yüksek oranda yer değiştirmesi sonucunda dahi, oldukça doyurucu dayanımlar gösterdiği sonuçlarına varmıştır. Standartlara uygun olmayan Aberthaw uçucu külü yada benzeri endüstriyel mineral atıkların uygun tasarım yöntemi ile çimento ile kısmen yer değiştirebileceği izlenimi oluştuğunu, uçucu kül içeriğinde bulunan kızdırma kaybının karışım suyu miktarını artırdığı dolayısıyla beton performansında kayıplar oluşturduğunu söylemektedir. Uçucu külün çimento ile kısmen yer değiştirmesinin, çevre ve ekonomi açısından önemli olduğunu belirtmiş, beton yol kaplamalarında önem taşıyan rötire, aşınma ve hidratasyon ısısı gibi özellikleri açısından SSB'nin yol kaplamasında kullanılabileceği kanaatine varmıştır.

Sun ve arkadaşları (1998), yaptıkları çalışmada uçucu külün SSB'nin yorulma performansına etkisini incelemiştir. Deneyde, ince agrega olarak incelik modülü 2.4 olan nehir kumu, kaba agrega olarak ise maksimum tane çapı 20 mm olan kırılmış dolomit taşı kullanılmıştır. Normal portland çimentosunun yerine %0, 15, 30 ve 45 oranlarında uçucu kül kullanarak dört farklı karışım hazırlanmıştır. 100/100/400 mm ayrıtlı prizmatik kalıplara yerleştirilen numuneler, 2 dakika boyunca 50 g/cm²'lik basınç yüküyle sarsılarak sıkıştırılmıştır. Kalıptan çıkarıldıktan sonra numunelere 28 ve 90 gün boyunca, 20 °C sıcaklıkta %95 bağıl nemde kür uygulanmıştır. Deneyde, yükleme frekansı 5-8 Hz arasında olan, dört nokta eğilme test metodu kullanılmıştır. Yükleme tekrar sayısı 10⁶'ya ulaştıktan sonra test, numune kırılıncaya kadar

devam ettirilmiştir. Gerilme oranı, eğilmede yorulma dayanımının eğilme dayanımına oranı olarak ifade edilmiştir. Yorulma denklemleri, farklı gerilme oranlarındaki 300'den fazla numunenin ölçülmesiyle elde edilen test sonuçlarının regresyonu ile elde edilmiştir. Yazarlar, yorulma sayıları aynı kalmak koşulu ile, normal SSB ve yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB karışımlarının geleneksel betonla kıyaslandığında mükemmel bir düzeyde yorulma performansı sergilediğini, normal SSB ve yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB'ler için elde edilen ve Denklem 3.6'da gösterilen yorulma denklemlerinin pratik olarak ölçülen sonuçlarla uyduğunu ve bu denklemlerin %0-45 arasında uçucu kül içeren SSB'lerin kaplama dizaynında kullanılabileceğini ifade etmiştir.

$$n = 0.94 - (0.0693 + 0.006F_a) \log N \dots\dots\dots \text{Denklem 3.6}$$

Burada;

n : gerilme oranı,

F_a : uçucu kül yüzdesi,

N : yorulma tekrar sayısı olarak gösterilmiştir. Uçucu kül kullanımının, SSB yorulma performansına olumlu etkisinin ana faktörünün uçucu külün puzolanik reaktivitesinden, mikro-agrega etkisinden ve silindirle sıkıştırma teknolojisi kullanılarak üretilen yoğunluk bileşim etkisinden kaynaklandığı belirtilmiştir. SSB boşluk yapısının, silindirle sıkıştırma teknolojisinde bileşen etkisiyle ve farklı miktarlarda uçucu kül kullanımı ile gelişebileceğini dolayısıyla yorulma dayanıklılığının ve yorulma yükü kapasitesinin artabileceği sonucuna varılmıştır.

Hassani ve Saghafi (2006), yaptıkları çalışmada silis dumanı kullanılarak hazırlanan silindirle sıkıştırılmış betonların basınç dayanımı ve permeabilitesini incelemiştir. Deneyde maksimum tane çapı 19 mm olan agregalar ile Tip I portland çimentosunun yerine ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20, 25, 40 ve 60 oranlarında silis dumanı kullanılarak sekiz farklı karışım elde edilmiştir. Örnekler 150/150/150 mm ayrıtlı prizmatik hacimde hazırlanmıştır. Numuneler üç eşit kademede ve her kademede 457 mm yükseklikten 4.5 kg ağırlığında tokmağın düşürülmesi ile Modifiye proktor testine uygun olarak sıkıştırılmıştır. Örnekler 42 gün kür uygulanmıştır. Yazarlar, silis dumanı kullanımının SSB'nin basınç dayanımı ve permeabilitesi gibi mekanik özelliklerini geliştirdiğini, çimentonun yerine ağırlıkça %25 oranında silis dumanı kullanılmasının basınç dayanımını yaklaşık %50 arttırdığını ve permeabilitesini ise %30 azalttığını gözlemlemiştir. Çimentonun yerine ağırlıkça %25 oranından fazla miktarlarda silis dumanı kullanılmasının basınç dayanımında azalmaya, permeabilitede ise artışa sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Silis dumanı kullanımının SSB'nin işlenebilirliğini azalttığı, bunun önlemi alınırrsa basınç dayanımını arttırabileceği sonucuna varılmıştır.

Atiş ve arkadaşları (2004), yaptıkları çalışmada standart olmayan yüksek miktarda kalsiyum içeren uçucu külün silindirle sıkıştırılmış betonun dayanım özelliklerine etkisini incelemiştir. Deneyde, maksimum tane çapı 16 mm olan kırılmamış dere malzemesi kullanılmıştır. Afşin-Elbistan termik santralinden elde edilen yüksek miktarda kalsiyum ve sülfat içeren C sınıfı uçucu kül, ağırlıkça %0, 15, 30 ve 45 oranlarında normal portland çimentosu yerine kullanılarak, 3 farklı çimento/agrega oranında (1:10.5, 1:6.5, 1:4.5) toplam 12 adet karışım hazırlanmıştır.

Hazırlanan karışımların optimum su içeriği sarımsı slamp ile belirlenmiştir. Beton basınç dayanımları bir kenarı 100 mm olan küp numunelerden elde edilmiş olup, eğilme-çekme dayanımları 100/100/500 mm ayrıtlı prizmatik numunelerden, yarıma çekme dayanımları ise çapı 150/ 300 mm ayrıtlı silindir numunelerden elde edilmiş ve örneklere 1, 3, 28 ve 90 gün boyunca 20°C sıcaklıkta kür uygulanmıştır. Yazarlar, uçucu küllü silindirle sıkıştırılan betonlarda erken yaşlarda (3 gün gibi) dayanım gelişmesinin çok iyi olduğu, çimento yerine %15 uçucu kül kullanılarak hazırlanan SSB karışımlarının 28 günlük dayanım özelliklerinin uçucu külsüz SSB'den daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Çimento yerine %30 uçucu kül kullanılarak hazırlanan SSB karışımlarının 90 günlük dayanım değerlerinin kontrol numuneleri ile hemen hemen aynı değerlere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca Afşin-Elbistan uçucu külünün yol kaplamalarında kullanımının alternatif olarak görüldüğü sonucuna varılmıştır.

Gao ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve MgO içeren genleştirici katkı ile hazırlanan SSB'nin donda dayanıklılığını ve hava boşluk karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneyde, ince agrega olarak incelik modülü 2.5 olan, iyi gradasyonlu, yuvarlak şekilli, silisli kumu, kaba agrega olarak ise maksimum tane boyutu 20 mm olan iki tip (2.5/10 mm ile 10/20 mm) kırma kireç taşı kullanılmıştır. Toplam bağlayıcı malzeme miktarı 200 kg/m³ olacak şekilde uçucu kül ağırlıkça %50 oranında kimyasal bileşimi C₃S: %50.77, C₂S: %21.57, C₃A: %3.06 ve C₄AF: %16.28 olan ve 3, 7 ve 28 günlük dayanımları sırasıyla 30.4, 44.0 ve 60.2 MPa olan Çin 525[#] Portland çimentosu yerine kullanılmıştır.

Üç tip MgO içeren genleşme katkısı 4, 8 ve 12 kg/m³ oranlarında kullanılarak toplam 10 adet karışım elde edilmiştir. MgO kullanılmadan hazırlanan numuneler kontrol numunesi olarak belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı da kullanılarak su/bağlayıcı oranları 0.48 olan betonlar, 100 mm ayrıtlı küp kalıplara 50 Hz frekansta ve 20 kg sürşarj yükte sarsılarak yerleştirilmiştir. Örnekler 20 °C sıcaklıkta ve %90 bağıl nemde 48 saat bekletildikten sonra kalıplardan sökülerek, 20±2 °C sıcaklıktaki suda 28 gün boyunca kür edilmiştir. Numuneler kür edildikten sonra ASTM C666 (A)'ya ve Çin Ulusal Standardı SD 105-82'ye uygun olarak 300 tekrarlı donma çözünme testine tabi tutulmuş ve dayanımlar ile kütle kayıpları ölçülmüş, optik mikroskopla mikro-yapı ve hava boşluk mesafe faktörü incelenmiştir. Yazarlar, genleştirici katkı içeriği %0'dan %4 ve %8'e yükseldiğinde dayanım ve kütle kaybının azaldığını, genleştirici katkı içeriği %8'den %12'ye yükseldiğinde ise dayanım ve kütle kaybının arttığını gözlemlenmiştir. Geleneksel betondaki gibi SSB'de de dayanım kaybı oranı ile kütle kaybı oranı arasında lineer bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Uçucu küllü ve su azaltıcı katkı içeren SSB'nin boşluklar arası mesafe faktörünün 0.4 mm'den az olduğu durumlarda dona karşı dayanıklılığının çok yüksek olduğunu belirtilmiştir. SSB'deki düzensiz şekilli kompaksiyon boşluklarının birbirine yakın ve sürekli olmadığı, geleneksel betondaki küresel şekilli hava boşluklarından farklı olduğu gözlemlenmiştir. SSB'nin geçirgenliğinin geleneksel betona kıyasla daha düşük olabileceği sonucuna varılmıştır. Optimum miktarda uçucu kül, su azaltıcı katkı ve agrega içeren SSB karışımlarının büyük vibrasyonlu

silindirlerle sıkıştırılması sonucunda dona dayanıklılığının artacağı sonucuna varılmıştır.

Pigeon ve Malhotra (1995), yaptıkları çalışmada yüksek miktarda uçucu kül içeriğine sahip silindirle sıkıştırılmış betonun dona dayanıklılığını incelemiştir. Deneyde, maksimum tane çapı 20 mm olan kırılmış kireçtaşı kaba agrega olarak, incelik modülü 2.5 olan granitik dere kumu ise ince agrega olarak kullanılmıştır. Hava sürükleyici katkı olarak sentetik deterjan, su azaltıcı katkı olarak ise lignosülfonat tipi kullanılmıştır. F sınıfı uçucu kül, Kanada standartlarına uygun, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 22.4, 27.4 ve 35.1 MPa olan Tip-10 çimento yerine %63 oranında kullanılmıştır. Hava sürüklenmiş, hava sürüklenmemiş olmak üzere ve %12 ile %15 bağlayıcı malzeme içeriklerinde olmak üzere toplam dört farklı karışım hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda kaba agreganın ince agregaya oranı 60:40 alınmıştır. Her karışım için dört farklı su muhtevasında deneme karışımları hazırlanmış, ASTM D 1557'ye uygun olarak Modifiye Proktor testi ile sıkıştırılan karışımların kuru birim ağırlıkları ölçülmüştür. En yüksek kuru birim ağırlık değerine denk gelen su miktarları seçilmiştir. Bütün numuneler 23 °C sıcaklıkta ve % 100 bağıl nemde 28 gün kür edilmiştir. Basınç dayanımları, 50/100mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde, donma-çözünme testleri 150/300 mm ayrıtlı silindir numunelerden 100/75/300 mm ayrıtlı prizmatik numuneler kesilerek elde edilmiştir. Kapiler absorpsiyon testi ASTM C 642'ye uygun olarak, donma-çözünme testi ise ASTM C 666'ya uygun olarak yapılmıştır. Yazarlar, test edilen dört karışımda 300 tekrar sonrasında boy değişimi 600 µm'den daha düşük olduğu için genel olarak tüm karışımların dona

dayanıklı olduğunu, ancak yüksek hacimde uçucu kül içeren hava sürüklenmiş SSB karışımlarının, donma-çözünmeye dayanıklılığının daha mükemmel olduğu sonucuna varmıştır. %15 bağlayıcı içeriğine sahip olan karışımların basınç dayanımlarının %12 bağlayıcı içeriğine sahip olan karışımlardan daha yüksek olduğu, her iki karışımda da hava sürükleyici katkı bulunması halinde daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği, %15 bağlayıcı içeriğine sahip ve hava sürükleyici katkı kullanılmış olan karışımda permeabilite katsayısının ($\sim 10^{-9}$ m/sn) diğer üç karışımın permeabilite katsayısından ($\sim 10^{-13}$ m/sn) belirgin bir şekilde yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Nipatsat ve Tangtermsirikul (2000), yaptığı çalışmada uçucu kül içeren normal betonların ve özel betonların basınç dayanımını tahminlemek amacıyla, karışıma giren malzemelerin kimyasal bileşenlerini kullanarak bir matematiksel bağıntı elde etmeye çalışmıştır. Silindirle sıkıştırılmış beton için formülüze edilen model 91 günlük basınç dayanımını vermekte olup; Denklem 3.7 ve Denklem 3.8’de gösterilmiştir.

$$f_{c91} = \left[(46.568 \left[\frac{w}{b} \right]^{-0.54} (\log C - 1.7) \right] - \left[37.153 \frac{w}{b} \right] + 37.022 \dots \dots \dots \text{Denklem 3.7}$$

$$C = \frac{w_{fa} \cdot (CaO)_{fa} + w_{ce} \cdot (CaO)_{ce}}{100} \dots \dots \dots \text{Denklem 3.8}$$

Burada;

f_{c91} : SSB’nin 91 günlük tahmini basınç dayanımı (MPa),

w/b : su/bağlayıcı oranı,

w_{fa} , w_{ce} : uçucu kül ve çimento miktarı (kg/m^3),
 $(\text{CaO})_{fa}$, $(\text{CaO})_{ce}$: uçucu kül ve çimentodaki kalsiyum oksit miktarı (%),
 C : uçucu kül-çimento karışımındaki toplam CaO içeriği (kg/m^3) olarak ifade edilmiştir.

SSB'nin diğer yaşlardaki basınç dayanımını veren formül Denklem 3.9 ve Denklem 3.10'da gösterilmiştir.

$$f_{ct} = \frac{\phi_t \cdot f_{c91}}{\phi_{91}} \dots\dots\dots \text{Denklem 3.9}$$

$$\phi(t) = \left[\begin{array}{l} \log(t+1) \left\{ 0.1473 \exp\left(0.5443 \frac{w}{b}\right) \cdot \ln\left(\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO}}\right) + 0.1482 \ln\left(\frac{w}{b}\right) + 0.5879 \right\} \\ + \ln\left(\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO}}\right) \left\{ 0.2118 \left(\frac{w}{b}\right) - 0.4233 \right\} - 0.4529 \ln\left(\frac{w}{b}\right) - 0.3438 \end{array} \right] \dots\dots \text{Denklem 3.10}$$

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO}} = \frac{r \cdot (\text{SiO}_2)_{fa} + (1-r) \cdot (\text{SiO}_2)_{ce}}{r \cdot (\text{CaO})_{fa} + (1-r) \cdot (\text{CaO})_{ce}} \dots\dots\dots \text{Denklem 3.11}$$

Burada;

f_{ct} : SSB'nin t günlük tahmini basınç dayanımı (MPa),

ϕ_t : t 'nci yaşta dayanım kazanma oranı,

r : uçucu külün çimento ile yer değiştirme oranı (%)

(SiO_2) : uçucu kül-çimento karışımındaki toplam SiO_2 içeriği (kg/m^3),

$(\text{SiO}_2)_{fa}$, $(\text{SiO}_2)_{ce}$: uçucu kül ve çimentodaki SiO_2 içeriği (%)'dir.

Atiş (2005), yaptığı çalışmada yüksek miktarda uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılmış betonların dayanım özelliklerini ve kr koşullarının etkisini incelemiştir. Deneyde, 2 farklı düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu kül %0, 50 ve 70 oranlarında normal portland imentosu yerine kullanılarak su/bağlayıcı oranları 0.28 ile 0.43 arasında değişen beton karışımları hazırlanmıştır. Deneyde kullanılan agregaların maksimum tane çapı 10 mm olup, kaba ve ince agregalar olarak kırılmamış, temiz ve doğal kuvarsitik agregalar kullanılmıştır. Normal portland imentosu, kum ve çakılın ağrılıka oranları 1:1.5:3 olup, imento miktarı 400 kg/m^3 'tür. Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak işlenebilir karışımlarda üretilmiştir. Karışımın su miktarının tayini için sarsma çökmesi testi uygulanmıştır. Karışımların dört adedi standartlara uygun olan Drax uçucu külü ile (2 adedi süper akışkanlaştırıcı katkılı, 2 adedi katkısız), dört adedi standartlara uygun olmayan Aberthaw uçucu külü ile (2 adedi süper akışkanlaştırıcı katkılı, 2 adedi katkısız), iki adet ise kontrol karışımı (1 adedi süper akışkanlaştırıcı katkılı, diğerisi katkısız) olmak üzere toplam 10 karışım hazırlanmıştır. 100 mm ayrıtlı numuneler basınç dayanımı için, 100/100/500 mm ayrıtlı prizmatik numuneler eğilme dayanımı için, 150/300mm ayrıtlı silindir örnekler ise yarmada çekme dayanımı için hazırlanmış, bütün test örnekleri 1 gün kalıpta kaldıktan sonra 20 C sıcaklıkta %65 ve %100 bağıl nemde 1, 3, 7, 28 gün, 3, 6 ay ve 1 yıl boyunca kr edilmiştir. Yazar, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile işlenebilir SSB elde edilebildiğini, standartlara uygun olmayan ve kızdırma kaybı değerisi yüksek olan Aberthaw uçucu külünün betonun su ihtiyaını arttırdığı, bunun yanında standartlara uygun olan Drax uçucu külünün ise betonun su ihtiyaını azalttığını bunun sonucunda Drax

uçucu küllü karışımların dayanım değerlerinin daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Geleneksel betonla kıyaslandığında yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB karışımlarının tatmin edici veya daha yüksek basınç ve çekme dayanımlarına sahip olduğunu göstermiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışımların katkısız karışımlara göre 1 günde daha düşük dayanım gelişmesi olduğunu ancak 3 gün ve sonraki yaşlarda düşük dayanım kazanma hızının kaybolduğunu belirtmiştir. Yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB karışımlarının geleneksel betona kıyasla kuru kür koşullarına daha hassas olduğunu söylemektedir. Kür koşullarının etkisi verimlilik faktörü ile ifade edilmiş ancak verimlilik faktörünün sabit bir değer almadığı, kür zamanına, kür koşullarına ve uçucu kül içeriğine göre değiştiği sonucuna varmıştır. %50 oranında çimento yerine kullanılan Drax uçucu küllü karışımın dayanım gelişmesi daha yüksek iken %70 oranındaki Drax uçucu külünün dayanım kazanma hızının orta seviyede olduğunu, %50 oranında çimento yerine kullanılan Aberthaw uçucu külünün 28 günlük dayanım kazanma hızının kabul edilebilir düzeyde olduğunu ve 1 yılda ise yüksek dayanımlar elde edildiğini göstermiştir.

Kokubu ve arkadaşları (1996), yaptığı çalışmada, kuru kıvamdaki silindirle sıkıştırılmış betonun sıkışmasında, vibrasyon parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Deneyde; maksimum tane çapı 20 mm olan kırılmış kaba agreg, ocak kumu ve gradasyonu düzenlenmiş kum olmak üzere iki tip ince agreg ile normal portland çimentosu kullanılarak;

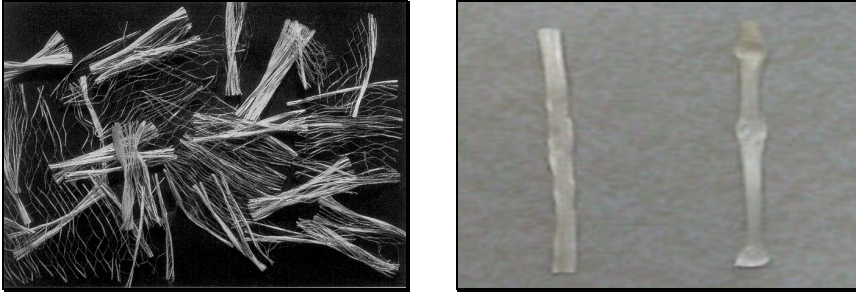
- 0.30 ile 0.35 arasında değişen farklı su/bağlayıcı oranlarında,
- 0.34 ile 0.42 arasında değişen farklı kum/agrega oranlarında

- 100-120 kg/m³ arasında değişen farklı su içeriklerinde betonlar üretmişlerdir. Üretilen betonlar, 100/200 mm ayrıtlı silindir örneklere Modifiye Vebe testi ile Marshall Hammer testi olmak üzere iki farklı metotla sıkıştırarak yerleştirmiştir. Sıkıştırma koşulları olarak; ivme, yerçekimi ivmesinin 2, 5 ve 8 katı olarak alınmış; frekans 75, 100 ve 150 Hz. olarak alınmıştır. Betonun silindir kalıp içerisindeki oturması her 0.3 sn de lazer deplasman aleti ile otomatik olarak ölçülmüş; datalar, su ve katı hacmi toplamının numunenin toplam hacmine oranı olan dolu hacim oranı (γ)'ya çevrilmiştir. Yazarlar, SSB'nin sıkışma karakteristiğinin değerlendirilmesinde betonun düşük ivmede vibrasyonla sıkıştırılmasında maksimum sıkışmanın elde edildiğini, yerçekimi ivmesinin 2.5 katı ivmenin dışında maksimum sıkışmanın değişmediği sonucuna varılmıştır. Kompaksiyon enerjisi değerlendirildiğinde vibrasyon frekansının nihai dolu hacmin maksimum değerine etkisinin olmadığını göstermiştir. Sıkıştırma esnasında Marshall metodu ile agregalardaki ayrışmanın/bozulmanın ölçülebilir derecede olduğunu, bu yüzden, ileriki çalışmalarda bu testin uygunluğunun değerlendirilmesi gerektiği bildirilmiştir. Silindirle sıkıştırılmış betonun karışım oranlarını optimize etmek için kum/agrega oranı ile su içeriğinin önemli parametreler olduğunu, maksimum sıkışabilirliği elde etmek için; minimum enerji seviyesinde optimum kum yüzdesinin elde edildiği, su miktarının artmasıyla maksimum sıkışabilirliği elde etmek için gerekli enerjinin azaldığını belirtilmiştir. Beton karışımının toplam su içeriğini, uygulanan sıkıştırma enerjisinin azalma fonksiyonu olarak açıklamış, optimum toplam su miktarının, enerji azalmasının minimal olduğu su miktarının seçilmesiyle elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Santana (1998) yaptığı çalışmada, geoteknik yaklaşımla kütleli ve yapısal uygulamalarda kullanılan silindirik sıkıştırılmış betonların karışım oranlarını incelemiştir. Deneyde, üç farklı bağlayıcı dozajında karışımlar üretilmiş, her karışım için ise dört farklı (ağırlıkça %0, 38, 55 ve 71) oranda uçucu kül çimento yerine kullanarak toplam 12 karışım elde edilmiştir. Karışımlarda kaba agrega olarak kırılmış kireç taşı, ince agrega olarak ise silisli doğal kum kullanılmıştır. Deneyde numunelerin su muhtevasını bulmak ve beton karışımlarını 152 mm çapında, 115 mm yüksekliğinde silindirik kalıplarda 3 katmanda sıkıştırmak için Kango tokmağı (düşük genlikte, dakikada 2700 darbe ile çalışan) kullanmıştır. Yazar, yüksek değerdeki su/bağlayıcı oranının SSB için normal olduğunu, düşük kalitede bir ıslak karışım manasına gelmediğini ancak düşük bağlayıcı içeriğine sahip olduğunu göstermiştir. Geleneksel betonlarda su/bağlayıcı oranının artması dayanımı azalttığını ancak SSB’de bu durumun geçerli olmadığı sonucuna varmıştır. SSB’nin optimum su içeriğinin agregalarla belirlendiğini, bu yüzden çalışma kapsamında test edilen tüm karışımların bağlayıcı dozajları farklı olsa da optimum su içeriklerinde büyük bir değişiklik olmadığı sonucuna varılmıştır. Geoteknik metotlar kullanılarak yapılan dizaynların SSB karışım oranları için uygulanabilir bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

4. POLİPROPİLEN LİFLERİN BETONDA KULLANIMI

Polipropilenden üretilen lifler, oldukça yüksek dayanımları, alkali ortama çok iyi direnç göstermeleri ve düşük fiyatlarıyla önemli bir donatı malzemesi özelliğini taşımaktadır. En önemli kullanım alanı çimento bağlayıcılı kompozitlerin donatılmasıdır (Ersoy, 2001).



Şekil 4.1. Polipropilen lifler

Polipropilen lifler, isotactic polipropilenden üretilmekte ve genellikle kalınlığı 50µm ile 100µm arasında değişen elyaf tabaka halinde kullanılmaktadır. Malzemenin ergime sıcaklığı 165 °C olup, malzeme 100 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda özelliklerini korumaktadır. Kısa süreler için 140 °C'ye kadar sıcaklıklarda da kullanılabilir. Polipropilenin uygulamada karşılaşılan sakıncalı yönü, sıcaklık karakteristiklerinin düşük olmasıdır. Polipropilen'in camsı geçiş sıcaklığı -20 °C'dir. Lifler yapı itibariyle bir çok kimyasal maddeye karşı direnç göstermektedir. Özellikle alkali direncinin iyi olması, malzemenin beton ve harçlarda donatı olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Ersoy, 2001).

Polipropilen donatı malzemesi yüzeyinin hidrofob özelliği dolayısıyla, lifler çimento bağlayıcılı matris malzemesinin içinde ıslanarak topaklanmamaktadır. Gergin haldeki liflendirilmiş filmin dayanımı 300 MPa ile 500 MPa arasında değerler almaktadır. Bu lifler beton ve harçlarda %0.3 ile %1.5 hacim oranları arasında kullanılmaktadır. Polipropilen liflerin elastisite modülü değerinin düşük olması nedeniyle malzemenin basınç dayanımı düşmekte ve göçme öncesinde çoklu çatlamalar başlamadan, gerilmeye bağlı olarak büyük oranda şekil değiştirmeye neden olmaktadır. Ayrıca uygulamada kullanılan polipropilen donatı malzemesinin yapısının niteliği nedeniyle, tek lifli yapıya ve donatıya oranla lif ile matris arasındaki aderans daha düşük düzeyde kalmaktadır (Ersoy, 2001).

Polipropilen liflerin elastisite modülü, gerilme altındaki şekil değişikliğine bağlı olarak 1 kN/mm^2 ile 8 kN/mm^2 arasında değerler almaktadır. Bu değer, matris malzemesi olan beton ve harçların $20\text{-}30 \text{ kN/mm}^2$ mertebelerindeki elastisite modülü değerinin çok altında kalmaktadır. Buna rağmen, polipropilen liflerin katılmasıyla çimento bağlayıcı kompozitlerin özellikle çarpma dayanımı yükselmekte ve tokluğu artmaktadır (Ersoy, 2001).

Robins ve Calderwood (1978) çalışmalarında, çelik ve polipropilen lifli olarak imal edilen $310 \times 310 \times 25 \text{ mm}$ 'lik döşemeler üzerinde patlayıcı denemeleri yapmışlardır. Polipropilen lifli döşemelerin patlama tesirinde daha az parçalandığını, yüksek hızlı bir kamera yardımıyla çekilen filmde liflerin daha çok çatlak önlemede etkin olduğunu, ayrıca $40\text{-}75 \text{ mm}$ uzunluklarındaki polipropilen liflerin 20 mm 'lik liflere nazaran çatlak

gelişimini önlemede daha etkili olduğunu belirtmişlerdir (Arslan ve Aydın, 1999).

Gokoz ve Naaman (1981) çalışmalarında, lif çekip çıkarma deneyi için kullanılan özel bir deney sistemi ile değişik yükleme hızlarında, çelik, polipropilen ve cam liflerin çimento harcı matrisinden çekip çıkarılması deneylerini gerçekleştirerek şekil değiştirme miktarının kenetlenme üzerindeki etkilerinin lif tipi ile değişimini incelemiştir. Çelik ve cam liflerin çekip çıkarma enerjisinin çoğunlukla yükleme hızından bağımsız olduğunu, polipropilen liflerde ise yükleme hızının artışıyla çekip çıkarma enerjisinde büyük bir artış olduğunu ifade etmiştir (Arslan ve Aydın, 1999).

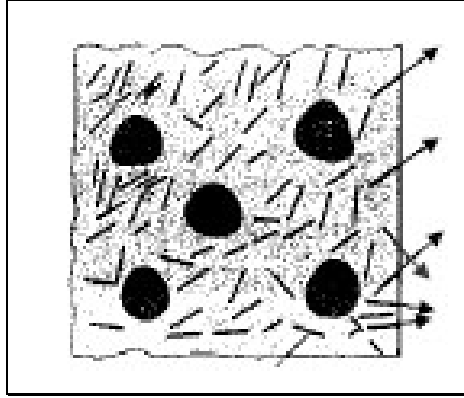
Wang ve arkadaşları (1996) havaalanı pistleri, kolon kiriş birleşim bölgeleri gibi yapı elemanları için tekrarlı dinamik yükler altında betonun davranışını temsil etmek üzere bir defada düşü ağırlığının numuneyi kırması yerine göçmenin bir defada gerçekleşmediği küçük enerjilerin söz konusu olduğu tekrarlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı darbe yüklemeleriyle yapılan deneylerin bir darbeye numunenin göçmesine sebebiyet veren deneylere nazaran farklılık gösterdiği görülmüştür. Çalışmalarında 102/102/355 mm'lik çelik ve polipropilen lifli numuneleri kullanarak tek bir darbeye kırılan numunelerde darbe kafasının uyguladığı yükün daima eğilme yükünden dolayısıyla eğilme enerjisinin toplam enerjiden az olduğunu belirtmişlerdir. Polipropilen lifler katılarak hazırlanan numunelerin, lifsiz numunelere kıyasla, kırılma enerjisinde çok fazla bir artış olmadığı, hacimce % 0.50 oranında katılan numunelerde bile artışın % 21 mertebesinde kaldığı vurgulanmışlardır. Uygulanan maksimum yüklerin normal ve bu türden liflerin kullanıldığı

numuneler için hemen hemen aynı olması nedeniyle büyük deformasyonların büyük kırılma enerjisine sebep olduğu, ancak bu tür liflerin köprü etkisinin çok önemli olmadığı görülmüştür (Arslan ve Aydın, 1999).

Toutanji ve arkadaşları (1998), değişik oranlarda 12.5 ve 19 mm'lik polipropilen lifler ile silis dumanı kullanarak hazırladıkları numuneler üzerinde permeabilite ve ACI 544'te verilen düşü ağırlıklı darbe deneylerini gerçekleştirmiştir. Silis dumanı içermeyen polipropilen lifli betonların permeabilitesinin arttığını, silis dumanı eklenmesiyle liflerin daha iyi dağılım göstermesi ve belki de çimento matrisinin kohezifliğinin artması nedeniyle söz konusu bu artışın azaldığını vurgulamıştır. Lif hacmi sabit kalacak şekilde lif boyunu küçülttüklerinde silis dumanı içeren ve içermeyen betonlarda permeabilitenin azaldığını, ayrıca lifli betonların darbe dayanımının silis dumanı eklenmesiyle arttığını fakat lifsiz betonlarda silis dumanı eklenmesinin etkisi olmadığını görmüştür (Arslan ve Aydın, 1999).

Yüksek dayanımlı betonların çok az boşluklu, diğer bir deyişle fazla yoğun bir yapıda olması yangına karşı direnci düşürmektedir. Yüksek sıcaklıklarda serbest su ve çimento hamurundaki kimyasal olarak bağlanmış su buharlaşır. Ancak bu su malzemenin yoğun yapısından dolayı uzaklaşamaz. Sonuç olarak beton yüzeyinde dökülmeler olur, donatı çeliğini yüksek sıcaklıktan koruyamaz hale gelir ve sonuçta betonarme elemanların taşıma kapasiteleri azalır. Frankfurt'ta yeni inşaa edilen bir yapıda bu problemi çözmek için polipropilen lif donatılı bir beton kullanılmıştır. Bunun için betona 1 m³ başına 2 kg polipropilen lif katılmıştır. Yangında olduğu gibi yüksek sıcaklıkta bu lifler eriyerek su

buharının sınır bölgelerden çıkabileceği kanallar oluşturmaktadır (Şekil 4.2). Böylece, yüzeylerdeki dökülmeler engellenebilmektedir (Taşdemir ve Bayramov, 2002).



Şekil 4.2. Yüksek sıcaklıklarda eriyen polipropilen liflerin oluşturduğu boşluklardan buharın dışarı çıkması (Walraven, 1999).

Aulia (2002), yaptığı çalışmada, polipropilen liflerin yüksek dayanımlı betonların mekanik özellikleri üzerinde etkilerini incelemiş, hacimce %0.2 oranında kullanılan polipropilen liflerin, taze betonda slump kaybına yol açtığını, sertleşmiş betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünde ise kayda değer bir etkisinin olmadığını (lifsiz betona kıyasla %10 mertebesinde daha düşük/ daha yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri elde edildiği) sonuçlarına varmıştır. Ancak, yüksek dayanımlı betonun kırılma özelliklerini önemli mertebede etkilediğini belirtmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, değişik oranlarda uçucu kül ve polipropilen lif kullanımının geoteknik yaklaşımla dizayn edilen silindirle sıkıştırılabilen betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemektir.

5.2. Kapsam

Bu tez çalışmasında, bağlayıcının yerine ağırlıkça %0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanarak ve karışıma hacimce %0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif katılarak 16 farklı kompozisyonda silindirle sıkıştırılabilen beton karışımları geoteknik metotla tasarlanmıştır. Deneysel çalışma;

a. Karışımların optimum su muhtevasının belirlenmesi,

b. Optimum su muhtevasının seçilmesi sonucu karışım oranlarının saptanmasıyla üretilen SSB'lerin mekanik özelliklerinin test edilmesi, olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Üretilen SSB karışımlarından tespit edilecek özellikleri belirlemek için yeterli sayıda 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde silindir örnekler ile 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler 7, 28 ve 90 gün standart kür uygulanmıştır. Kür sonunda örnekler üzerinde aşağıdaki test ve deneyler yapılmıştır;

- Sıkılık kontrolü,

- Tek eksenli basınç testi,

- Silindir yarma deneyi,

- Eğilme deneyi,

- Elastisite modülü ölçümü,
- Ultrases hız ölçümü,
- Darbe deneyi

5.2.1. Çimento

Bu çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak Akçansa Çimento San.ve Tic.A.Ş.'den temin edilen CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çimentonun bazı kimyasal özellikleri Çizelge 5.1'de, mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Çizelgedeki veriler çimentonun üretildiği fabrikadan alınmış değerlerdir. Elde edilen sonuçlar TS EN 197-1 Standardının sınırlarını sağlamaktadır. Kullanılan çimento, fabrikadan torbalar halinde temin edilmiş ve laboratuvar ortamında ağzı kapalı plastik bidonlarda nem almayacak şekilde deneyler süresince muhafaza edilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Çimentonun kimyasal özellikleri		
İçerik	(%)	TS standart limitleri
CaO	62.53	
SiO ₂	19.65	
Al ₂ O ₃	4.47	
Fe ₂ O ₃	3.56	
MgO	2.40	
SO ₃	2.64	≤ % 3.50 ; TS EN 196-2
Çözünmeyen kalıntı	0.30	≤ % 5.00 ; TS EN 196-2
Kızdırma kaybı	2.95	≤ % 5.00 ; TS EN 196-2
Klor	0.00	≤ % 0.10 ; TS EN 196-21
Serbest CaO	1.74	
Ölçülemeyen	1.50	
C ₃ S	55.45	
C ₂ S	14.51	
C ₃ A	5.82	
C ₄ AF	10.83	

Çizelge 5.2. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri		
İçerik	Değer	TS standart limitleri
0.090 mm elekte kalıntı, (%)	0.30	
0.045 mm elekte kalıntı, (%)	4.80	
Özgül yüzey, (cm ² /g)	3689	
Özgül ağırlık	3.12	
2 günlük dayanım, (MPa)	28.00	≥ 20MPa ; TS EN 196-1
28 günlük dayanım, (MPa)	53.30	≥ 42.5 MPa, ≤ 62.5 MPa ; TS EN 196-1
Priz başlangıcı, (saat: dakika)	2 : 55	≥ 60 dakika ; TS EN 196-3
Priz sonu, (saat : dakika)	3 : 50	
Hacim sabitliği, (mm)	1.00	≤ 10 mm, TS EN 196-3

5.2.2. Uçucu kül

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan uçucu kül Soma Termik Santralinden temin edilmiştir. Deney süresince nem almamalarına özen gösterilen uçucu kül, laboratuvarında plastik bidonlarda saklanmıştır. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri ile dayanım aktivite indeksi Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Çizelge 5.3'teki kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları yerel bir çimento fabrikasına ait laboratuvarında belirlenmiş değerlerdir. Elde edilen dayanım aktivite indeksi değerleri ise deneysel çalışma kapsamında ASTM C 311'e uygun olarak yapılan deney sonuçlarıdır. Uçucu külün 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indekslerinin sırasıyla %55 ve %61 oranında olduğu görülmektedir. Bu çizelgedeki sonuçlar incelendiğinde; uçucu külün yeterli inceliğe sahip olduğu, kimyasal ve fiziksel özelliklerinin ASTM C 618 limitlerini sağladığı ancak, 28 günlük dayanım aktivite indeksinin ASTM C618 ve TS EN 450'de belirtilen sınırları sağlamadığı görülmektedir. Uçucu külün yapısında bulunan SiO₂'nin yeterli miktarda amorf hale gelemeyişi buna sebep gösterilebilir.

Çizelge 5.3. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri ile dayanım aktivite indeksi değerleri

Kimyasal özellikler		ASTM C 618 limitleri	TS EN 450 limitleri
İçerik	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	49.00		
Al ₂ O ₃	25.25		
Fe ₂ O ₃	4.90		
S+A+F toplamı	79.15	≥ 50.00	
CaO	7.65		
MgO	2.00		
Na ₂ O	0.45	≤ 1.50	
K ₂ O	1.10		
SO ₃	0.90	≤ 5.00	
Kızdırma kaybı	2.65	≤ 6.00	
Serbest CaO	0.16		
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık	1.97		
Özgül yüzey (cm ² /g)	3895		
0.090 mm elek üstü	7.40		
0.045 mm elek üstü	23.30	≤ 34.00	
Dayanım aktivite indeksi, (%)			
7 gün	55		
28 gün	61	≥ 75.00	≥ 70.00

5.2.3. Agrega

Deneysel çalışmada üretilen betonlarda kırma kireç taşı kullanılmıştır. Kullanılan agregalar 0-5 mm, 5-15 mm ve 15-25 mm kırma kireç taşıdır. Beton üretiminde kullanılan en büyük agregata tane boyutu 25 mm'dir. Agregaların elek analizi sonuçları Çizelge 5.4, Çizelge 5.5, Çizelge 5.6'da, fiziksel özellikleri ise Çizelge 5.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. İnce agreganın (0/5 mm) elek analizi sonucu

Elek açıklığı	Elek üzerinde kalan (g)	Elek üzerinde kalan (%)	Kümülatif kalan (%)	% Geçen
1-in (25 mm)	0	0	0	100
¾-in (19 mm)	0	0	0	100
1/2-in (12.5 mm)	0	0	0	100
3/8-in (9.5 mm)	0	0	0	100
No.4 (4.75 mm)	55	3	3	97
No.8 (2.36 mm)	556	28	30	70
No.16 (1.18 mm)	522	26	56	44
No.30 (0.59 mm)	286	14	71	29
No.50 (0.29 mm)	209	10	81	19
No.100 (150 µm)	165	8	89	11
No.200 (75 µm)	77	4	93	7
Tava	138	7	100	0
TOPLAM	2008			

Çizelge 5.5. Kaba agreganın (5-15 mm) elek analizi sonucu

Elek açıklığı	Elek üzerinde kalan (g)	Elek üzerinde kalan (%)	Kümülatif kalan (%)	% Geçen
1-in (25 mm)	0	0	0	100
¾-in (19 mm)	0	0	0	100
1/2-in (12.5 mm)	115	6	6	94
3/8-in (9.5 mm)	536	27	33	67
No.4 (4.75 mm)	1212	61	94	6
Tava	124	6	100	0
TOPLAM	1987			

Çizelge 5.6. Kaba agreganın (15-25 mm) elek analizi sonucu

Elek açıklığı	Elek üzerinde kalan (g)	Elek üzerinde kalan (%)	Kümülatif kalan (%)	% Geçen
1-in (25 mm)	0	0	0	100
¾-in (19 mm)	267	13	13	87
1/2-in (12.5 mm)	1656	83	96	4
3/8-in (9.5 mm)	53	3	99	1
No.4 (4.75 mm)	7	0	99	1
Tava	10	1	100	0
TOPLAM	1993			

Çizelge 5.7. Deneysel çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Fiziksel özellik	Kaba agregası		İnce agregası
	15-25 mm	5-15 mm	0-5 mm
Özgöl ağırlık, (DYK)	2.67	2.65	2.62
Su emme yüzdesi, (%)	0.40	0.73	1.14
Toplam nem içeriği, (%)	0.43	0.04	0.14
Sıkışık BHA, (kg/m ³),	1550	1567	1680
Gevşek BHA, (kg/m ³),	1367	1400	1660

5.2.4. Su

Silindirle sıkıştırılabilen beton karışımlarının hazırlanmasında karışım suyu olarak şehir şebekesinden sağlanan içilebilir nitelikte musluk suyu kullanılmıştır.

5.2.5. Polipropilen lif

Deneysel çalışmada, kullanılan polipropilen lif Polipropilen Elyaf San. ve Dış Tic. Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Üretilen SSB karışımlarında, 19 mm uzunluğundaki polipropilen lif hacimce %0, %0.25, %0.50 ve %0.75 oranlarında kullanılmıştır. Kullanılan life ait teknik veriler Çizelge 5.8'de gösterilmiştir. Bu veriler üretici firmanın katalog bilgileridir.

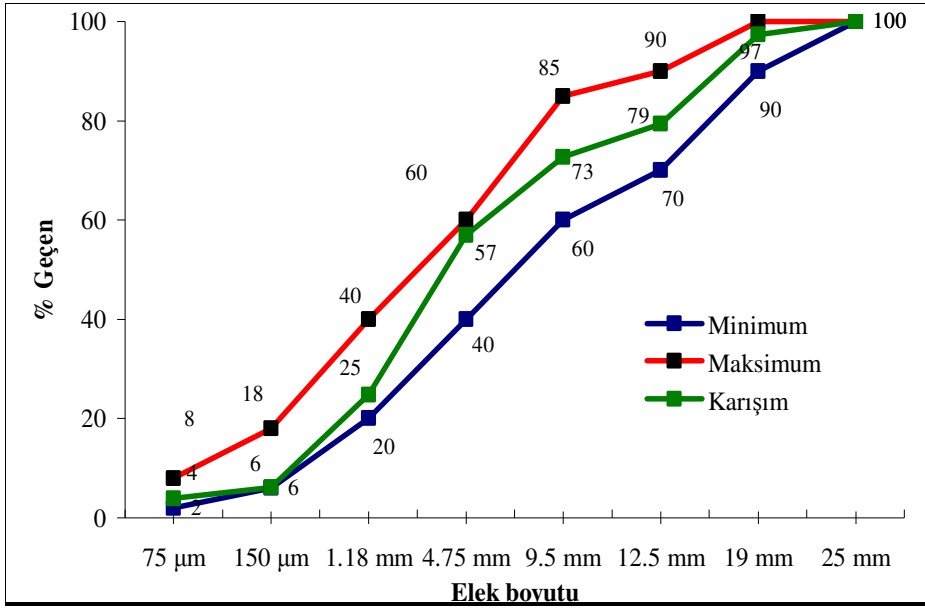
Çizelge 5.8. Deneysel çalışmada kullanılan polipropilen lifin teknik özellikleri

Polipropilen lifin teknik özellikleri	
Özgül ağırlık	0.91
Çekme dayanımı, (MPa)	650
Elastisite modülü, (MPa)	3600
Su emme oranı, (%)	0.01
Alkali direnci, (%)	99.5
Asit direnci, (%)	99.5
Erime noktası, (°C)	170
Isı direnci, (°C)	-30
Parlama noktası, (°C)	590
Uzama, (%)	15-25

5.2.6. Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının hazırlanması

Çalışma kapsamında üretilen silindirle sıkıştırılabilen betonun karışım oranları, geoteknik yaklaşımla yol kaplamasına göre dizayn edilmiştir. Üretilen SSB karışımlarında bağlayıcı dozajı 300 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Uçucu kül miktarı, çimentonun yerine ağırlıkça %0, 20, 40 ve 60 oranlarında, polipropilen lif miktarı ise 1 m^3 betonda hacimce %0, 0.25, 0.50 ve %0.75'i oranlarında kullanılmıştır.

Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarında kullanılan agreganın kompozisyonu, Portland Cement Association'un SSB yol kaplamaları için önerdiği agreganın gradasyonu limitleri arasında kalacak şekilde ağırlıkça %57 ince agreganın (0-5 mm), %23 kaba agreganın (5-15 mm) ve %20 kaba agreganın (15-25 mm) oranlarında oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada seçilen agreganın gradasyon eğrisi ile Portland Cement Association'un önerdiği maksimum ve minimum limitler Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan agrega gradasyon eğrisi ve limitleri

SSB karışımlarına ait su miktarları bilinmediği için deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

5.2.6.1. Optimum su muhtevasının belirlenmesi:

Su muhtevası tayini için ASTM C 1435'e uygun olarak deneme karışımları hazırlanmıştır. Her karışım için en az dört farklı su içeriğinde deneme karışımları üretilmiştir. Üretilen SSB deneme karışımları 150/300 mm ayrıtlı silindir kalıplara üç ayrı tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her tabaka ASTM C 1435 prosedürüne uygun olarak teknik özellikleri Çizelge 5.9'da verilen Bosch GSH 11 E tipi titreşimli tokmak kullanılarak, belirli bir enerji seviyesinde kalıp iç yüzeyi ile çelik bastırma plakası arasında yüzük şeklinde çimento hamuru görünene

kadar (yaklaşık 15-20 sn) sıkıştırılmıştır. En üst tabakanın sıkıştırılması esnasında sıkışmış malzeme yüksekliği ile silindir kalıp üst yüzeyi arasında kot farkı oluşmaması için Şekil 5.2’de gösterilen ilave halka kullanılmış, her tabakanın sıkıştırılması esnasında titreşimli tokmağın uyguladığı yükün homojen dağılabilmesi için ve pürüzsüz bir yüzey elde edilebilmesi için Şekil 5.3’te gösterilen 5 kg ağırlığında çelik bastırma plakası kullanılmıştır.

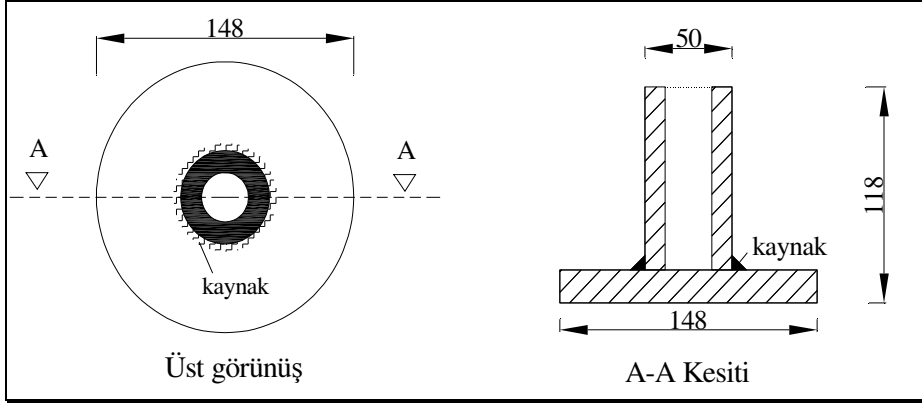
Çizelge 5.9. Deneysel çalışmada SSB’nin sıkıştırılmasında kullanılan Bosch GSH 11 E tipi titreşimli tokmağın teknik özellikleri

Bosch GSH 11 E tipi beton kırıcının teknik özellikleri	
Ağırlık, (kg)	10.1
Giriş gücü, (Watt)	1500
Darbe sayısı, (devir/dakika)*	900-1890
Tek darbe kuvveti, (Joule)	6-25

* Ayarlanabilir özelliktir. Çalışmada 1890 devir/dakika olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.2. İlave halka ve çelik bastırma plakası



Şekil 5.3. Çelik bastırma plakasına ait kesit ve görünüş (ölçüler mm cinsindendir)

Sıkıştırılmış örneklerin ıslak birim ağırlıkları ölçüldükten sonra örnekler silindir kalıptan çıkartılmış ve örneklerin muhtelif yerlerinden yaklaşık 600 g olacak şekilde yaş numuneler alınmıştır. Yaş numuneler mini-fırında sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulan numunelerin kuru ağırlıkları tartılmıştır. Denklem 5.1’de gösterilen formül yardımıyla rutubet miktarları hesaplanmıştır. Taze betonun ıslak birim ağırlığı ile rutubet miktarı ilişkisinden her karışımın kuru birim ağırlıkları hesaplanmıştır (Bkz. Denklem 3.1).

$$w = \frac{W_{\text{ıslak}} - W_{\text{kuru}}}{W_{\text{kuru}}} \times 100 \dots\dots\dots \text{Denklem 5.1}$$

Burada;

w : su muhtevası (%),

$W_{\text{ıslak}}$: ıslak numune ağırlığı (gr),

W_{kuru} : kuru numune ağırlığı (gr) olarak ifade edilmiştir.

Bulunan kuru haldeki birim ağırlık değerleri ordinatta ve rutubet miktarları apsiste olmak üzere parabolik birim ağırlık eğrileri elde edilmiştir. Her karışım için elde edilen parabolik eğrilerde maksimum kuru birim ağırlığa karşılık gelen optimum su muhtevaları karışım dizaynında esas alınmıştır.

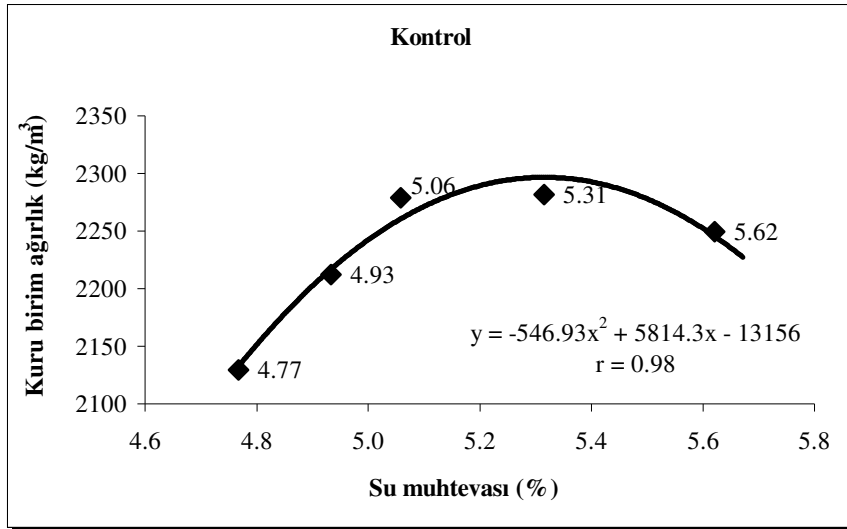
Belirlenen beton karışımlarından toplam 16 farklı kompozisyonda (1 adet kontrol ve 15 adet uçucu kül ve polipropilen lif içeren) silindirle sıkıştırılmış beton üretilmiştir. Üretilen SSB karışımlarının kompozisyonu ve isimlendirilmesi Çizelge 5.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.10. Deneysel çalışmada üretilen SSB karışımlarının isimlendirilmesi ve bağlayıcı malzeme ile polipropilen lif kompozisyonları

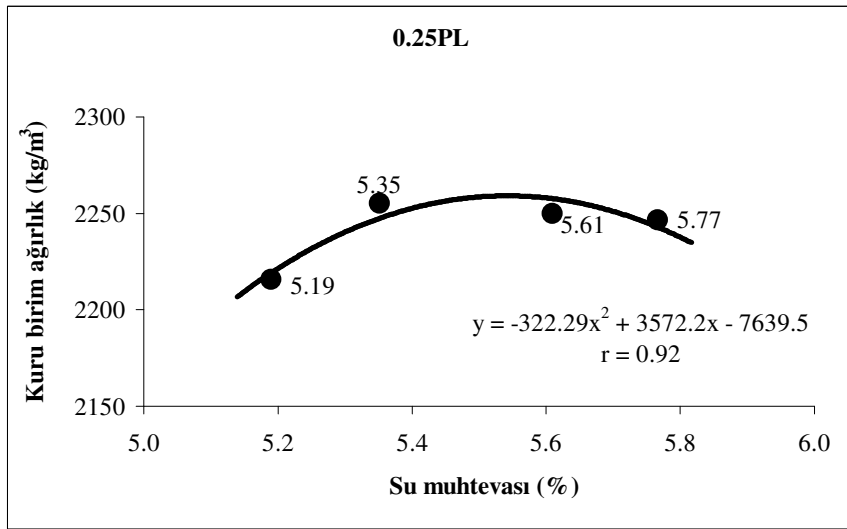
No	Karışım adı	Çimento (%)	Uçucu kül, UK (%) *	Polipropilen lif, PL (%)**
1	Kontrol	100	0	0.00
2	0.25PL	100	0	0.25
3	0.50PL	100	0	0.50
4	0.75PL	100	0	0.75
5	20UK	80	20	0.00
6	20UK0.25PL	80	20	0.25
7	20UK0.50PL	80	20	0.50
8	20UK0.75PL	80	20	0.75
9	40UK	60	40	0.00
10	40UK0.25PL	60	40	0.25
11	40UK0.50PL	60	40	0.50
12	40UK0.75PL	60	40	0.75
13	60UK	40	60	0.00
14	60UK0.25PL	40	60	0.25
15	60UK0.50PL	40	60	0.50
16	60UK0.75PL	40	60	0.75

* Bağlayıcının %'si, ** beton hacminin %'si'dir.

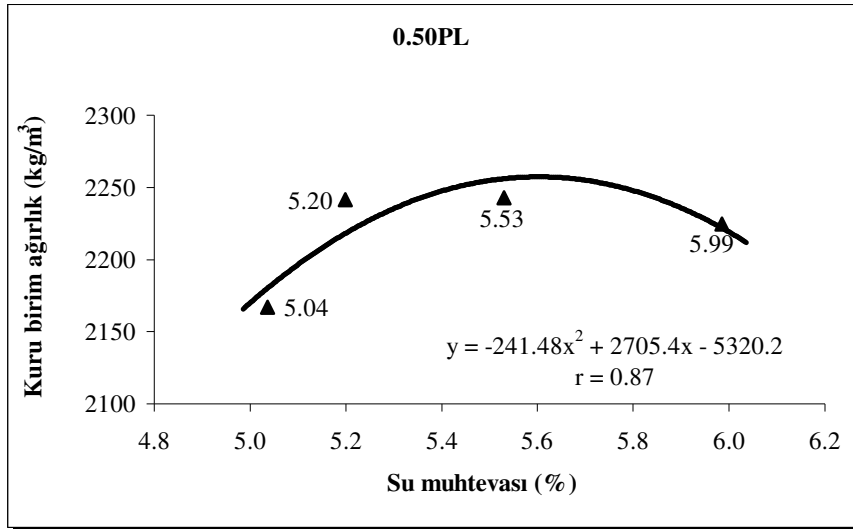
Üretilen 16 farklı kompozisyondaki SSB karışımlarına ait maksimum kuru birim ağırlık-optimum su muhtevası değerleri Şekil 5.4 – Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



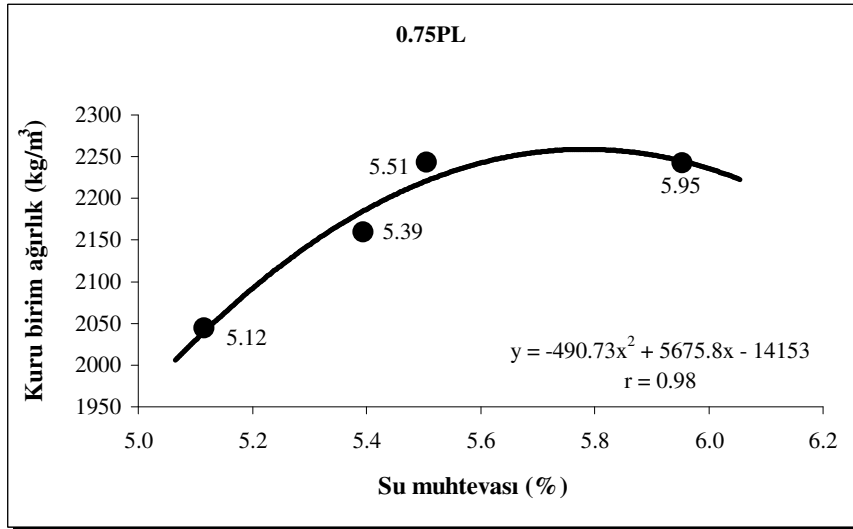
Şekil 5.4. Kontrol karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



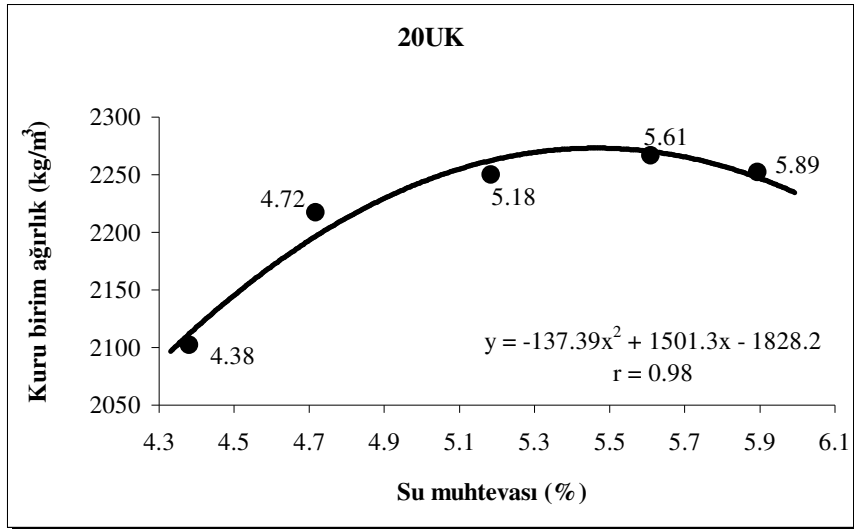
Şekil 5.5. 0.25 PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



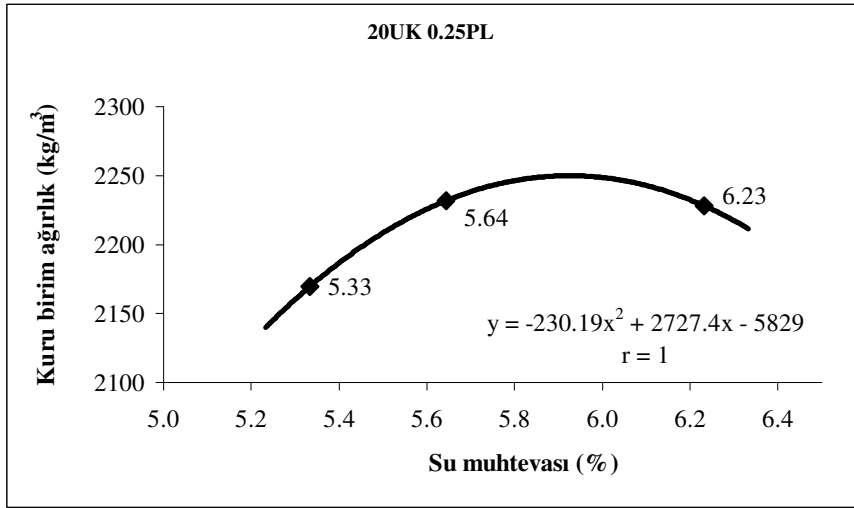
Şekil 5.6. 0.50PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



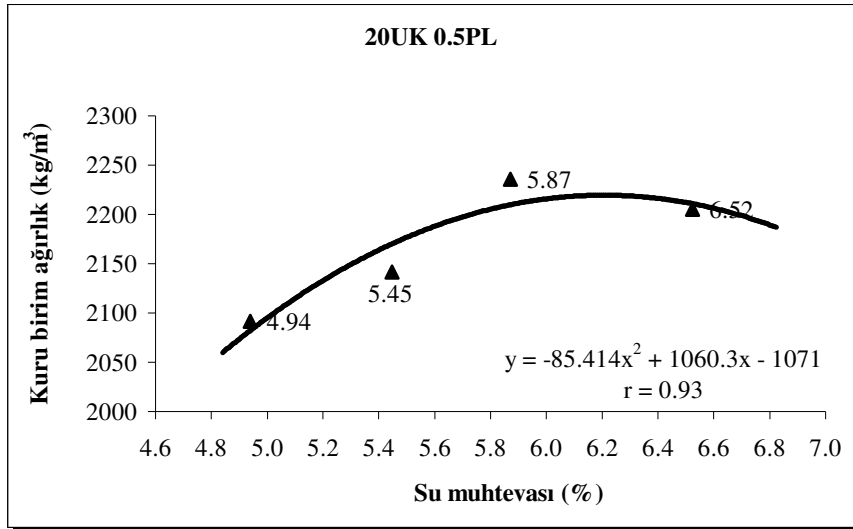
Şekil 5.7. 0.75PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



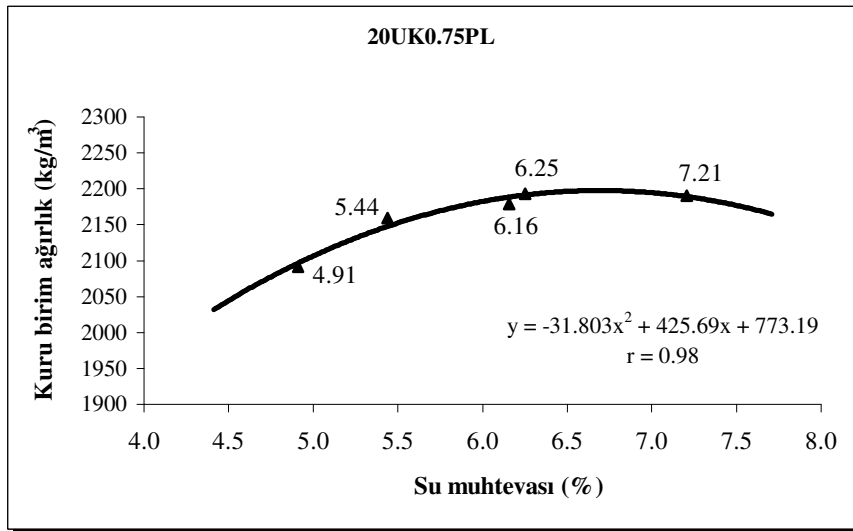
Şekil 5.8. 20UK karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



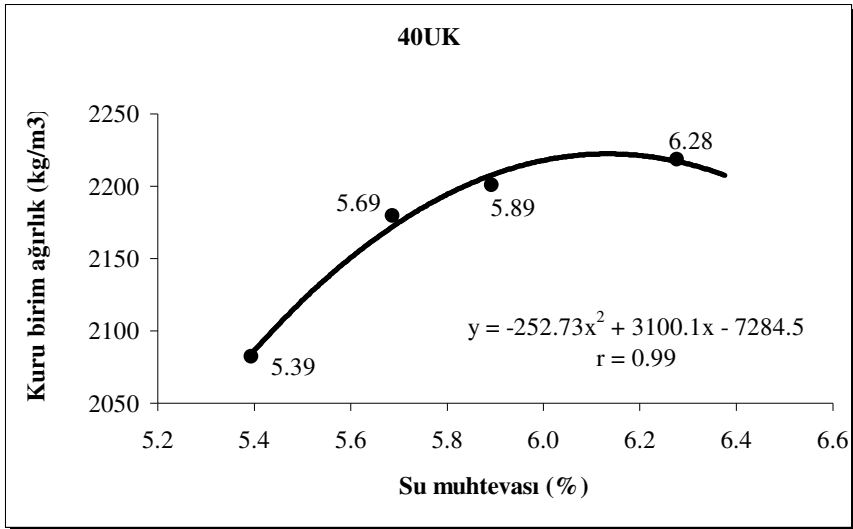
Şekil 5.9. 20UK0.25PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



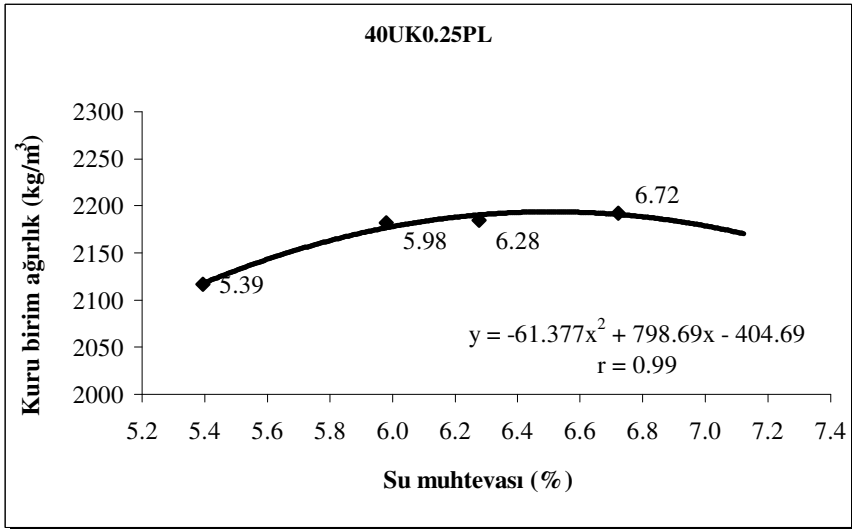
Şekil 5.10. 20UK0.50PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



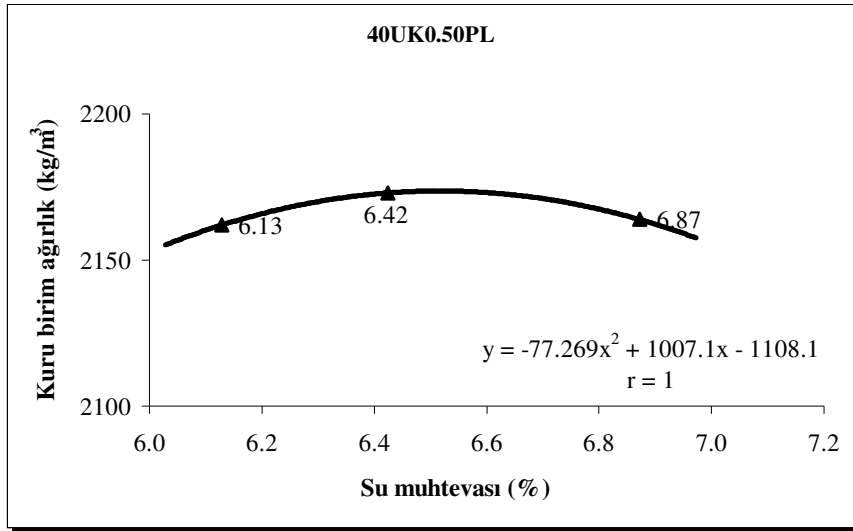
Şekil 5.11. 20UK0.75PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



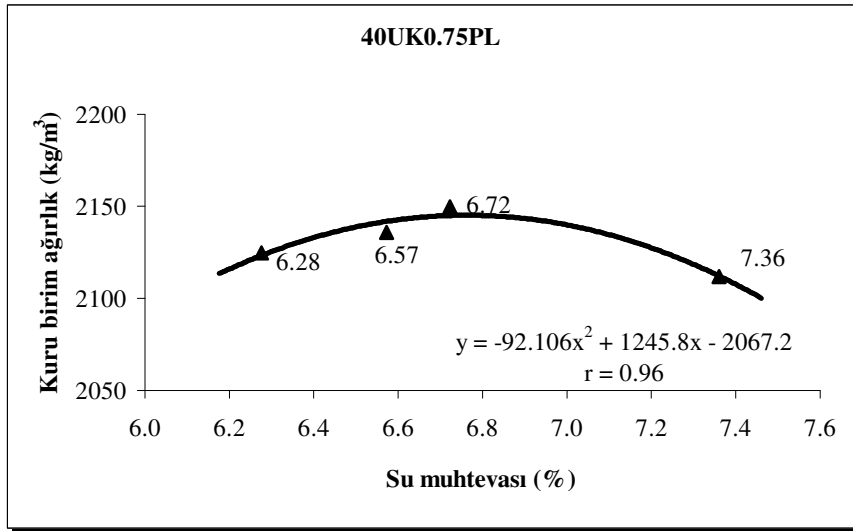
Şekil 5.12. 40UK karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



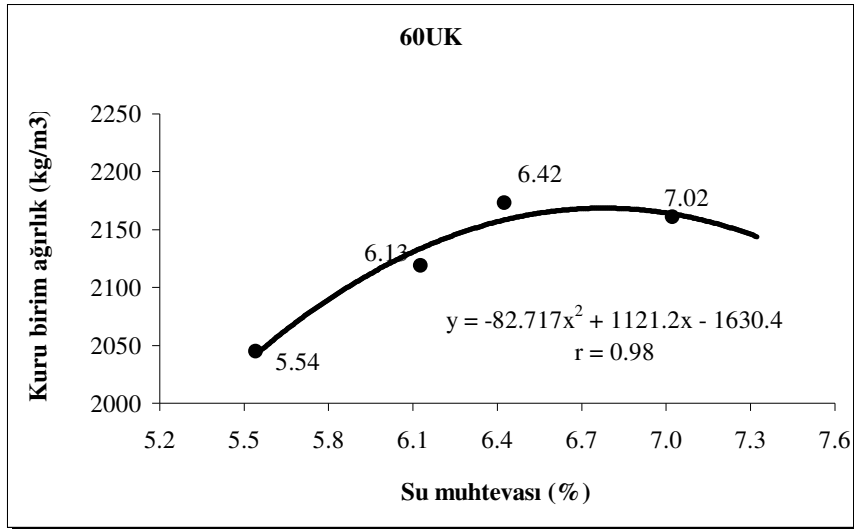
Şekil 5.13. 40UK0.25PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



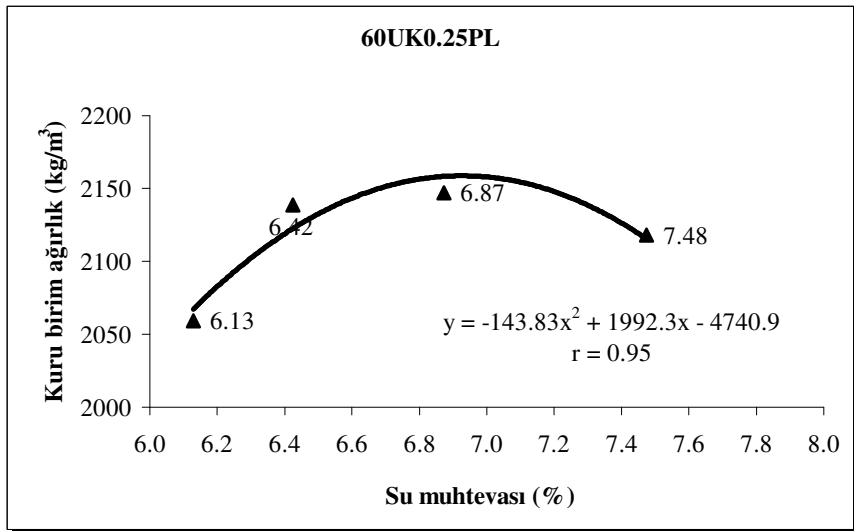
Şekil 5.14. 40UK0.50PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



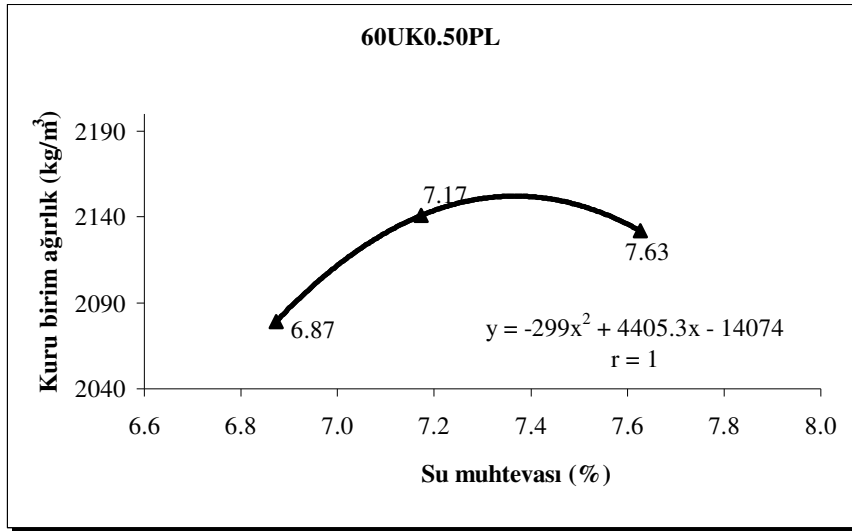
Şekil 5.15. 40UK0.75PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



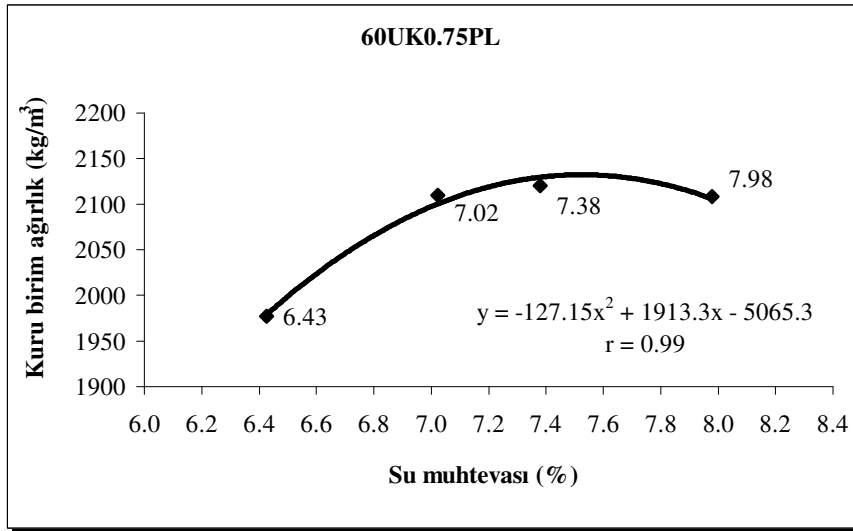
Şekil 5.16. 60UK karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 5.17. 60UK0.25PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 5.18. 60UK0.50PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 5.19. 60UK0.75PL karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi

5.2.6.2. SSB karışımlarının hazırlanması ve üretilmesi

Geoteknik metotla belirlenen SSB karışımlarının maksimum kuru birim ağırlık, optimum su muhtevası, su/bağlayıcı oranı ile 1 m³ SSB için karışım suyu miktarları Çizelge 5.11’de tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.11. SSB karışımlarının su miktarları

SSB karışım adı		Optimum su muhtevası (%)	Maksimum kuru birim ağırlık (kg/m ³)	S/B	1 m ³ SSB için karışım suyu miktarı (kg)
1	Kontrol	5.3	2297	0.40	120
2	0.25PL	5.6	2259	0.43	129
3	0.50PL	5.6	2257	0.44	131
4	0.75PL	5.8	2259	0.45	136
5	20UK	5.5	2273	0.41	123
6	20UK0.25PL	5.9	2250	0.43	130
7	20UK0.50PL	6.2	2220	0.45	135
8	20UK0.75PL	6.7	2198	0.47	141
9	40UK	6.1	2222	0.45	136
10	40UK0.25PL	6.5	2194	0.48	142
11	40UK0.50PL	6.5	2173	0.51	152
12	40UK0.75PL	6.8	2145	0.52	156
13	60UK	6.8	2169	0.49	146
14	60UK0.25PL	6.9	2158	0.50	151
15	60UK0.50PL	7.4	2152	0.51	154
16	60UK0.75PL	7.5	2132	0.51	153

Dört farklı uçucu kül ve dört farklı polipropilen lif oranında, geoteknik metotla (maksimum kuru birim ağırlık - optimum su muhtevası ilişkisi) dizayn edilerek toplam 16 farklı kompozisyonda üretilen betonlardan 352 adet 150/300 mm ayrıtlı silindir ve 48 adet 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada üretilen betonların 1 m³’ü için gerekli malzeme miktarları Çizelge 5.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12. 1 m³ Silindirle sıkıştırılabilen beton üretiminde kullanılan malzeme miktarları

SSB Karışım adı		Çimento (kg)	Uçucu kül (kg)	Agregalar *			Polipropilen lif (kg)	Su (kg)	Su/bağlayıcı oranı
				0-5 mm (kg)	5-15 mm (kg)	15-25 mm (kg)			
1	Kontrol	300	0	1171	478	419	0.0	120	0.40
2	0.25PL	300	0	1154	471	413	2.3	129	0.43
3	0.50PL	300	0	1148	468	410	4.6	131	0.44
4	0.75PL	300	0	1136	464	406	6.8	136	0.45
5	20UK	240	60	1158	473	414	0.0	123	0.41
6	20UK0.25PL	240	60	1145	467	409	2.3	130	0.43
7	20UK0.50PL	240	60	1133	463	405	4.6	135	0.45
8	20UK0.75PL	240	60	1121	457	401	6.8	141	0.47
9	40UK	180	120	1131	462	404	0.0	136	0.45
10	40UK0.25PL	180	120	1118	456	400	2.3	143	0.48
11	40UK0.50PL	180	120	1100	449	393	4.6	152	0.51
12	40UK0.75PL	180	120	1091	445	390	6.8	156	0.52
13	60UK	120	180	1108	452	396	0.0	146	0.49
14	60UK0.25PL	120	180	1097	448	392	2.3	151	0.50
15	60UK0.50PL	120	180	1088	444	389	4.6	154	0.51
16	60UK0.75PL	120	180	1087	444	389	6.8	153	0.51

* Kuru yüzey doygun durumda

Beton üretiminde, 40 dm³ kapasiteli, düşey eksenli karıştırıcı sistemine sahip betoniyer kullanılmıştır. Betoniyerin içinde önce kuru karışımı oluşturacak agregalar karıştırılmıştır. Ardından agregalardan bağımsız kuru olarak karıştırılan bağlayıcı malzeme/malzemeler (çimento/uçucu kül) betoniyerdeki agrega karışımına eklenmiş, homojen bir malzeme dağılımı elde edilene kadar betoniyer çalıştırılmıştır. Homojen bir kuru karışım elde edildikten sonra su, kuru karışıma betoniyer çalışır konumda iken yavaş yavaş ilave edilmiştir. En son olarak polipropilen lif betoniye katılmıştır. Karışım yeterli kıvama ulaştıktan sonra, daha önceden hazırlanmış ve kalıp yağıyla yüzeyleri yağlanmış 150/300 mm ayrıtlı silindir ve 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik kalıplara üretilen betonlar yerleştirilmiştir. Şekil 5.20’de kontrol ve %0.75 lifli karışımların kıvamlarına ait fotoğraflar gösterilmiştir.



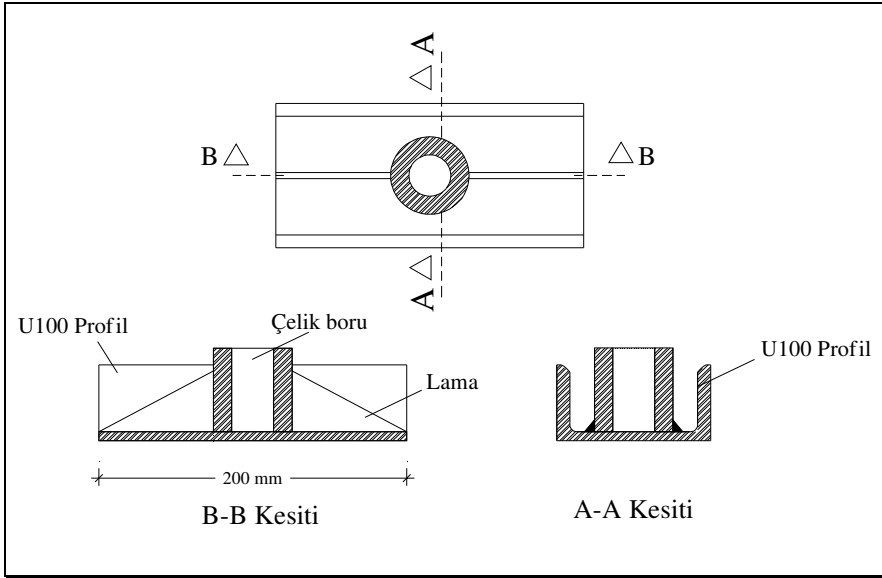
Şekil 5.20. Kontrol ve %0,75 polipropilen lifli karışımların kıvamına ait fotoğraf

Üretilen SSB'lerin 150/300 mm ayrıtlı silindir kalıplara yerleştirilme ve sıkıştırılma işlemleri Bölüm 2.3.(b)'de anlatıldığı gibi yapılmıştır. 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik numuneler de silindir numuneler gibi üç ayrı tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her tabaka ayrı ayrı Bosch GSH 11 E tipi titreşimli tokmak kullanılarak, belirli bir enerji seviyesinde prizmatik kalıp iç yüzeyi ile çelik bastırma plakası arasında çimento hamuru görünene kadar (yaklaşık 15-20 sn) sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi çelik bastırma plakası ile Şekil 5.21'de gösterildiği gibi sağdan sola ve soldan sağa olmak üzere toplam altı pas geçişte yapılmıştır. En üst tabakanın sıkıştırılması esnasında sıkışmış numune yüksekliği ile prizmatik kalıbın üst yüzeyi arasında kot farkı oluşmaması için ilave halka kullanılmış, her tabakanın sıkıştırılması esnasında titreşimli tokmağın uyguladığı yükün transferi için Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de gösterilen çelik bastırma plakası kullanılmıştır.



Şekil 5.21. 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik numune elde etmek için sıkıştırma işlemi (sağdan sola 1 pas geçiş)

Numuneler sıkıştırıldıktan sonra 24 saat süreyle kalıplarda bekletilmiş, ardından 7., 28. ve 90. güne kadar beklemek üzere kür havuzuna konmuştur.



Şekil 5.22. 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik numune elde etmek için sıkıştırma işleminde kullanılan çelik bastırma plakası detayı

5.2.7. Yapılan deneyler

Çalışmada uygulanan deneyler; tek eksenli basınç testi, silindir yarma deneyi, eğilme deneyi, ultrases hız ölçümü, elastisite modülü tayini, darbe deneyi ve sıkılık kontrolü'dür.

Optimum su muhtevası-maksimum birim ağırlıkta üretilen SSB karışımlarına ait birim ağırlıkların, su muhtevasının tespitinde elde edilen maksimum birim ağırlığa oranı ile karışımların sıkışma yüzdeleri belirlenmiştir.

Tek eksenli basınç deneyi TS 3114 ISO 4012'ye uygun olarak 150/300 mm ayrıtlı silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan tüm karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Her yaş grubu için 48 adet örnek basınç deneyine tabi tutulmuştur. Tek eksenli basınç testi öncesinde Şekil 5.23'te gösterildiği gibi 150/300 mm ayrıtlı silindir numunelere tek taraflı kükürt başlık yapılmıştır.



Şekil 5.23. 150/300 mm ayrıtlı silindir numunelerde tek taraflı kükürt başlık

Silindirde yarma deneyleri, TS EN 12390-6 standardına uygun olarak 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde 7., 28. ve 90. günlerde yapılmıştır. Her yaş grubu için 48 adet örnek silindir yarma deneyine tabi tutulmuştur.

Eğilme deneyleri, TS EN 12390-5 standardına uygun olarak 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örnekler üzerinde 28. günde yapılmıştır. Eğilme deneyi her karışım için 3 numune üzerinde uygulanmıştır. Prizmatik SSB örnekleri iki mesnet arasına yerleştirilmiş, ortadan tekil yük uygulanarak kırılmıştır.

Darbe deneyi, ACI Committee 544'e uygun olarak 150 mm çapında ve 64 mm yüksekliğinde silindir örnekler üzerinde 28. günde yapılmıştır. Darbe deneyi, her karışım için hazırlanan 1 adet 150/300 mm ayrıtlı silindir örneğin 64 mm yüksekliğinde kesilmesiyle elde edilen 3 disk numune üzerinde uygulanmıştır. Bu test metodunda 4.5 kg ağırlığındaki tokmak 450 mm yükseklikten numunenin üzerine düşürülmüştür. Tokmak ile disk numune arasındaki yük transferi 63.5 mm çapındaki çelik top ile sağlanmıştır. Deney esnasında diskin üst yüzeyinde ilk çatlağın oluştuğu anki tokmak düşüş sayısı ile Şekil 5.24'te gösterildiği gibi birbirleriyle bağlantılı en az üç çatlağın oluştuğu anki tokmak düşüş sayıları not edilmiştir. Darbe deney aletinin şematik diyagramı Şekil 5.25'te, darbe deneyinde kullanılan test aletinin plan ve kesiti sırasıyla Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de gösterilmiştir.

Elastisite modülü ölçümleri, TS 3502 standardına uygun olarak 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde 28 nci günde yapılmıştır. Elastisite modülü deneyi, her karışım için 3 numune üzerinde

uygulanmıştır. Elastisite modülü ölçülmeden önce numuneye üç defa nihai dayanımın %40'ı kadar ön yükleme yapılmıştır.

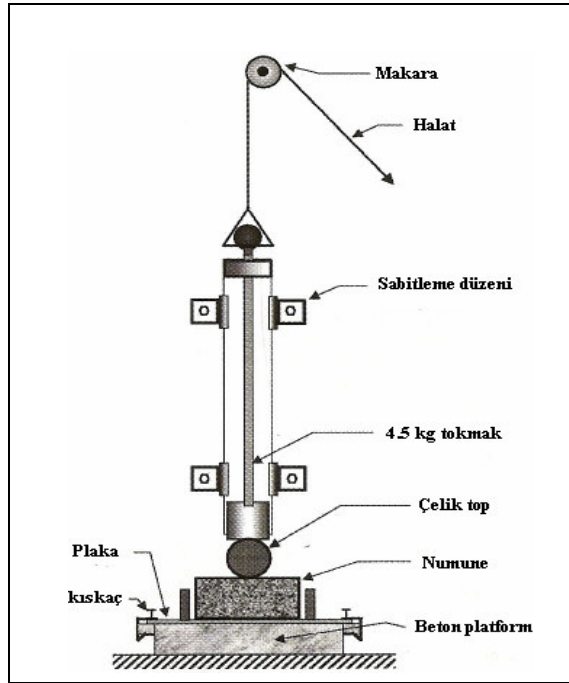


(a)

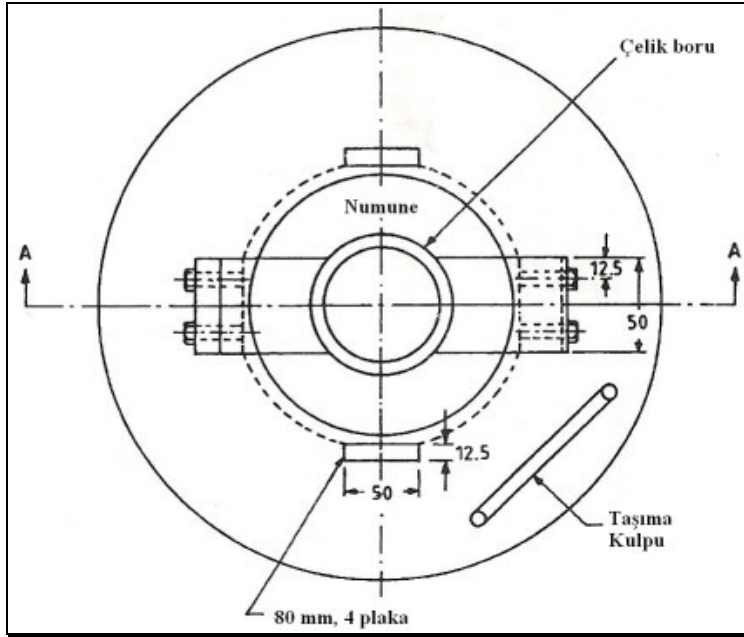


(b)

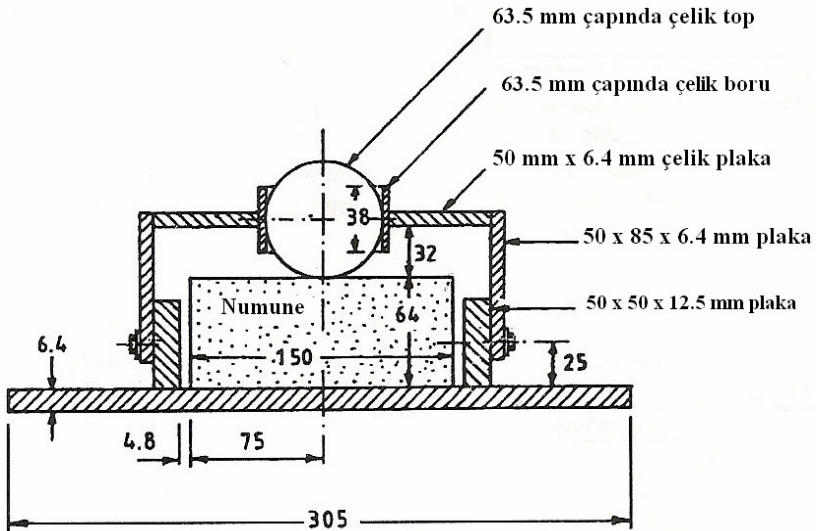
Şekil 5.24. Darbe deneyi (a) Deney test aparatı, (b) Numunenin nihai kırılmadaki durumu



Şekil 5.25. Darbe deneyinin şematik diyagramı (Nataraja et. al., 2005)

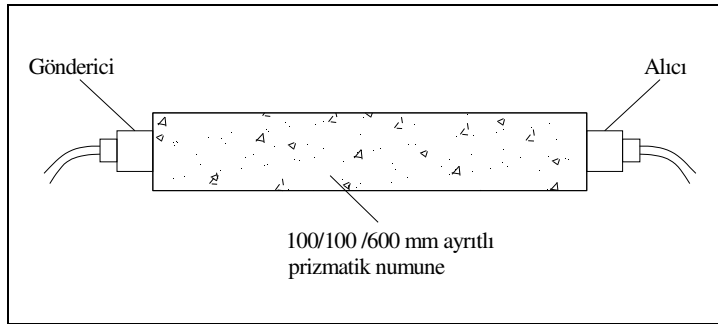


Şekil 5.26. Darbe deneyi test düzeneğinin planı (Nataraja et. al., 2005)



Şekil 5.27. Darbe deneyi test aletinin A-A kesiti (ölçüler mm cinsindendir) (Nataraja et. al., 2005)

Ultrasonik test cihazı vasıtasıyla beton yüzüne ultrases (nabız atışına benzer ritmik ses üstü vuruşlar) uygulanarak beton içerisinde basınç dalgaları yaratılmış, ses üstü dalganın betona gönderildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki mesafeyi geçme zamanı ölçülmüş ve ölçülen bu zaman vasıtasıyla ses dalgasının hızı hesaplanarak betonun kalitesi hakkında fikir edinilmiştir. Ultrases deneyi ASTM C 597 standardına uygun olarak 100/100/600 mm boyutlarındaki prizmatik örnekler üzerinde 28 nci günde yapılmıştır. Ultrases deneyi, her karışım için hazırlanan 3 numune üzerinde uygulanmıştır. Şekil 5.28’de prizmatik örnek üzerinde deneyin uygulanış şekli gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Deneysel çalışmada ultrases dalga hızı ölçüm şekli

6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen sonuçlar bu bölümde çizelgeler ve şekiller halinde sunulmuştur.

6.1. Optimum Su Muhtevası, Maksimum Birim Ağırlık ve Sıkışma Yüzdesi Sonuçları

% 0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ve % 0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif içeren toplam 16 farklı kompozisyonda hazırlanmış 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde ölçülen optimum su muhtevası, maksimum birim ağırlık ve sıkışma yüzdesi değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Burada;

$\gamma_{I \max}$: referans maksimum ıslak birim ağırlık (kg/m^3),

$\gamma_{k \max}$: referans maksimum kuru birim ağırlık (kg/m^3),

$\gamma_{I \max}$: maksimum ıslak birim ağırlık (kg/m^3),

$\gamma_{k \max}$: maksimum kuru birim ağırlık (kg/m^3),

D : sıkışma yüzdesi (%),

w_{opt} : optimum su muhtevası (%) olarak ifade edilmiştir.

$\gamma_{I \max}$ ve $\gamma_{k \max}$ iki aşamada yapılan deneyin 1. aşamasında (karışımların su muhtevasının belirlenmesi aşamasında) elde edilen maksimum birim ağırlık değerleri olup laboratuvar ölçümü olarak kabul edilmiştir.

γ_{Imax} ve γ_{kmax} iki aşamada yapılan deneyin 2. aşamasında (esas beton döküm aşamasında) ölçülen değerleri temsil etmekte olup arazi ölçümü olarak kabul edilmiştir.

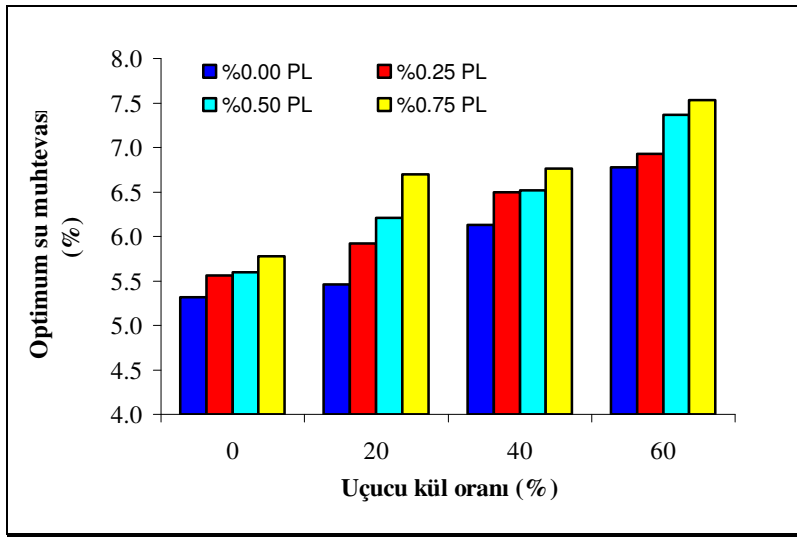
SSB karışımlarının sıkışma yüzdesi; arazi ölçümlerinden elde edilen ıslak birim ağırlıkların, laboratuvar ölçümlerinden elde edilen referans ıslak birim ağırlıklara oranını ($\gamma_{\text{Imax}}/\gamma'_{\text{Imax}}$) ifade etmektedir.

Çizelge 6.1’de SSB karışımlarının sıkışma yüzdelerinin (D) %98 ile %100 arasında bir değer aldığı ve SSB yol kaplamaları için verilen sıkışma yüzdesi kriterlerini sağladığı görülmektedir. Karışımlara uçucu kül ve polipropilen lif eklenmesi hallerinde maksimum ıslak ve kuru birim ağırlık değerlerinin azaldığı ve karışımların su ihtiyacının arttığı Şekil 6.1 ve 6.2’deki grafiklerde de görülmektedir.

Çizelge 6.1. SSB karışımlarına ait optimum su muhtevası, maksimum birim ağırlık ve sıkışma yüzdesi değerleri

SSB karışım adı	W_{opt} (%)	$\gamma'_{\text{I max}}$ (kg/m ³)	$\gamma'_{\text{k max}}$ (kg/m ³)	$\gamma_{\text{I max}}$ (kg/m ³)	$\gamma_{\text{k max}}$ (kg/m ³)	D (%)
Kontrol	5.3	2419	2297	2402	2390	99
0.25PL	5.6	2384	2259	2394	2378	100
0.50PL	5.6	2384	2257	2382	2371	100
0.75PL	5.8	2389	2259	2376	2363	99
20UK	5.5	2397	2273	2367	2357	99
20UK0.25PL	5.9	2383	2250	2365	2354	99
20UK0.50PL	6.2	2357	2220	2351	2339	100
20UK0.75PL	6.7	2345	2198	2333	2321	100
40UK	6.1	2359	2222	2332	2318	99
40UK0.25PL	6.5	2336	2194	2318	2299	99
40UK0.50PL	6.5	2315	2173	2304	2282	100
40UK0.75PL	6.8	2290	2145	2284	2277	100
60UK	6.8	2316	2169	2260	2238	98
60UK0.25PL	6.9	2308	2158	2252	2234	98
60UK0.50PL	7.4	2311	2152	2255	2238	98
60UK0.75PL	7.5	2293	2132	2293	2170	100

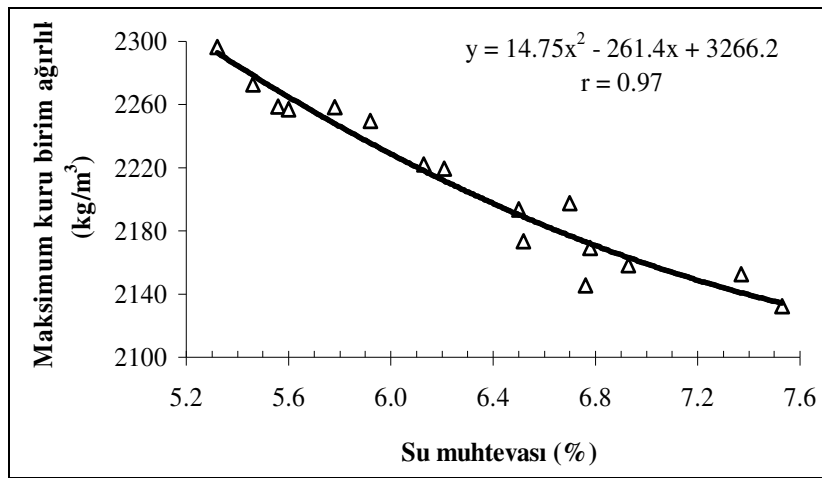
Uçucu kül tanelerinin çimentodan daha fazla inceliğe (daha fazla özgül yüzeye) sahip olmaları, onları ıslatmak için daha fazla ıslatma suyuna ihtiyaç duymalarını gerektirmektedir. SSB karışım oranlamasında optimum su muhtevasında maksimum kuru birim ağırlık önem arz ettiğinden karışımların su/bağlayıcı oranları sabit tutulamamıştır.



Şekil 6.1. Uçucu kül ve polipropilen lif miktarı ile optimum su muhtevası ilişkisi

Polipropilen lifler az da olsa karışımlarda su içeriğini arttırmıştır. Lifleri ıslatmak ve kuru kıvamdaki lif topaklanmalarını önlemek için bu artış gereklidir.

Maksimum kuru birim ağırlıklar ile su muhtevaları arasındaki ilişki Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Şekil 6.2’de SSB karışımlarının su muhtevalarının %5.3 ile %7.5 arasında değiştiği, maksimum kuru birim ağırlıkların 2170 – 2390 kg/m³ arasında değerler aldığı ve karışımların su muhtevaları arttıkça maksimum kuru birim ağırlıklarının azaldığı görülmektedir. Deneysel çalışmada elde edilen maksimum kuru birim ağırlık değerleri ile su muhtevası değerleri arasında kuvvetli bir ilişki olup, korelasyon katsayısı 0.97 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.2. Maksimum kuru birim ağırlık – optimum su muhtevası ilişkisi

6.2. Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

% 0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ve % 0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif içeren toplam 16 farklı kompozisyonda hazırlanmış 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde yapılan 7, 28 ve 90 günlük tek eksenli basınç deneyi sonuçları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

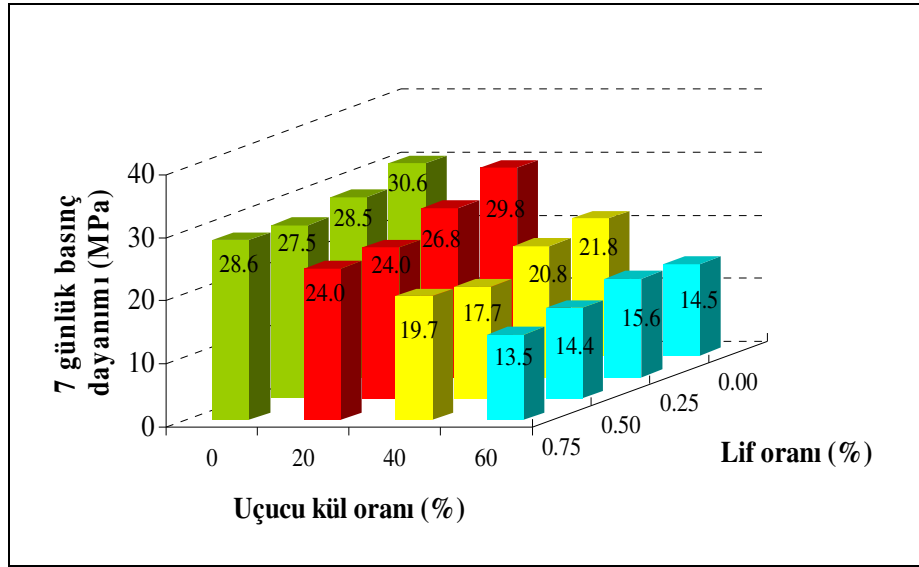
f_{c7} , f_{c28} ve f_{c90} ; deneysel çalışmada 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde yapılan 7, 28 ve 90 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçlarını MPa cinsinden ifade etmektedir.

Çizelge 6.2. SSB karışımlarına ait deneysel çalışmada elde edilen 7, 28 ve 90 günlük ortalama basınç dayanım değerleri

SSB karışım adı	Su/bağlayıcı oranı	Basınç dayanımları, f_{ct} , (MPa)		
		7 günlük, f_{c7} (MPa)	28 günlük, f_{c28} (MPa)	90 günlük, f_{c90} (MPa)
Kontrol	0.40	30.6	37.1	43.1
0.25PL	0.43	28.5	35.8	42.6
0.50PL	0.44	27.5	33.6	37.4
0.75PL	0.45	28.6	32.2	34.0
20UK	0.41	29.8	39.8	42.8
20UK0.25PL	0.43	26.8	39.0	42.1
20UK0.50PL	0.45	24.0	37.1	39.6
20UK0.75PL	0.47	24.0	35.0	38.0
40UK	0.45	21.8	35.6	38.3
40UK0.25PL	0.48	20.8	36.4	37.8
40UK0.50PL	0.51	17.7	32.8	34.0
40UK0.75PL	0.52	19.7	29.1	32.0
60UK	0.49	14.5	26.1	29.0
60UK0.25PL	0.50	15.6	24.3	26.7
60UK0.50PL	0.51	14.4	22.3	24.0
60UK0.75PL	0.51	13.5	24.3	25.4

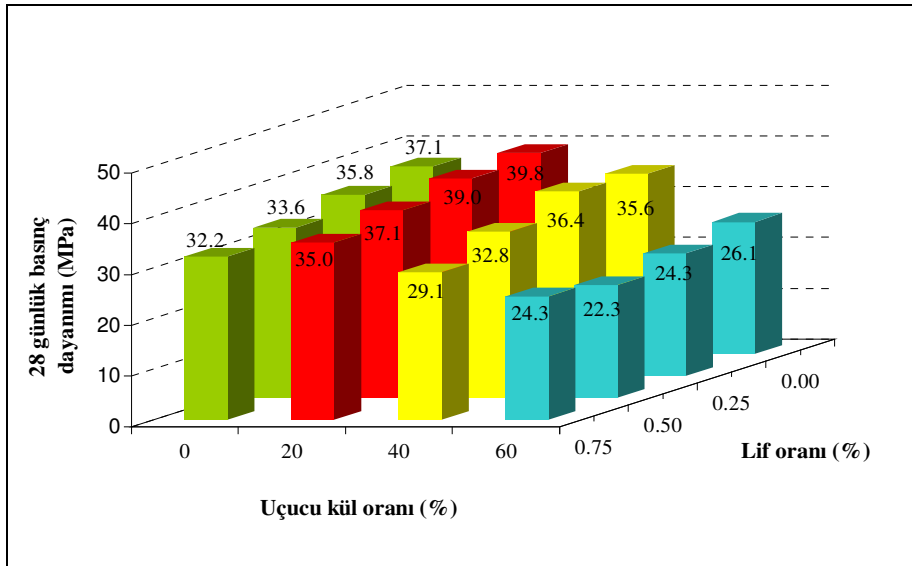
SSB karışımlarına ait deneysel çalışma sonucunda elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri uçucu kül ve lif miktarına bağlı olarak Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir.

SSB karışımlarının 7 günlük ortalama basınç dayanımları; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 27.5 ile 30.6 MPa arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 24.0 ile 29.8 MPa arasında, %40 uçucu küllü/ uçucu küllü lifli örneklerde 17.7 ile 21.8 MPa arasında ve %60 uçucu küllü/ uçucu küllü lifli örneklerde 13.5 ile 15.6 MPa arasında değişmektedir. 7 gün sonunda kontrol karışımlarına kıyasla %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda %2-16 arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda %27-36 arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda %45-53 arasında daha düşük basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.



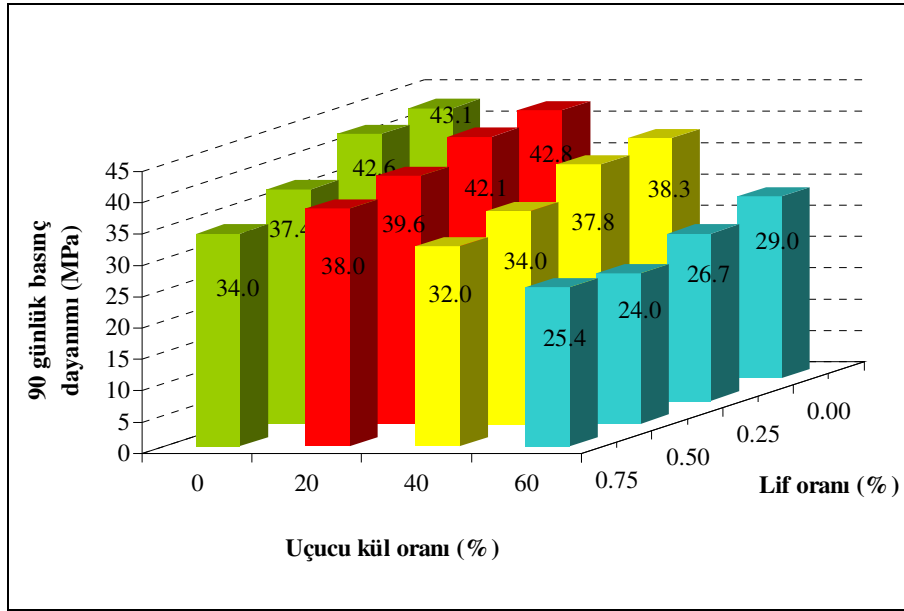
Şekil 6.3. Deneysel çalışmada elde edilen 7günlük ortalama basınç dayanımı değerleri

SSB karışımlarının 28 günlük ortalama basınç dayanımları; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 32.2 ile 37.1 MPa arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü/ uçucu küllü lifli örneklerde 35.0 ile 39.8 MPa arasında, %40 uçucu küllü/ uçucu küllü lifli örneklerde 29.1 ile 36.4 MPa arasında ve %60 uçucu küllü/ uçucu küllü lifli örneklerde 22.3 ile 26.1 MPa arasında değişmektedir. 28 günlük basınç dayanımlarında %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımların basınç dayanımlarının kontrol karışımlarına oranla %7-11 daha yüksek olduğu, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lif içeren karışımların ise kontrol karışımlarıyla hemen hemen aynı basınç dayanımlarına sahip olduğu görülmektedir. Ancak %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda, 28 günlük ortalama basınç dayanım değerleri kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %24-33 arasında daha düşük değerler almıştır.



Şekil 6.4. Deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri

SSB karışımlarının 90 günlük ortalama basınç dayanımları; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 34.0 ile 43.1 MPa arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 38.0 ile 42.8 MPa arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 32.0 ile 38.3 MPa arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 24.0 ile 29.0 MPa arasında değişmektedir. 90 gün sonunda kontrol karışımlarına kıyasla %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda hemen hemen aynı ve yaklaşık %6-12 arasında daha yüksek değerler elde edilmiştir. %40 ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lif içeren karışımlarda sırasıyla %6-11 ve %25-37 oranlarında daha düşük basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.5. Deneyisel çalışmada elde edilen 90 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri

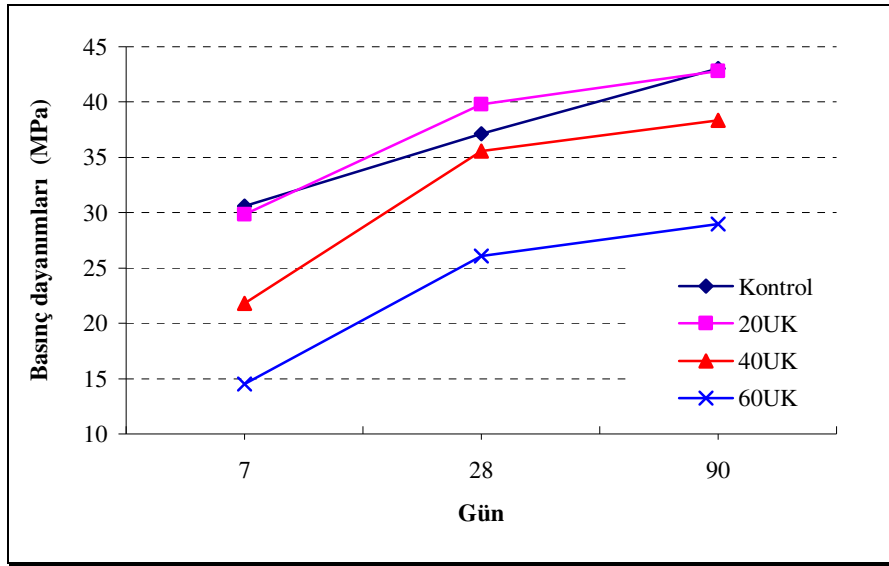
Kontrol karışımları ile %0.25, 0.50 ve 0.75 lif içeren karışımlarda çimento yerine %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına etkileri Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Burada;

- çimento yerine %20 oranında uçucu kül kullanılan karışımların 7 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla düşük olduğu, ancak, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımları ile hemen hemen aynı yada biraz daha yüksek değer aldığı,

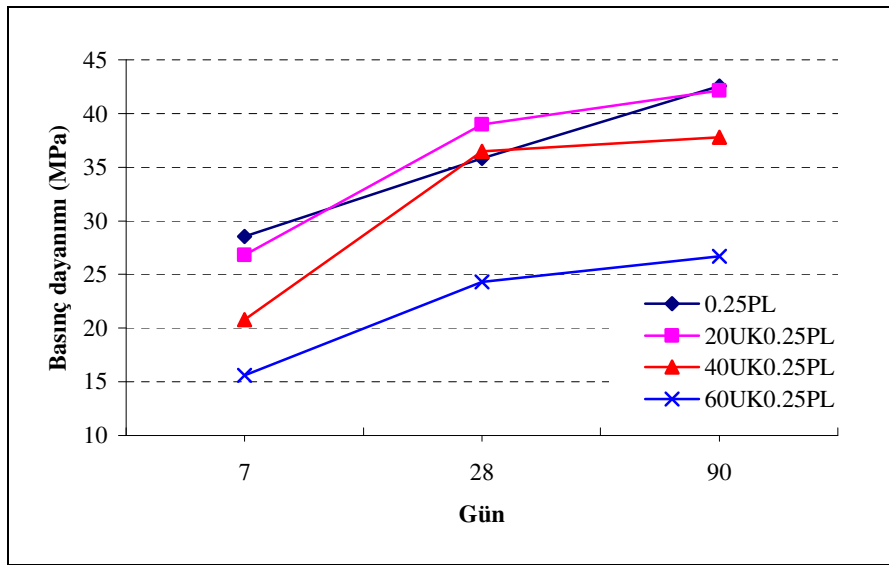
- çimento yerine %40 oranında uçucu kül kullanılan karışımların 7 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla belirgin bir şekilde düşük olduğu, ancak, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarında bu farkın azaldığı,

- çimento yerine %60 oranında uçucu kül kullanılan karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının belirgin bir şekilde diğer karışımlardan daha düşük değerler aldığı görülmektedir.

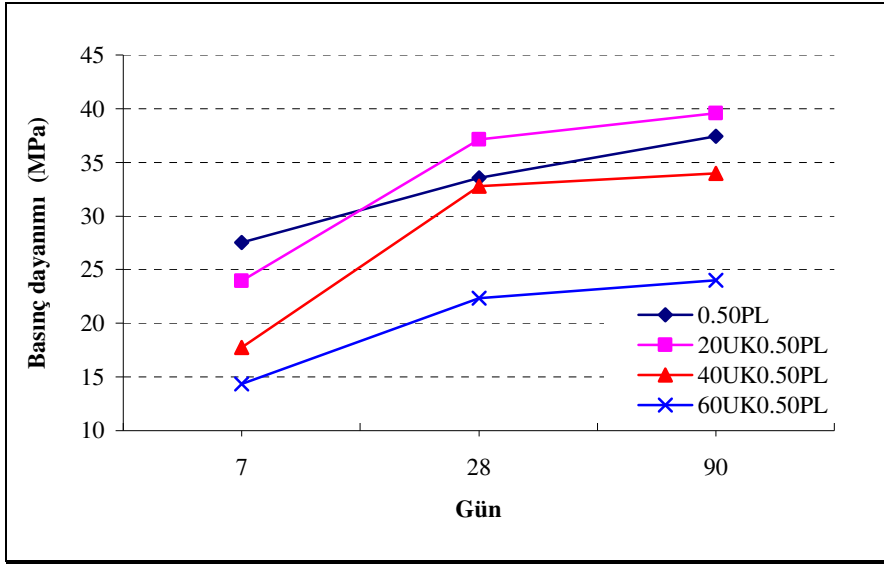
Kontrol karışımları ile çimento yerine %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanılan karışımlarda %0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkileri Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Burada; %0.25 oranında polipropilen lif içeren karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla hemen hemen eşit yada biraz daha düşük değerler aldığı ancak %0.50 ve %0.75 oranlarında polipropilen lif içeren karışımlarda basınç dayanımlarındaki düşüşlerin belirgin bir hal aldığı görülmektedir.



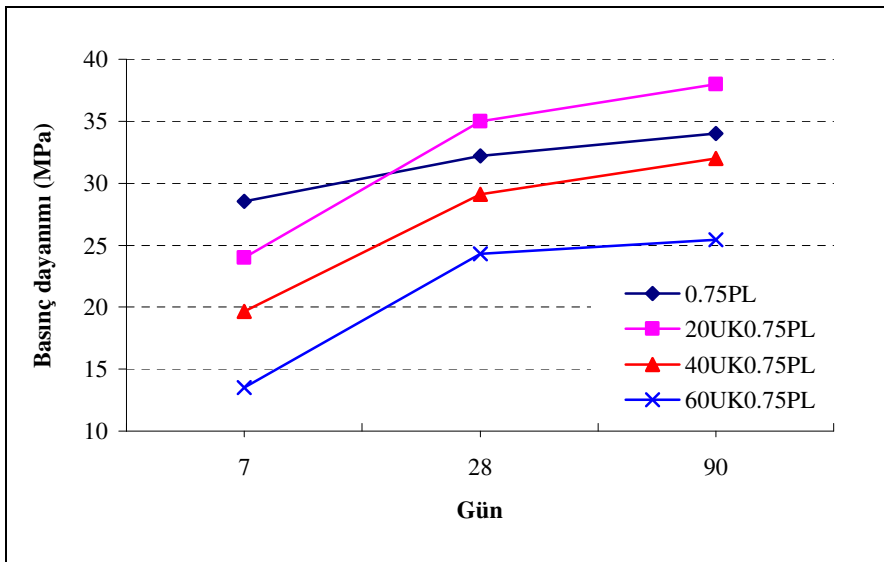
Şekil 6.6. Kontrol karışımlarında çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi



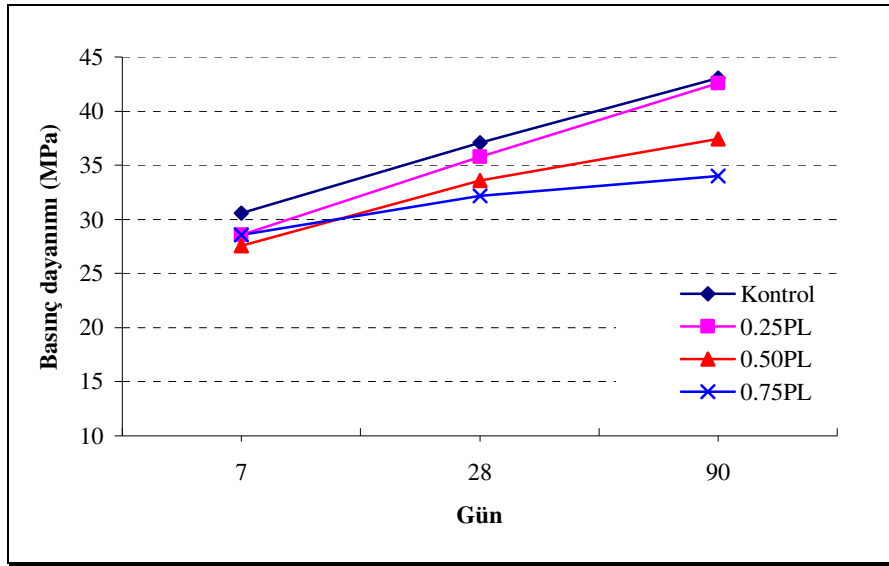
Şekil 6.7. %0.25 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi



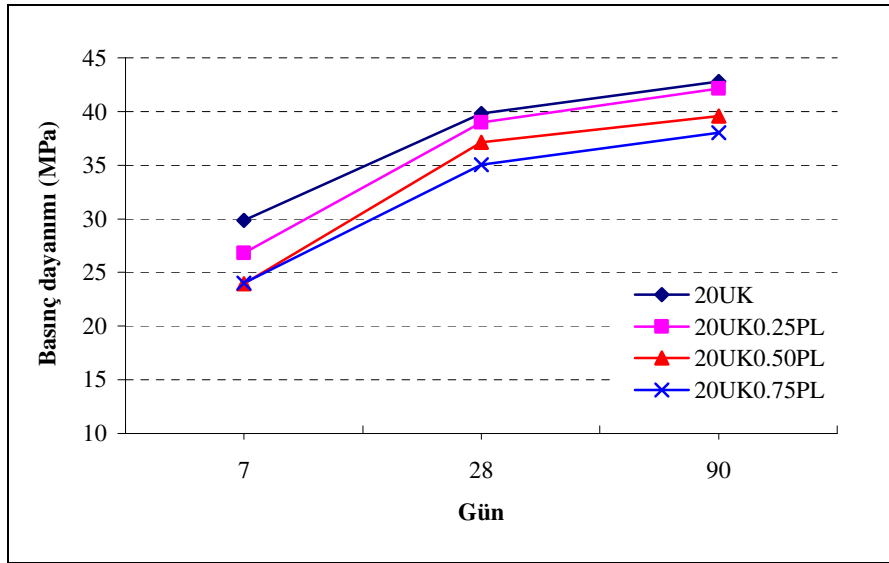
Şekil 6.8. %0.50 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi



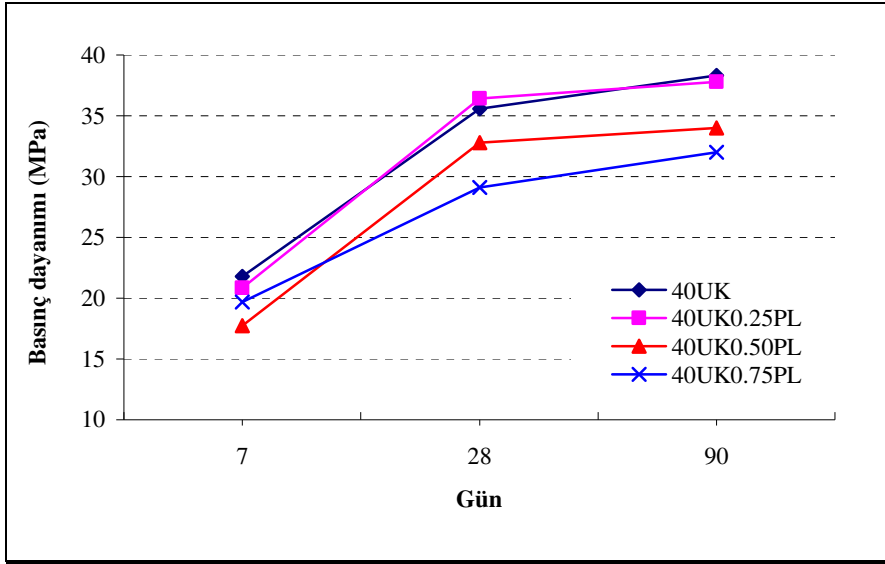
Şekil 6.9. %0.75 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi



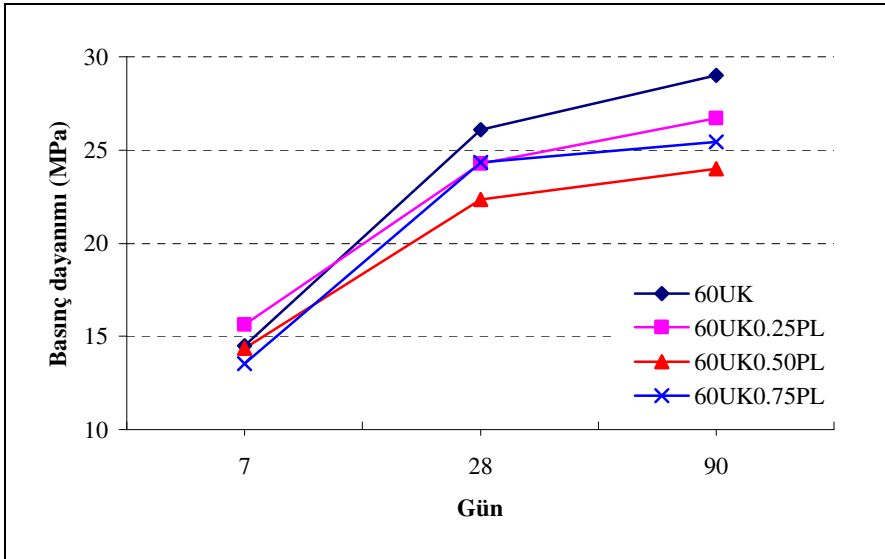
Şekil 6.10. Kontrol karışımlarında farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi



Şekil 6.11. %20 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi



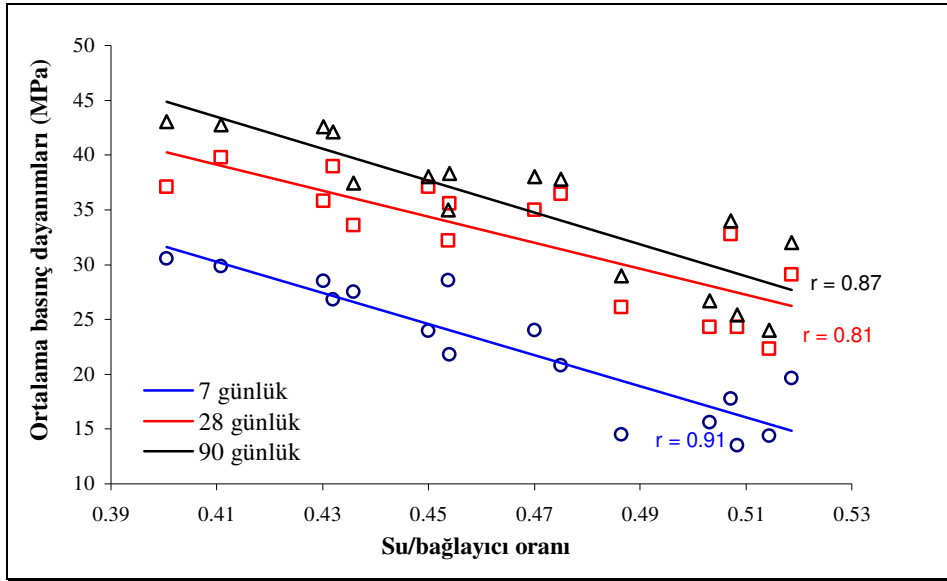
Şekil 6.12. %40 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi



Şekil 6.13. %60 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi

Genel itibarıyla uçucu kül ve lif miktarı arttıkça karışımların su/bağlayıcı oranları arttığından basınç dayanımlarında azalmalar görülmektedir. Buda beklenen bir sonuçtur. Çünkü uçucu küllerin 7, 28 gün gibi kısa periyotlarda çimentodan daha yavaş dayanım kazandığı bilinmektedir. Daha ileriki periyotlarda uçucu kül çimentodan daha hızlı dayanım kazanarak aradaki farkı kapatması beklenmektedir. Ancak bu çalışmada 90 günde %40 ve 60 uçucu küllü örneklerin basınç dayanımları kontrol örneklerine kıyasla düşük kalmıştır. Buna neden olarak uçucu külün puzolanik aktivite indeksinin düşük olması ve kullanılan uçucu kül oranının yüksek olması gerekçe gösterilebilir. Ayrıca diğer önemli bir faktörde S/B oranının az da olsa uçucu küllü örneklerde daha yüksek olmasıdır.

SSB karışımlarına ait deneysel çalışma sonucunda elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki Şekil 6.14'te gösterilmiştir. Şekil 6.14'te SSB karışımlarına ait su/bağlayıcı oranlarının 0.41 ile 0.52 arasında değişmekte olduğu ve geleneksel betondaki gibi basınç dayanımlarının su/bağlayıcı oranı ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmada elde edilen basınç dayanımı değerleri ile su/bağlayıcı oranları arasındaki korelasyon katsayıları 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla 0.91, 0.81 ve 0.87 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.14. SSB numunelerine ait 7, 28 ve 90 günlük numunelerin ortalama basınç dayanımı değerleri ile su/bağlayıcı oranları arasındaki ilişki

Nipatsat ve Tangtermsirikul (2000)'un uçucu kül içeren SSB'lerin basınç dayanımını tahminlemek amacıyla yapmış olduğu çalışmada elde ettiği matematiksel bağıntılar Denklem 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5'de gösterilmiştir.

$$f_{c91} = \left[(46.568 \left[\frac{w}{b} \right]^{-0.54}) (\log C - 1.7) \right] - \left[37.153 \frac{w}{b} \right] + 37.022 \dots \dots \dots \text{Denklem 6.1}$$

$$C = \frac{w_{fa} \cdot (CaO)_{fa} + w_{ce} \cdot (CaO)_{ce}}{100} \dots \dots \dots \text{Denklem 6.2}$$

$$f_{ct} = \frac{\phi_t \cdot f_{c91}}{\phi_{91}} \dots \dots \dots \text{Denklem 6.3}$$

$$\varphi_t = \left[\log(t+1) \left\{ 0.1473 \exp\left(0.5443 \frac{w}{b}\right) \ln\left(\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO}}\right) + 0.1482 \ln\left(\frac{w}{b}\right) + 0.5879 \right\} + \ln\left(\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO}}\right) \left\{ 0.2118 \left(\frac{w}{b}\right) - 0.4233 \right\} - 0.4529 \ln\left(\frac{w}{b}\right) - 0.3438 \right] \dots\dots\dots \text{Denklem 6.4}$$

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO}} = \frac{r.(\text{SiO}_2)_{fa} + (1-r).(\text{SiO}_2)_{ce}}{r.(\text{CaO})_{fa} + (1-r).(\text{CaO})_{ce}} \dots\dots\dots \text{Denklem 6.5}$$

Burada;

- f_{c91} : SSB'nin 91 günlük tahmini basınç dayanımı (MPa),
- w/b : su/bağlayıcı oranı,
- w_{fa} , w_{ce} : uçucu kül, çimento miktarı (kg/m^3),
- $(\text{CaO})_{fa}$: uçucu küldeki kalsiyum oksit miktarı (%),
- $(\text{CaO})_{ce}$: çimentodaki kalsiyum oksit miktarı (%),
- C : uçucu kül-çimento karışımının toplam CaO içeriği (kg/m^3),
- f_{ct} : SSB'nin t günlük tahmini basınç dayanımı (MPa),
- φ_t : t'nci yaşta dayanım kazanma oranı,
- r : uçucu külün çimento ile yer değiştirme oranı (%)
- $(\text{SiO}_2)_{fa}$: uçucu küldeki SiO_2 içeriği (%),
- $(\text{SiO}_2)_{ce}$: çimentodaki SiO_2 içeriği (%),
- SiO_2 : uçucu kül-çimento karışımındaki toplam SiO_2 içeriği (kg/m^3) olarak ifade edilmiştir.

Bu denklemler yardımı ile deneysel çalışmada üretilen SSB karışımlarının tahmini basınç dayanımları hesaplanmıştır. Hesaplanan tahmini basınç dayanımları Çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Uçucu küllü SSB karışımlarına ait 7, 28 ve 90 günlük tahmini basınç dayanım değerleri, (Nipatsat ve Tangtermsirikul, 2000)

Karışım adı	Tahmini basınç dayanımları, f_{ct} , (MPa)		
	7 günlük f_{c7} , (MPa)	28 günlük f_{c28} , (MPa)	90 günlük f_{c90} , (MPa)
20UK	37.9	48.8	58.6
20UK0.25PL	36.1	47.0	56.8
20UK0.50PL	34.6	45.6	55.4
20UK0.75PL	33.0	44.0	53.8
40UK	24.7	36.8	47.6
40UK0.25PL	23.4	35.4	46.2
40UK0.50PL	21.5	33.4	44.1
40UK0.75PL	20.9	32.7	43.3
60UK	14.7	26.0	36.0
60UK0.25PL	14.1	25.2	35.1
60UK0.50PL	13.6	24.6	34.5
60UK0.75PL	13.9	24.9	34.8

f_{c7} , f_{c28} ve f_{c90} ; Nipatsat ve Tangtermsirikul (2000)'un uçucu kül içeren SSB'lerin basınç dayanımını tahminlemek amacıyla yapmış olduğu çalışmada karışımların su/bağlayıcı ile CaO/SiO_2 oranlarına ve gün faktörüne bağlı olarak bulduğu matematiksel bağıntılar kullanılarak elde edilen 7, 28 ve 90 günlük tahmini basınç dayanımı değerlerini MPa cinsinden ifade etmektedir. Karışımlara ait tahmini basınç dayanım değerlerinin (f_{c7} , f_{c28} ve f_{c90}) hesapları Çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

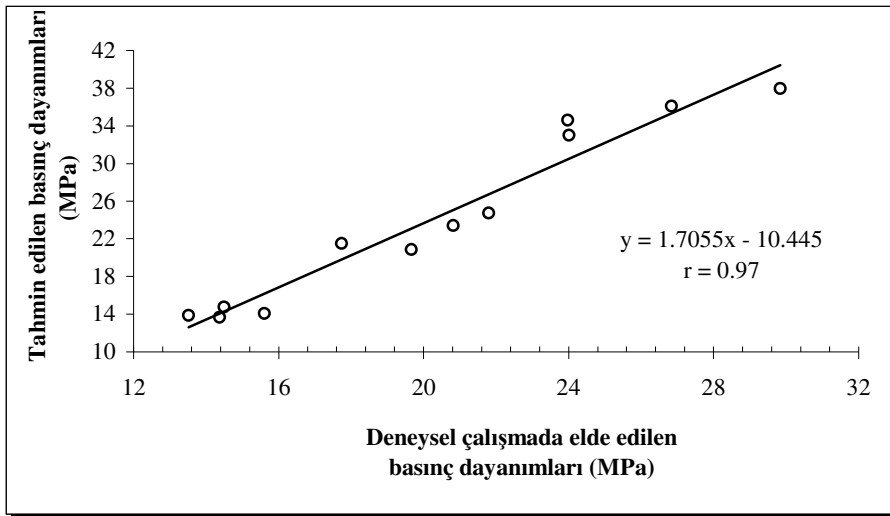
Çizelge 6.4. Karışımların 7, 28 ve 90 günlük tahmini basınç dayanım değerleri hesaplanması (Nipatsat ve Tangtermsirikul, 2000)

Uçucu küllü karışımlar	Çimento (kg/m ³)	Uçucu kül (kg/m ³)	Su/ bağlayıcı (w/b)	(w/b) ^{-0.54}	CaO (C) (kg/m ³)	Log (C)	Log(C)- 1.7	f _{c91} (MPa)
20UK	240	60	0.41	1.62	154.7	2.2	0.49	58.6
20UK0.25PL	240	60	0.43	1.57	154.7	2.2	0.49	56.8
20UK0.50PL	240	60	0.45	1.54	154.7	2.2	0.49	55.4
20UK0.75PL	240	60	0.47	1.50	154.7	2.2	0.49	53.8
40UK	180	120	0.45	1.53	121.7	2.1	0.39	47.6
40UK0.25PL	180	120	0.48	1.49	121.7	2.1	0.39	46.2
40UK0.50PL	180	120	0.51	1.44	121.7	2.1	0.39	44.1
40UK0.75PL	180	120	0.52	1.43	121.7	2.1	0.39	43.3
60UK	120	180	0.49	1.48	88.8	1.9	0.25	36.0
60UK0.25PL	120	180	0.50	1.45	88.8	1.9	0.25	35.1
60UK0.50PL	120	180	0.51	1.43	88.8	1.9	0.25	34.5
60UK0.75PL	120	180	0.51	1.44	88.8	1.9	0.25	34.8

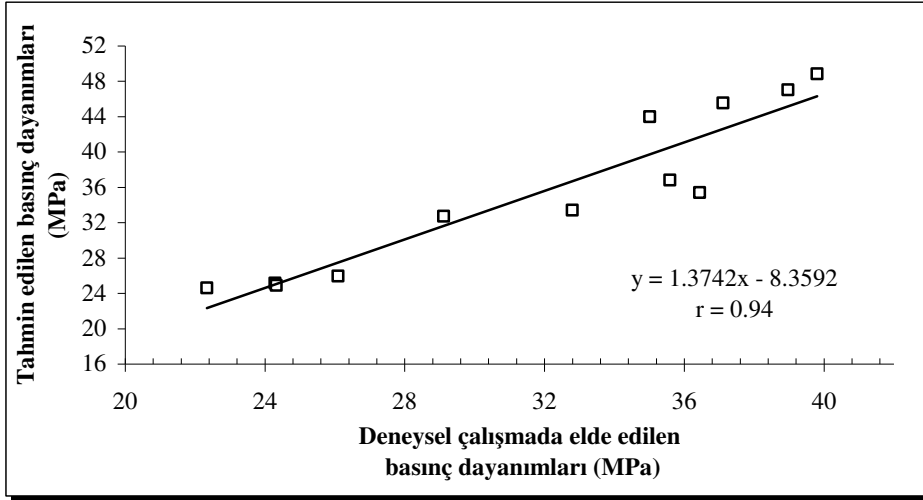
Çizelge 6.4. Karışımların 7, 28 ve 90 günlük tahmini basınç dayanım değerleri hesaplanması (Nipatsat ve Tangtermsirikul, 2000)- Devamı

Uçucu küllü karışımlar	SiO ₂ (kg/m ³)	SiO ₂ / CaO	ln (SiO ₂ / CaO)	ln (w/b)	exp(0.5443x w/b)	(0.2118 (w/b)- 0.4233	Φ ₍₇₎	Φ ₍₂₈₎	Φ ₍₉₀₎	f _{c7} MPa	f _{c28} MPa
20UK	76.6	0.5	-0.70	-0.89	1.67	-0.34	0.55	0.71	0.85	37.9	48.8
20UK0.25PL	76.6	0.5	-0.70	-0.84	1.72	-0.33	0.53	0.69	0.83	36.1	47.0
20UK0.50PL	76.6	0.5	-0.70	-0.80	1.76	-0.33	0.51	0.67	0.81	34.6	45.6
20UK0.75PL	76.6	0.5	-0.70	-0.76	1.80	-0.32	0.49	0.65	0.79	33.0	44.0
40UK	94.2	0.8	-0.26	-0.79	1.77	-0.33	0.46	0.69	0.89	24.7	36.8
40UK0.25PL	94.2	0.8	-0.26	-0.74	1.81	-0.32	0.45	0.67	0.88	23.4	35.4
40UK0.50PL	94.2	0.8	-0.26	-0.68	1.89	-0.32	0.42	0.65	0.86	21.5	33.4
40UK0.75PL	94.2	0.8	-0.26	-0.66	1.92	-0.31	0.41	0.65	0.86	20.9	32.7
60UK	111.8	1.3	0.23	-0.72	1.84	-0.32	0.40	0.70	0.98	14.7	26.0
60UK0.25PL	111.8	1.3	0.23	-0.69	1.88	-0.32	0.39	0.70	0.97	14.1	25.2
60UK0.50PL	111.8	1.3	0.23	-0.66	1.91	-0.31	0.39	0.70	0.97	13.6	24.6
60UK0.75PL	111.8	1.3	0.23	-0.68	1.89	-0.32	0.39	0.70	0.97	13.9	24.9

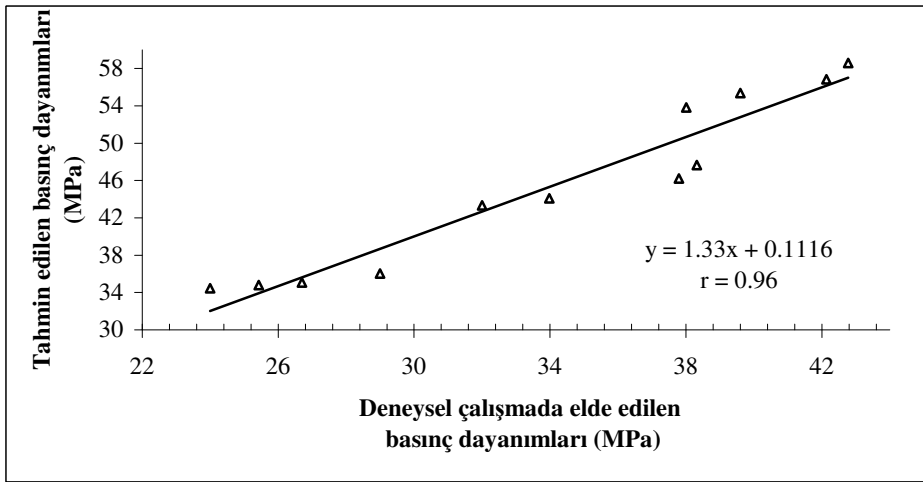
Deneysel çalışmada uçucu küllü ve lifli SSB numunelerine ait elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri ile Nipatsat ve Tangtermsirikul (2000)'un yapmış olduğu çalışmada elde ettiği formüller yardımıyla tahmin edilen basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen basınç dayanımı değerleri ile tahmini basınç dayanım değerleri arasındaki korelasyon katsayıları 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla 0.97, 0.94 ve 0.96 olarak elde edilmiştir. Elde edilen korelasyon katsayılarının 1.00'a çok yakın olması kıyaslanan basınç dayanımları arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Nipatsat ve Tangtermsirikul (2000)'un yapmış olduğu çalışmada elde ettiği matematiksel bağıntıların güvenilir olduğu da söylenebilir.



Şekil 6.15. Uçucu küllü ve lifli SSB numunelerine ait deneysel çalışmada elde edilen 7 günlük basınç dayanımı değerleri ile tahmin edilen basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki



Şekil 6.16. Uçucu küllü ve lifli SSB numunelerine ait deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri ile tahmin edilen basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki



Şekil 6.17. Uçucu küllü ve lifli SSB numunelerine ait deneysel çalışmada elde edilen 90 günlük basınç dayanımı değerleri ile tahmin edilen basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki

6.3. Silindir Yarma Deneyi Sonuçları

% 0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ve % 0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif içeren toplam 16 farklı kompozisyonundan hazırlanmış 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde yapılan 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma deneyi sonuçları Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. SSB karışımlarına ait deneysel çalışmada elde edilen 7, 28 ve 90 günlük ortalama silindir yarma dayanımları, f_{ctk} , (MPa)

SSB karışım adı	Su/bağlayıcı oranları	Yarmada çekme dayanımları, f_{ctk} , (MPa)		
		7 günlük f_{ctk7} (MPa)	28 günlük f_{ctk28} (MPa)	90 günlük f_{ctk90} (MPa)
Kontrol	0.40	3.4	3.8	4.3
0.25PL	0.43	3.3	3.5	4.6
0.50PL	0.44	3.7	4.0	4.6
0.75PL	0.45	3.4	3.5	4.1
20UK	0.41	3.4	3.8	4.1
20UK0.25PL	0.43	3.2	3.9	4.6
20UK0.50PL	0.45	3.1	4.1	4.5
20UK0.75PL	0.47	3.0	3.6	4.2
40UK	0.45	2.6	3.9	4.5
40UK0.25PL	0.48	2.4	3.0	3.9
40UK0.50PL	0.51	2.7	2.9	3.5
40UK0.75PL	0.52	2.2	3.1	3.3
60UK	0.49	2.2	2.9	3.1
60UK0.25PL	0.50	2.0	2.9	3.2
60UK0.50PL	0.51	1.7	2.8	3.0
60UK0.75PL	0.51	2.0	2.7	3.1

Burada;

f_{ctk7} , f_{ctk28} ve f_{ctk90} ; deneysel çalışmada 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde yapılan basınç dayanım testi sonucu elde edilen 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımı sonuçlarını MPa cinsinden ifade etmektedir.

Deneysel çalışmada SSB karışımlarına ait çekme dayanımları;

$$f_{ctk} = \frac{2.P_k}{\pi.d.h} \dots\dots\dots \text{Denklem 6.6}$$

formülünden elde edilmiştir. Burada;

f_{ctk} : silindir çekme dayanımı (MPa),

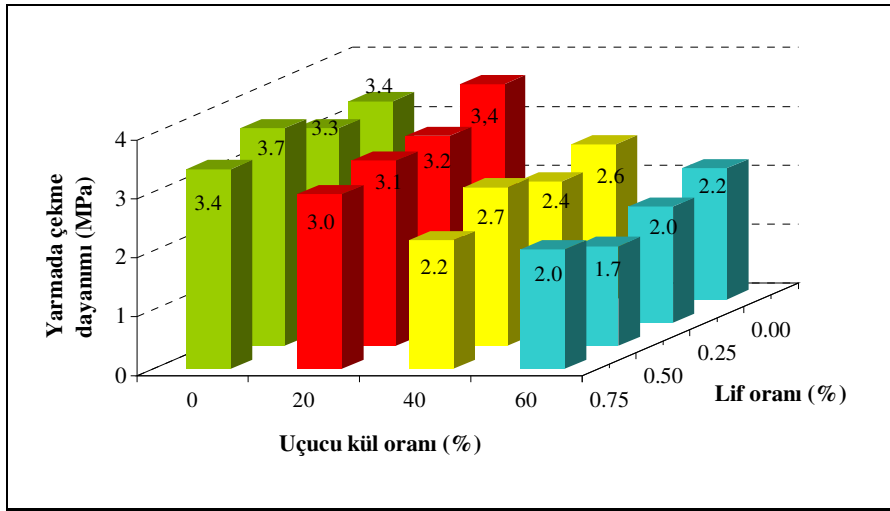
P_k : silindirin yarılmasına neden olan kuvvet (N),

d : silindir çapı (mm),

h : silindir yüksekliği (mm)'ni ifade etmektedir.

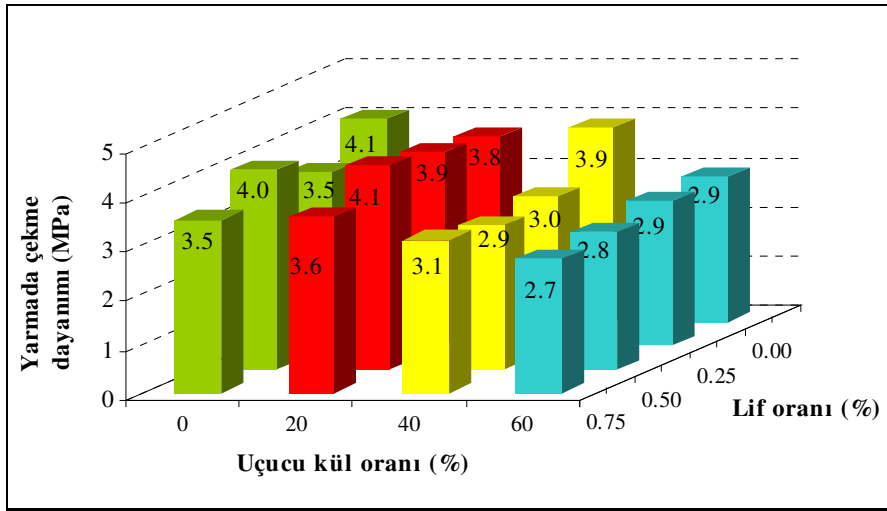
Deneysel çalışma sonucunda elde edilen SSB karışımlarına ait 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanım değerleri uçucu kül ve lif miktarına bağlı olarak Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de gösterilmiştir.

Karışımların 7 günlük ortalama silindir yarma dayanımları; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 3.3 ile 3.7 MPa arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 3.0 ile 3.4 MPa arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 2.2 ile 2.7 MPa arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 1.7 ile 2.2 MPa arasında değişmektedir. 7 gün sonunda kontrol karışımlarına kıyasla %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda %4-15 arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda %22-36 arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda %34-54 arasında daha düşük çekme dayanım değerleri elde edilmiştir.



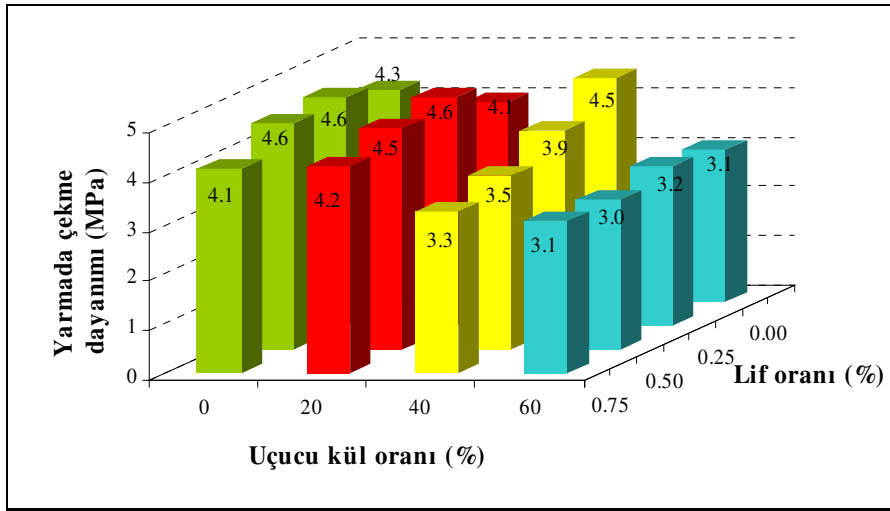
Şekil 6.18. Deneysel çalışmada elde edilen 7 günlük ortalama silindirik yarma dayanımları

Karışımların 28 günlük ortalama silindirik yarma dayanımları; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 3.5 ile 4.1 MPa arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 3.6 ile 4.1 MPa arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 2.9 ile 3.9 MPa arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 2.7 ile 2.9 MPa arasında değişmektedir. 28 günlük ortalama çekme dayanımlarında %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımların çekme dayanımları kontrol karışımlarına oranla %2-12 daha yüksek, %40 ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda ise sırasıyla %5-28 ve %16-31 arasında daha düşük değerler almıştır.



Şekil 6.19. Karışımların 28 günlük ortalama yarmada çekme dayanım değerleri

Karışımların 90 günlük ortalama silindir yarma dayanımları; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 4.1 ile 4.6 MPa arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 4.1-4.6 MPa arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 3.3 ile 4.5 MPa arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 3.0 ile 3.2 MPa arasında değişmektedir. 90 gün sonunda kontrol karışımlarına kıyasla %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda hemen hemen aynı değerler elde edilmiştir. %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda %15-24 arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda %26-34 arasında daha düşük çekme dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.20. Karışımların 90 günlük ortalama yarmada çekme dayanım değerleri

Kontrol karışımları ile %0.25, 0.50 ve 0.75 lif içeren karışımlarda çimento yerine %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımlarına etkileri Şekil 6.21, Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te gösterilmiştir. Burada;

- çimento yerine %20 oranında uçucu kül kullanılan karışımların 7 günlük çekme dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla biraz düşük olduğu, ancak, 28 ve 90 günlük çekme dayanımlarının kontrol karışımları ile hemen hemen aynı yada biraz daha yüksek değer aldığı,

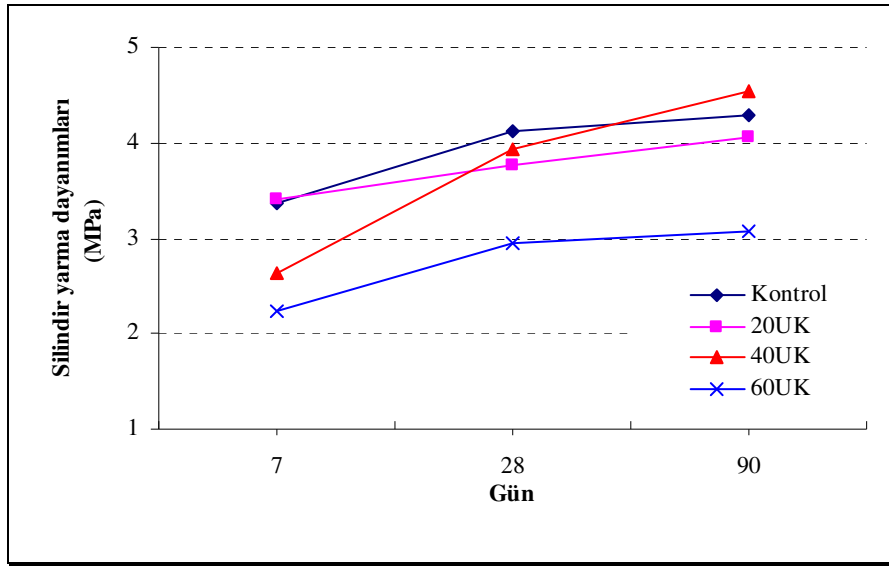
- çimento yerine %40 oranında uçucu kül kullanılan karışımların 7, 28 ve 90 günlük çekme dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla daha düşük değerler aldığı,

- çimento yerine %60 oranında uçucu kül kullanılan karışımların 7, 28 ve 90 günlük çekme dayanımlarının belirgin bir şekilde kontrol karışımlarından daha düşük değerler aldığı görülmektedir.

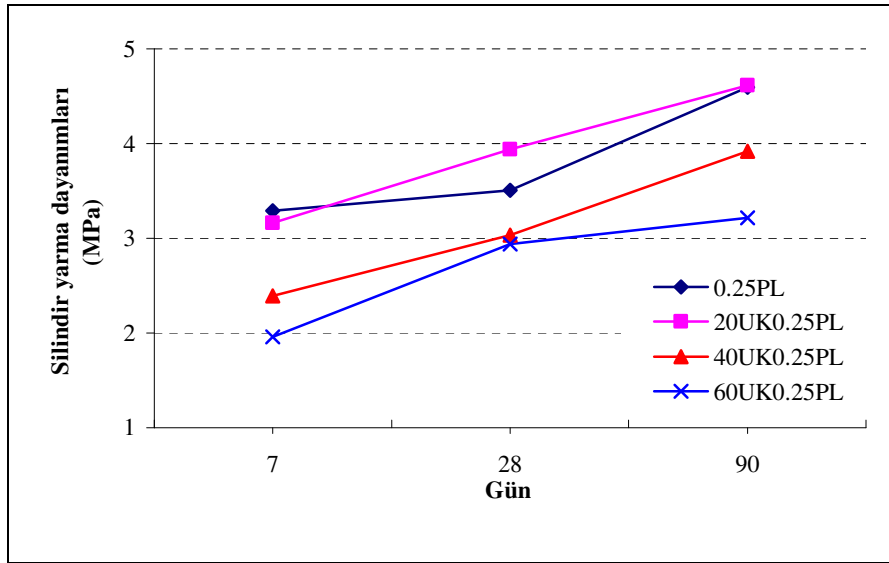
Kontrol karışımları ile çimento yerine %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanılan karışımlarda %0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkileri Şekil 6.25, Şekil 6.26, Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de gösterilmiştir. Burada; %0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif içeren karışımların 7, 28 ve 90 günlük çekme dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla önemli bir artış yada düşüşe yol açmadığı görülmektedir.

Deneyssel çalışmada optimum su muhtevasında maksimum kuru birim ağırlık esası ile hazırlanan karışımlarda uçucu kül ve lif miktarının artması S/B oranını arttırmış, dolayısıyla karışımların S/B oranları sabit tutulamamıştır. S/B oranının artması dayanıma olumsuz etki yarattığından lif miktarının silindir yarma dayanımına etkisi olmamakla beraber bu çalışma kapsamında az da olsa olumsuz etkisi görülmektedir.

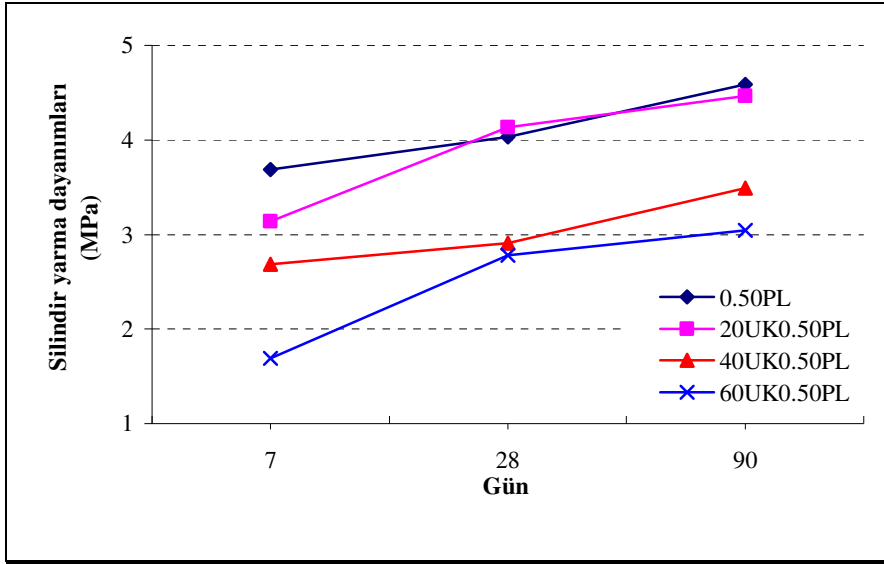
Deneyssel çalışmada elde edilen 28 günlük silindir yarma dayanımı sonuçları, ACI Committee 325’in belirlediği standart limitleri (2.75 ile 4.14 MPa) sağlamaktadır.



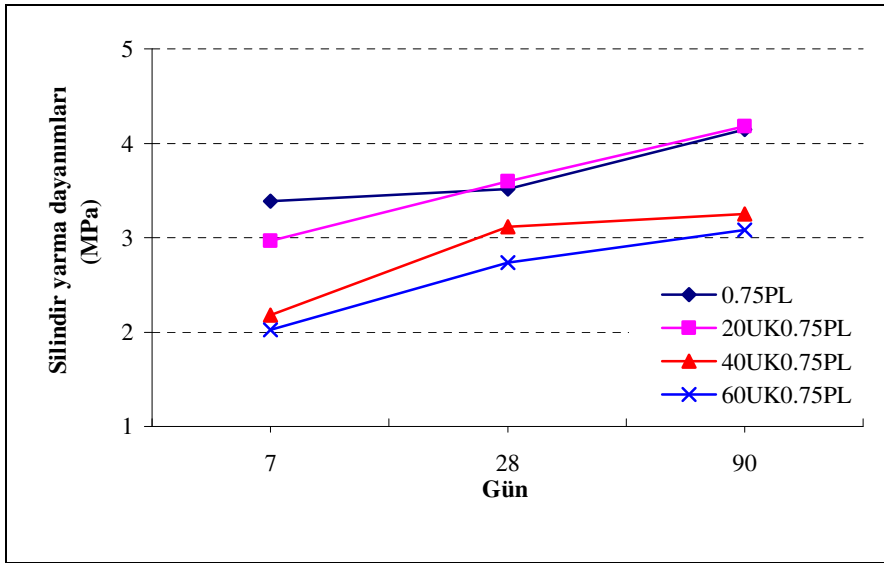
Şekil 6.21. Kontrol karışımlarında çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi



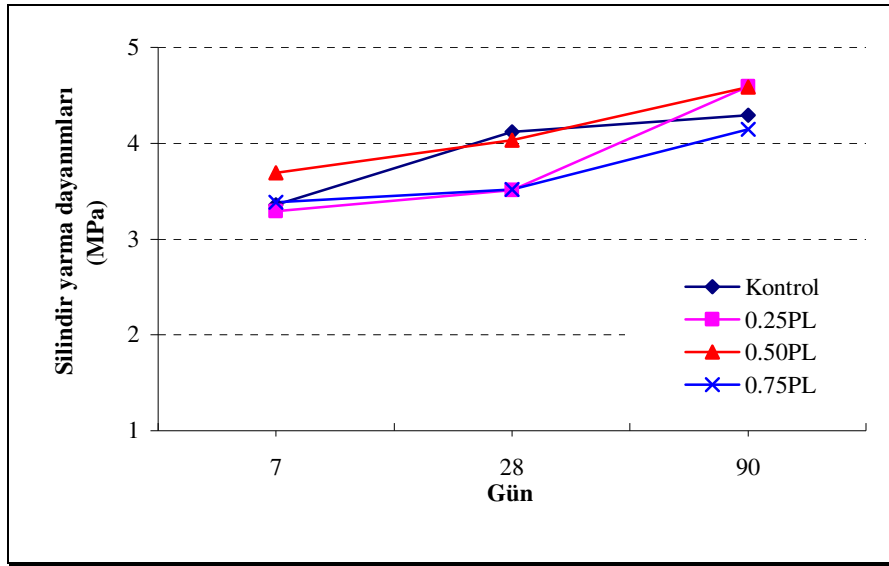
Şekil 6.22. %0.25 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi



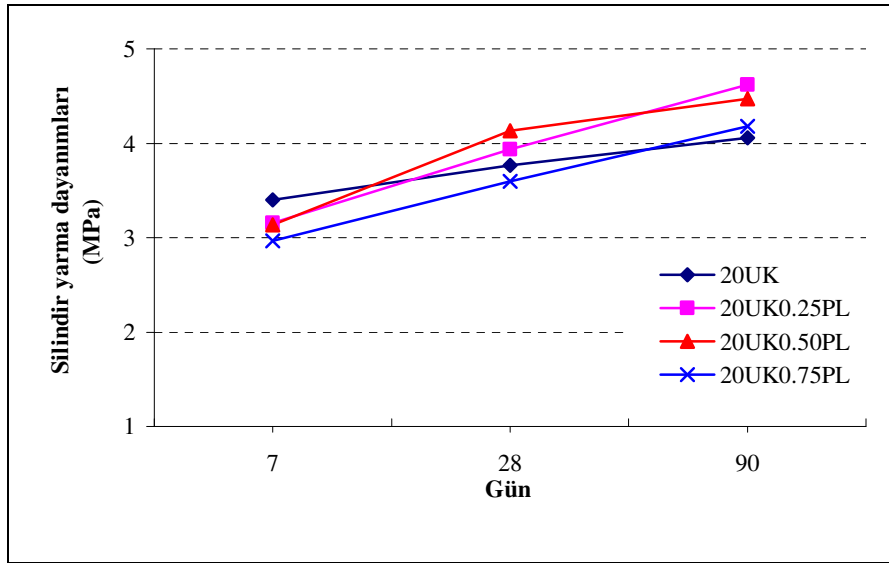
Şekil 6.23. %0.50 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi



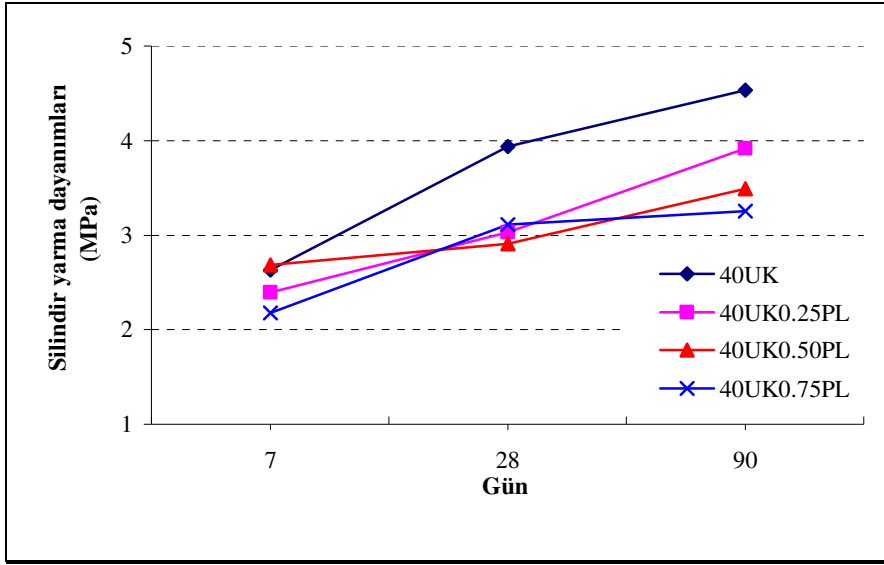
Şekil 6.24. %0.75 polipropilen lifli karışımlarda çimento yerine farklı oranlarda UK kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi



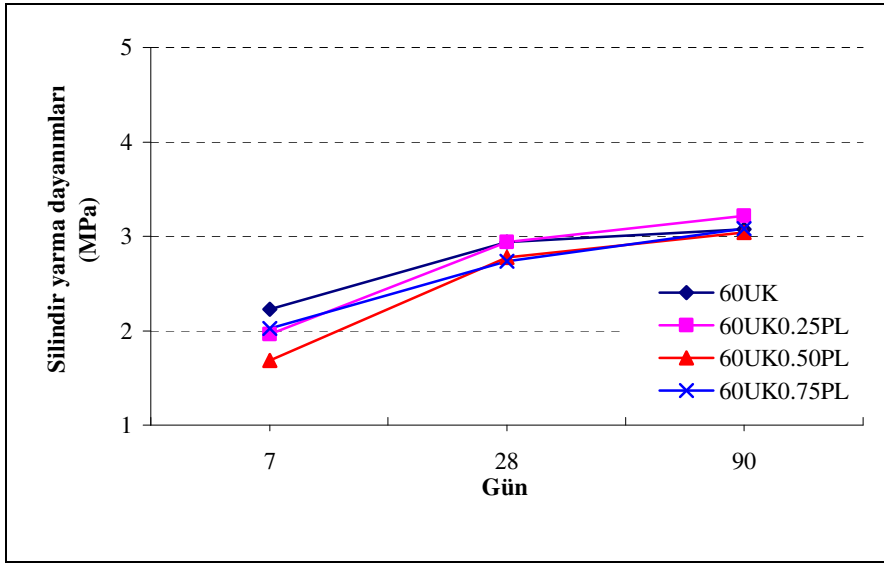
Şekil 6.25. Kontrol karışımlarında farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi



Şekil 6.26. %20 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi



Şekil 6.27. %40 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi



Şekil 6.28. %60 uçucu küllü karışımlarda farklı oranlarda polipropilen lif kullanımının 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımına etkisi

Yarmada çekme deneyinde polipropilen lifsiz ve polipropilen lifli 150/300 mm ayrıtlı silindir örneklerine ait deney sonundaki kırılma davranışlarına ait fotoğraflar Şekil 6.29’da gösterilmiştir. Şekil 6.29’dan da anlaşılacağı gibi polipropilen lifsiz örnek ortadan ikiye ayrılarak gevrek bir davranış sergilemiş ve maksimum yüke ulaştığı anda numunede gözle görülebilir boyutta çatlak oluşmuştur. Polipropilen lifli örnek ise sünek bir davranış sergilemiş ve maksimum yüke ulaştığı an oluşan çatlak kılcal boyutta kalmış ve örnek tamamen parçalanmamıştır. Liflerin 3 boyutlu ve süreksiz donatı oluşturacak şekilde rasgele dağılmış olarak matris içerisinde bulunmaları nedeniyle matris fazında üzerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprücükler olarak rol oynadığı, SSB’de oluşan gerilmelerin lifler tarafından karşılandığı ve betonda oluşan çatlakların kılcal düzeyde kaldığı söylenebilir.



(a)



(b)

Şekil 6.29. Yarmada çekme deneyinde polipropilen lifsiz ve polipropilen lifli 150/300 mm ayrıtlı silindir örneklerin kırılma davranış fotoğrafları (a) lifsiz örnek, (b) lifli örnek

6.4. Eğilme Deneyi Sonuçları

% 0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ve % 0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif içeren toplam 16 farklı kompozisyonda hazırlanmış 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örnekler üzerinde yapılan 28 günlük eğilme deneyi sonuçları Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6. SSB karışımlarının 28 günlük ortalama eğilme dayanımı değerleri

SSB karışım adı	Su/çimento oranları	Eğilme dayanımları, f_{e28} , (MPa)		
		28 günlük ortalama eğilme dayanımları, f_{e28} , (MPa)	Tahmin edilen eğilme dayanımları, $f_{e'28}$, (MPa)	Maksimum yüke karşılık gelen sehım değerleri, δ , (mm)
Kontrol	0.40	6.1	5.3	0.27
0.25PL	0.43	5.3	5.1	0.30
0.50PL	0.44	5.9	5.0	0.35
0.75PL	0.45	6.1	4.9	0.37
20UK	0.41	6.9	5.4	0.20
20UK0.25PL	0.43	6.8	5.2	0.31
20UK0.50PL	0.45	6.1	5.3	0.34
20UK0.75PL	0.47	5.9	5.1	0.34
40UK	0.45	5.7	5.2	0.26
40UK0.25PL	0.48	5.2	5.2	0.29
40UK0.50PL	0.51	5.0	5.0	0.31
40UK0.75PL	0.52	4.8	4.7	0.39
60UK	0.49	4.7	4.5	0.19
60UK0.25PL	0.50	4.4	4.3	0.21
60UK0.50PL	0.51	4.2	4.1	0.21
60UK0.75PL	0.51	4.3	4.3	0.26

Burada;

f_{e28} : deneysel çalışmada elde edilen 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örneklere ait 28 günlük ortalama eğilme dayanımı,

f_{c28} : deneysel çalışmada elde edilen 150/300 mm ayrıtlı silindirik örneklere ait 28 günlük ortalama basınç dayanımı,

$f_{e'28}$: deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük basınç dayanımına bağlı tahmini eğilme dayanımını ifade etmekte olup Denklem 6.7'de gösterilen matematiksel bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$f_{e'28} = (f_{c28})^{0.459} \dots\dots\dots \text{Denklem 6.7}$$

Deneysel çalışmada SSB karışımlarına ait eğilme dayanımları (f_{e28});

$$f_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_k \cdot l}{h^3} \dots\dots\dots \text{Denklem 6.8}$$

formülünden elde edilmiştir. Burada;

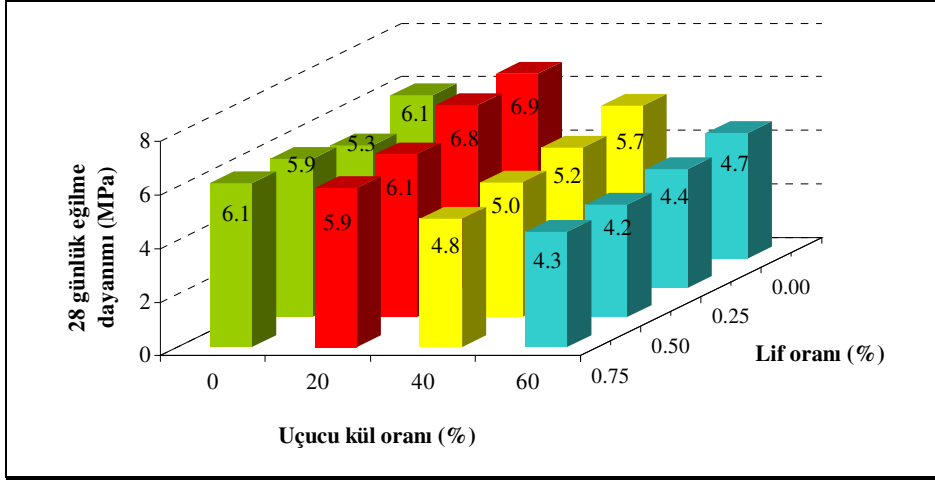
f_e : eğilmede çekme dayanımı (MPa),

P_k : uygulanan kuvvet (N),

l : mesnetler arası açıklık (mm),

h : kiriş numunenin yüksekliği(mm)'ni ifade etmektedir.

SSB karışımlarına ait deneysel çalışma sonucunda elde edilen 28 günlük eğilme dayanım değerleri uçucu kül ve lif miktarına bağlı olarak Şekil 6.30'da gösterilmiştir.



Şekil 6.30. Karışımların 28 günlük ortalama eğilme dayanımı değerleri

Karışımların 28 günlük ortalama eğilme dayanımları; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 5.3 ile 6.1 MPa arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 5.9-6.9 MPa arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 4.8-5.7 MPa arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 4.2-4.7 MPa arasında değişmektedir. 28 günlük ortalama eğilme dayanımlarında %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımların eğilme dayanımları kontrol karışımlarına oranla %3-28 daha yüksek, %40 ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda ise sırasıyla %1-22 ve %17-30 arasında daha düşük değerler almıştır.

Eğilme deneyi sonunda maksimum yükte ölçülen sehım değerleri incelendiğinde genel olarak uçucu kül oranı arttıkça sehım değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni S/B oranının artmasıyla dayanımın düşmesidir. Polipropilen lif miktarı arttıkça sehım değerinin azda olsa

S/B oranının yükselmesine rağmen arttığı, daha sünek bir yapının geliştiği gözlenmiştir. Liflerin beklenen olumlu etkisi S/B oranının artışının genelde gölgesinde kalmıştır.

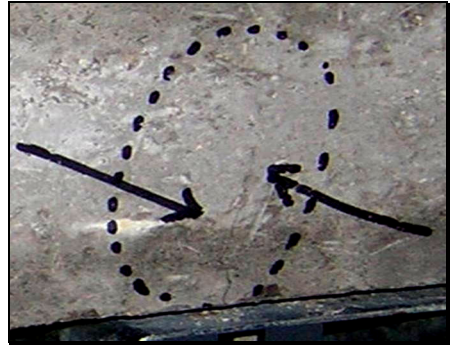
Eğilme deneyinde polipropilen lifsiz ve polipropilen lifli 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örneklerin kırılma davranış fotoğrafları Şekil 6.31’de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

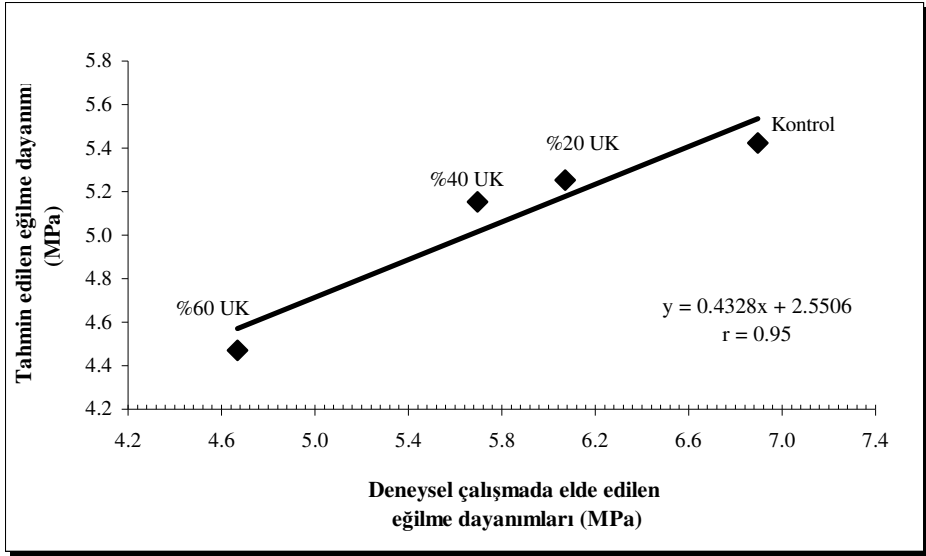
Şekil 6.31. Eğilme deneyinde polipropilen lifsiz ve polipropilen lifli 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örneklerin kırılma davranış fotoğrafları (a) lifsiz örnek, (b-c) lifli örnek

Şekil 6.31'den de anlaşılacağı gibi polipropilen lifsiz örnek ortadan ikiye ayrılarak gevrek bir davranış sergilemiş ve maksimum yüke ulaştığı anda numunede gözle görülebilir boyutta çatlak oluşmuştur. Polipropilen lifli örnek ise sünek bir davranış sergilemiş ve maksimum yüke ulaştığı an oluşan çatlak kılcal boyutta kalmıştır.

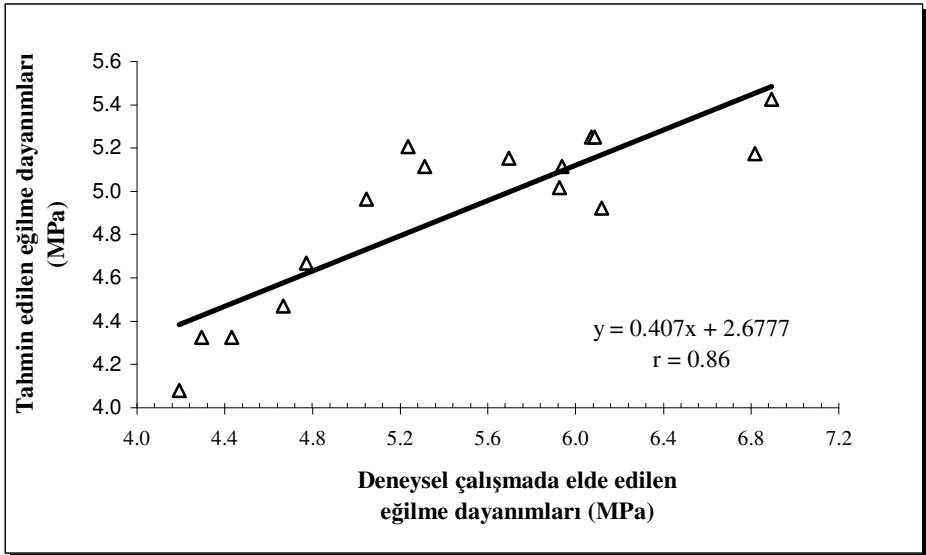
Kontrol ve uçucu küllü numunelerin deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük eğilme dayanımı değerleri ile tahmin edilen eğilme dayanım değerleri arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 6.32 ve Şekil 6.33'te gösterilmiştir.

Deneysel çalışmada elde edilen eğilme dayanımı değerleri ile tahmini eğilme dayanım değerleri arasındaki korelasyon katsayıları 28 gün için sırasıyla 0.95 ve 0.86 olarak elde edilmiştir. Elde edilen korelasyon katsayılarının 1'e yakın olması deneysel çalışmada elde edilen eğilme dayanım değerleri ile Denklem 6.8'de gösterilen matematiksel bağıntıdan elde edilen eğilme dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük eğilme dayanımları, yine deneysel çalışmada elde edilen basınç dayanımlarının %14'ü ile %20'si arasında değişmektedir.



Şekil 6.32. Uçucu küllü karışımlara ait ortalama eğilme dayanım değerleri ile tahmin edilen eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki



Şekil 6.33. Karışımlara ait ortalama eğilme dayanım değerleri ile tahmin edilen eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki

6.5. Ultra Ses Deneyi Sonuçları

% 0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ve % 0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif içeren toplam 16 farklı kompozisyonda hazırlanmış 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örnekler üzerinde yapılan 28 günlük ultrases deneyi sonuçları Çizelge 6.7’de, elde edilen hız değerleri ile beton kalitesi hakkında değerlendirme kriterleri ise Çizelge 6.8’de verilmiştir. 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik numune üzerinde özel aygıtlarla üretilen ultrases dalgalarının, beton elemanın bir ucundan diğer ucuna varabilmesi için geçen t zamanı mikro-saniye mertebesinde ölçülmüştür. Beton içindeki V ses hızı;

$$V = \frac{L}{t} \dots\dots\dots \text{Denklem 6.9}$$

matematiksel bağıntısından (km/sn boyutunda) hesaplanmıştır.

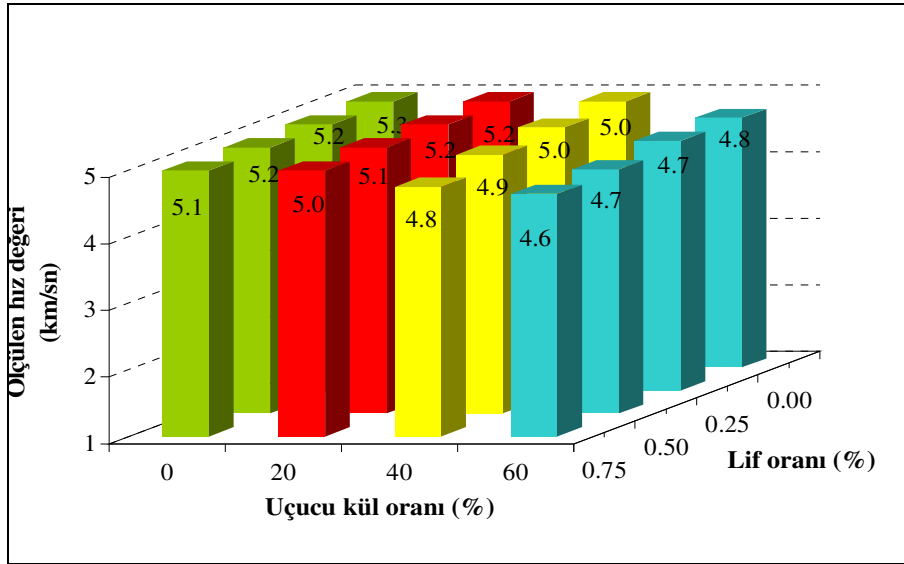
Çizelge 6.7. 28 günlük örneklerle ait ultrases deneyi sonuçları

SSB karışım adı	Ultrases dalga hız değerleri, V, (km/sn)	
	Ortalama hız (km/sn)	Yorum
Kontrol	5.3	Mükemmel
0.25PL	5.2	Mükemmel
0.50PL	5.2	Mükemmel
0.75PL	5.1	Mükemmel
20UK	5.2	Mükemmel
20UK0.25PL	5.2	Mükemmel
20UK0.50PL	5.1	Mükemmel
20UK0.75PL	5.0	Mükemmel
40UK	5.0	Mükemmel
40UK0.25PL	5.0	Mükemmel
40UK0.50PL	4.9	Mükemmel
40UK0.75PL	4.8	Mükemmel
60UK	4.8	Mükemmel
60UK0.25PL	4.7	Mükemmel
60UK0.50PL	4.7	Mükemmel
60UK0.75PL	4.6	Mükemmel

Çizelge 6.8. Ultrases değerleri ile beton kalitesinin değerlendirilme kriterleri

Dalga hızı(km/sn)	Beton kalitesi
> 4.5	Mükemmel
3.50 – 4.50	İyi
3.00 – 3.50	Şüpheli
2.00 – 3.00	Zayıf
< 2.00	Çok zayıf

SSB karışımlarına ait deneysel çalışma sonucunda elde edilen 28 günlük ultrases değerleri uçucu kül ve lif miktarına bağlı olarak Şekil 6.34’de gösterilmiştir.



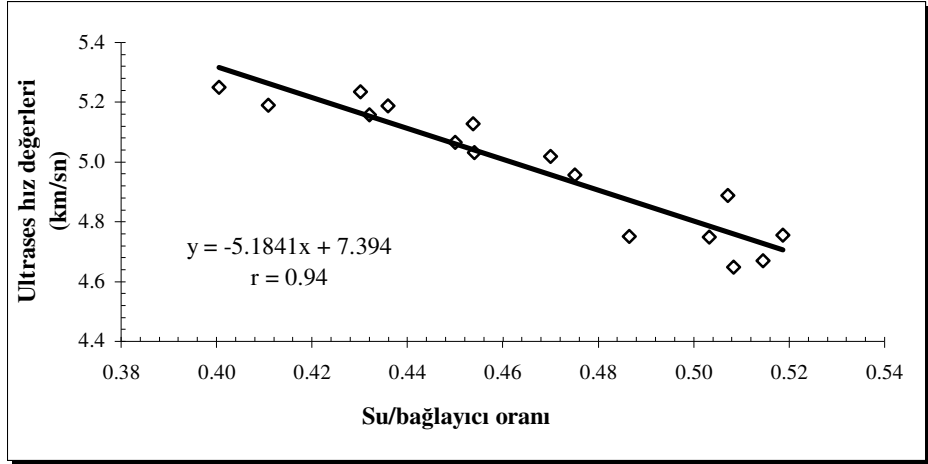
Şekil 6.34. Karışımlara ait ortalama ultrases değerleri ile polipropilen lif oranı arasındaki ilişki

Karışımların 28 günlük ortalama ultrases değerleri; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 5.1 ile 5.3 km/sn arasında değişmekte iken %20

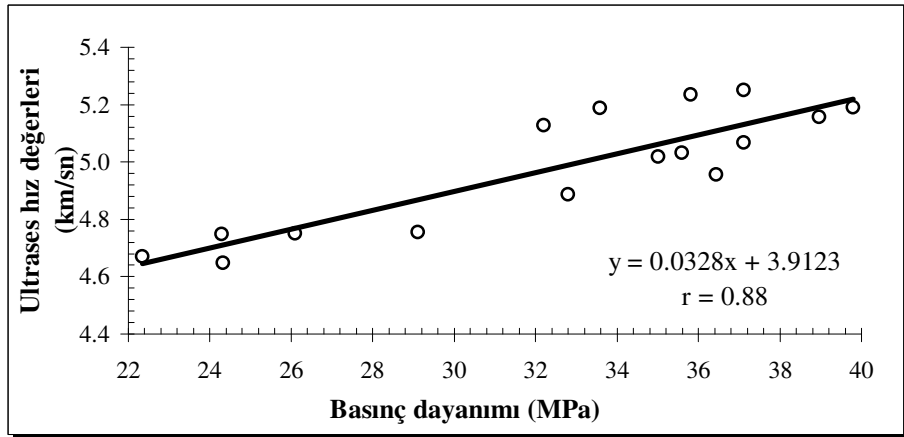
uçucu küllü/uçucu küllü/lifli örneklerde 5.0 ile 5.2 km/sn arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü/lifli örneklerde 4.8 ile 5.0 km/sn arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü/lifli örneklerde 4.6 ile 4.8 km/sn arasında değişmektedir. Deneysel çalışmada elde edilen tüm hız ölçümü değerleri 4.5 km/sn'den büyük olduğu için Çizelge 6.8'de gösterilen değerlendirme kriterine göre deneysel çalışmada elde edilen SSB örneklerin beton kalitesi mükemmel olarak yorumlanabilir. Elde edilen hız değerlerinin yüksek olmasından (600 mm'lik sabit mesafede alıcıdan gönderilen dalgaların kısa sürede göndericiye ulaşması) numunelerdeki porozitenin az olduğu dolayısıyla üretilen SSB karışımların durabilitesinin de yüksek olabileceği sonucuna varılabilir.

Kontrol ve uçucu küllü/uçucu küllü lifli numunelerine ait deneysel çalışmada 28 nci günde elde edilen ultrases değerleri ile su/bağlayıcı oranı, 28 günlük basınç dayanımı ve maksimum kuru birim ağırlıklar arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 6.35, Şekil 6.36 ve Şekil 6.37'de gösterilmiştir. Buradan; ultrases değerleri ile su/bağlayıcı oranının ters orantılı olduğu, basınç dayanımı ve maksimum kuru birim ağırlık değerleri ile doğru orantılı lineer bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

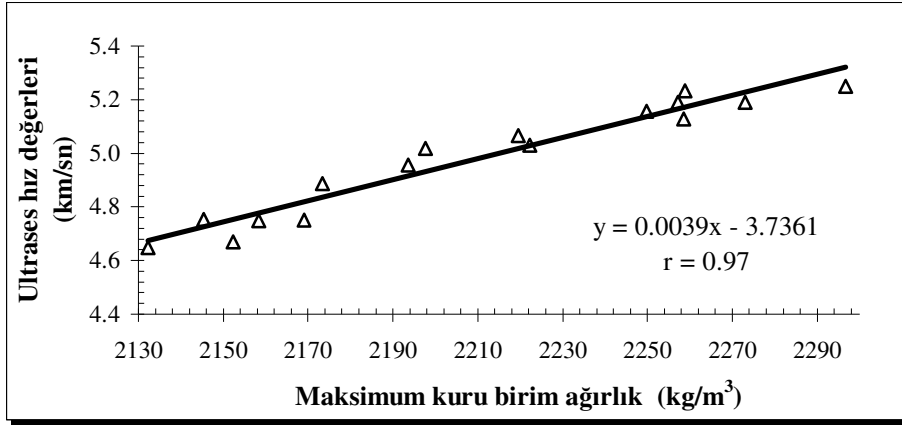
Deneysel çalışmada elde edilen ultrases değerleri ile su/bağlayıcı oranları, basınç dayanımları ve maksimum kuru birim ağırlıklar arasındaki korelasyon katsayıları sırasıyla 0.94, 0.88 ve 0.97 olarak elde edilmiştir. Elde edilen korelasyon katsayılarının 1.00'e yakın olması deneysel çalışmada elde edilen ultrases değerleri ile su/bağlayıcı oranları, basınç dayanımları ve maksimum kuru birim ağırlıklar arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.



Ş ekil 6.35. Karış ımların ultras es dalga hızları ile su/ba ğ layıcı oranları arasındaki ilişki



Ş ekil 6.36. Karış ımların ultras es dalga hızları ile 28 g ünlük bas ınc dayanımları arasındaki ilişki



Şekil 6.37. Karışım ların ultras es dalga hız ları ile maksimum kuru birim a ęırlık ları arasındaki ilişki

6.6. Elastisite Mod ¼ l¼ Sonuç ları

% 0, 20, 40 ve 60 oran larında uçucu kül ve % 0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oran larında polipropilen lif içeren toplam 16 farklı kompozisyon da hazırlanmış 150/300 mm ayrıtlı silindir örnekler üzerinde yapılan 28 g¼nl¼k elastisite mod ¼ l¼ ölç¼m¼ deney sonuç ları, dinamik elastisite mod ¼ l¼leri ve enerji yutabilme kapasiteleri (tokluk) Çizelge 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Elastisite modülü, dinamik elastisite modülü ve tokluk sonuçları

SSB karışım adı	Elastisite modülleri, E (MPa)	Dinamik elastisite modülleri, E _d (MPa)	Enerji yutabilme yeteneği (tokluk), R (N.mm/mm ³)
Kontrol	37250	64528	0.026
0.25PL	39157	63080	0.054
0.50PL	30108	61954	0.072
0.75PL	27470	60553	0.086
20UK	35625	62422	0.049
20UK0.25PL	37838	61010	0.050
20UK0.50PL	31711	58076	0.054
20UK0.75PL	30530	56416	0.068
40UK	33768	57333	0.051
40UK0.25PL	33158	54922	0.054
40UK0.50PL	27301	52922	0.054
40UK0.75PL	24548	49434	0.082
60UK	23514	49898	0.052
60UK0.25PL	25625	49601	0.076
60UK0.50PL	21758	47863	0.075
60UK0.75PL	17800	46974	0.081

Hesaplanan elastisite modülleri;

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \dots\dots\dots \text{Denklem 6.10}$$

bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir. Burada;

σ_2 : nihai basınç gerilmesinin %40'ı (MPa),

σ_1 : 0.5×10^{-4} birim kısalma değerine karşılık gelen basınç gerilmesi (MPa),

ϵ_2 : nihai basınç gerilmesinin %40'ına karşılık gelen birim kısalma (mm/mm),

ϵ_1 : 0.5×10^{-4} birim kısalma (mm/mm) değeri olarak ifade edilmektedir.

Dinamik elastisite modülleri ise;

$$E_d = 10^4 \times V^2 \times \frac{\gamma_k}{9810} \dots\dots\dots \text{Denklem 6.11}$$

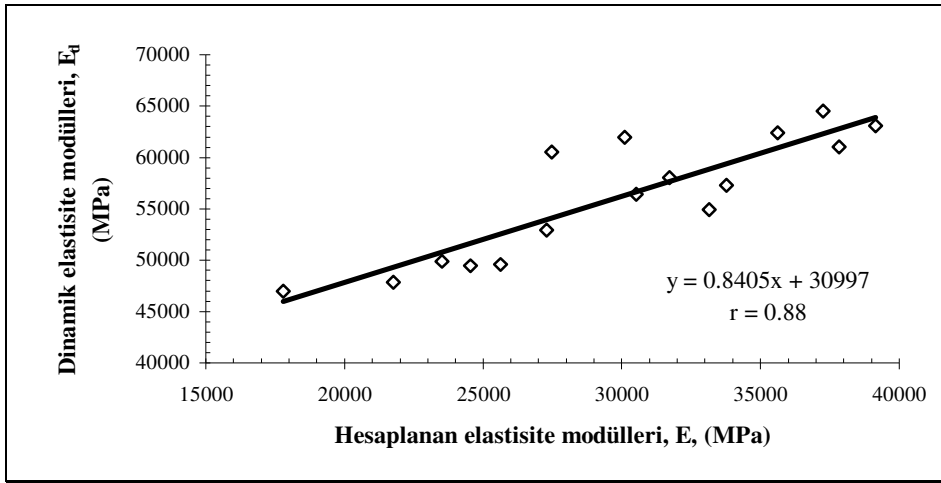
bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Burada;

E_d : dinamik elastisite modülü (MPa),

V : deneysel çalışmada 100/100/600 mm ayrıtlı prizmatik örnekler üzerinde 28 nci günde yapılan ultrases dalga hızı ölçüm değerleri (km/sn),

γ_k : SSB örneklerinin maksimum kuru birim ağırlıkları (kg/m^3) olarak ifade edilmektedir.

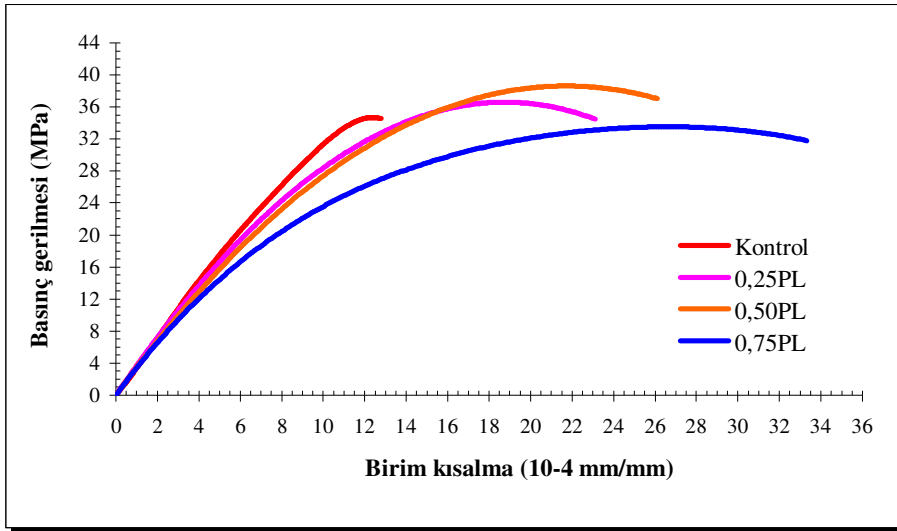
Hesaplanan elastisite modülleri ile dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki Şekil 6.38’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen elastisite modülleri ile dinamik elastisite modülleri arasındaki korelasyon katsayısı 0.88 olarak elde edilmiştir. Elde edilen korelasyon katsayılarının 1’e yakın olması, deneysel çalışmada elde edilen elastisite modülleri ile dinamik elastisite modülleri arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu gösterdiği söylenebilir.



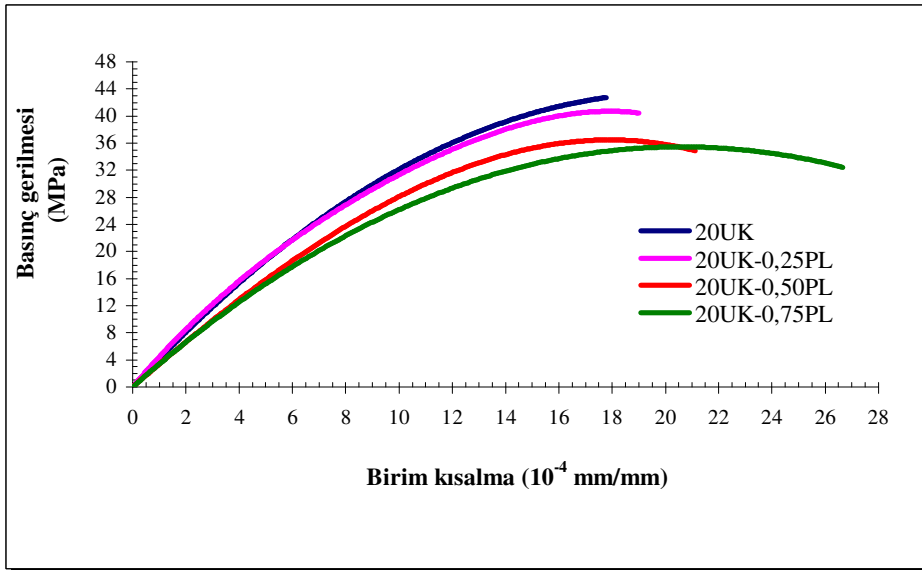
Şekil 6.38. Hesaplanan elastisite modülleri ile dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki

Şekil 6.39, 6.40, 6.41 ve 6.42’de SSB karışımlarına ait 28 günlük basınç gerilmesi-birim kısalma eğrileri gösterilmiştir. Basınç gerilmesi-birim kısalma eğrileri altında kalan alanlardan SSB karışımlarına ait enerji yutabilme yetenekleri (tokluk) hesaplanmıştır. Karışımlarda lif oranı arttıkça tokluk değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu eğrilerden; uçucu kül ve polipropilen lif miktarı arttıkça birim kısalma değerlerinin arttığı, basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir.

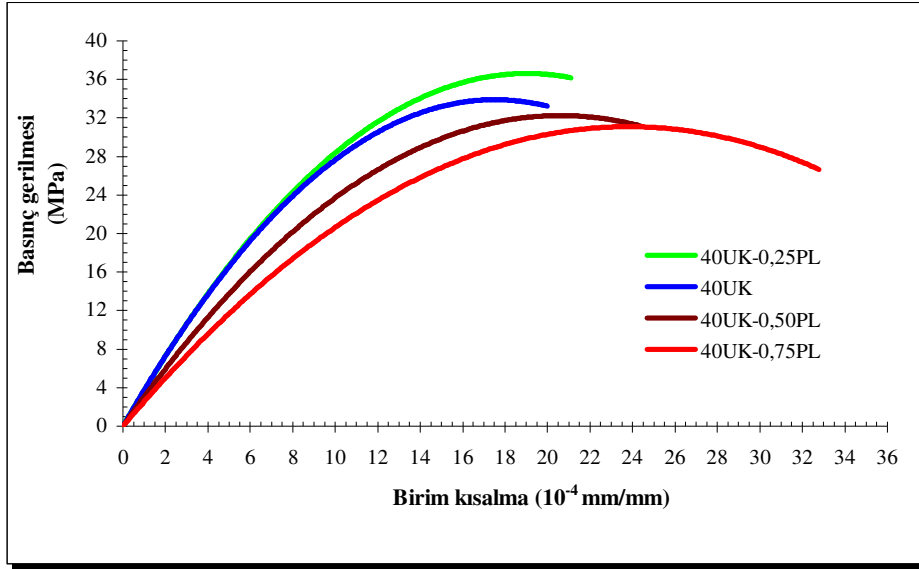
Şekil 6.43’te farklı oranlarda uçucu küllü SSB karışımlarına ait 28 günlük basınç gerilmesi-birim kısalma eğrileri gösterilmiştir.



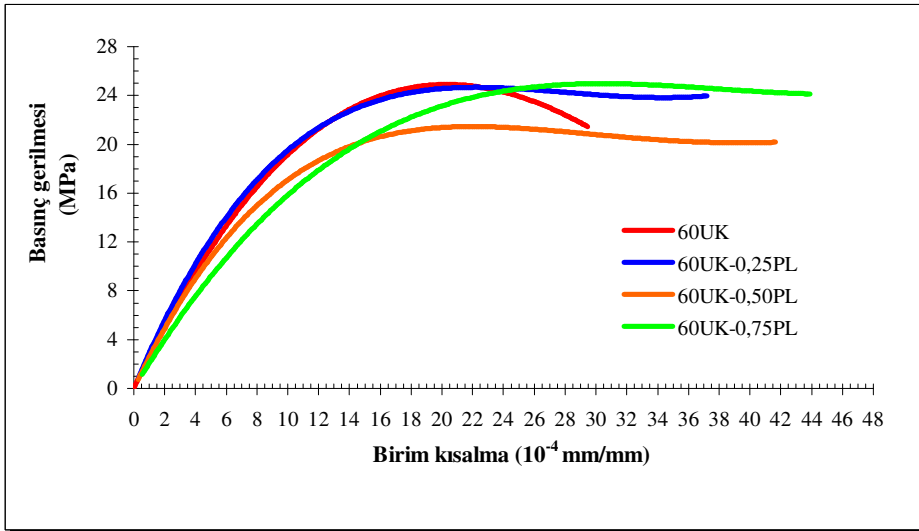
Şekil 6.39. Lifli ve lifsiz karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı – birim kısılma eğrileri



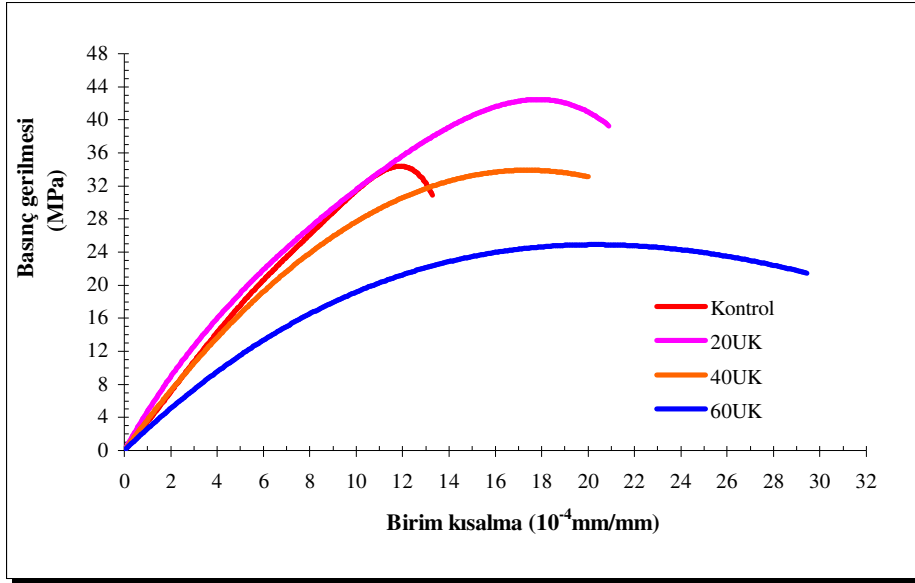
Şekil 6.40. %20 uçucu küllü karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı – birim kısılma eğrileri



Şekil 6.41. %40 uçucu küllü karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı – birim kısılma eğrileri



Şekil 6.42. %60 uçucu küllü karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı – birim kısılma eğrileri



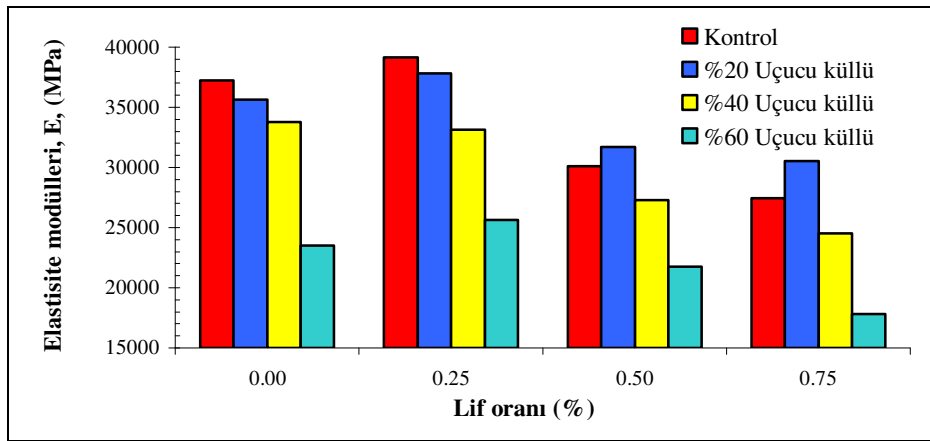
Şekil 6.43. Farklı oranlarda uçucu kül içeren karışımlara ait 28 günlük basınç dayanımı – birim kısalma eğrileri

Karışımların 28 günlük elastisite modülleri; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 27470 ile 39157 MPa arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 30530 ile 37838 MPa arasında, %40 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 24548 ile 33768 MPa arasında ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 17800 ile 25625 MPa arasında değişmektedir. 28 günlük hesaplanan elastisite modüllerinde, %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımların elastisite modülleri kontrol karışımlarına oranla %3-28 daha yüksek, %40 ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda ise sırasıyla %9-15 ve %28-37 oranları arasında daha düşük değerler almıştır.

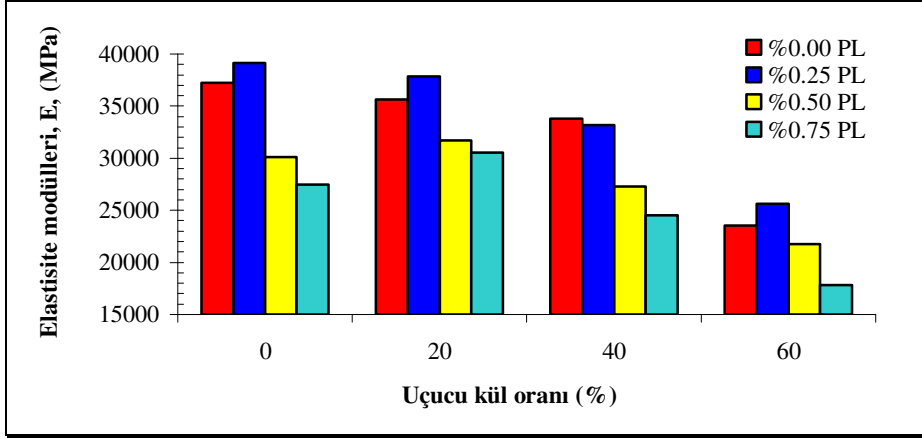
SSB karışımlarına ait elastisite modülünün lif oranına bağlı değişimi Şekil 6.44'te gösterilmiştir. Şekil 6.44'te genel itibarıyla %0.25 lif içeriğine sahip karışımların elastisite modülleri kontrol karışımına

kıyasla artış gösterirken, %0.50 ve 0.75 lif içeren karışımların elastisite modüllerinin kontrol karışımına kıyasla daha düşük değerler aldığı görülmektedir.

SSB karışımlarına ait elastisite modülünün uçucu kül oranına bağlı değişimi Şekil 6.45'te gösterilmiştir. Şekil 6.45'te genel itibarıyla, SSB karışımlarındaki uçucu kül miktarının artışı kontrol karışımına kıyasla elastisite modüllerinin daha düşük değerler almasına sebep olduğu görülmektedir.



Şekil 6.44. Kontrol ve uçucu küllü karışımların lif oranına bağlı olarak 28 günlük elastisite modülleri



Şekil 6.45. Kontrol ve polipropilen lifli karışımların uçucu kül oranına bağlı olarak 28 günlük elastisite modülleri

6.7. Darbe Deneyi Sonuçları

% 0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ve % 0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif içeren toplam 16 farklı kompozisyonda hazırlanmış 1 adet 150/300 mm ayrıtlı silindir örneklerden kesilerek 64 mm yüksekliğinde 3 adet disk numune üzerinde 28. günde yapılan darbe deneyi sonuçları Çizelge 6.10’da verilmiştir.

Darbede kırılma tokluk değerleri;

$$\frac{1}{9.81} \times N_k \times P \times H = R \times V \dots\dots\dots \text{Denklem 6.12}$$

formülünden elde edilmiştir. Burada;

N_k : kırılma oluşturan darbe sayısı,

P : darbe deneyinde kullanılan tokmak ağırlığı (kg),

H : darbe deneyinde tokmanın düşme yüksekliği (mm),

R : darbede kırılma tokluğu (Nmm/mm^3),

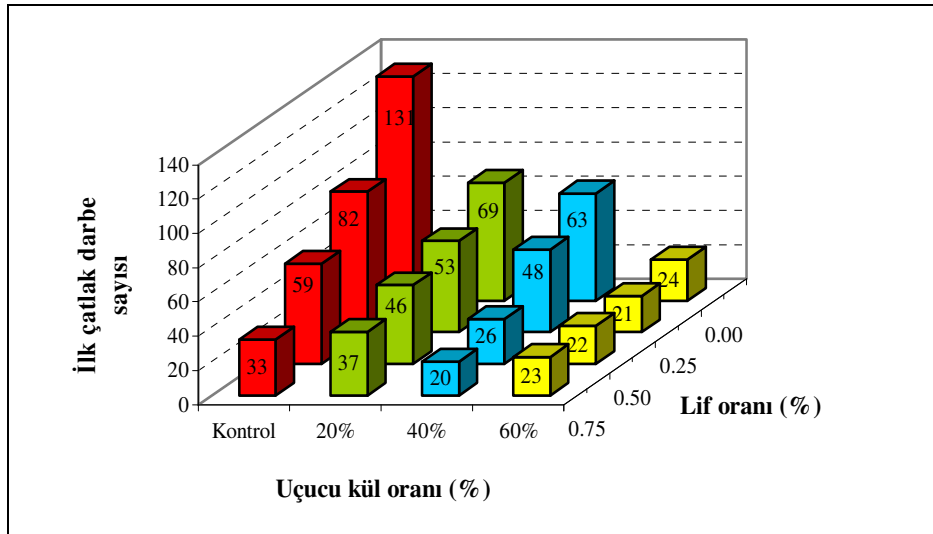
V : darbe deneyinde kullanılan 150 mm çapında 64 mm yüksekliğindeki örneğin hacmi (mm^3) olarak ifade edilmektedir.

Çizelge 6.10. 28 günlük numuneler üzerinde yapılan darbe deneyinde ilk çatlak oluşturan ve kırılma oluşturan darbe sayıları ile tokluk değerleri

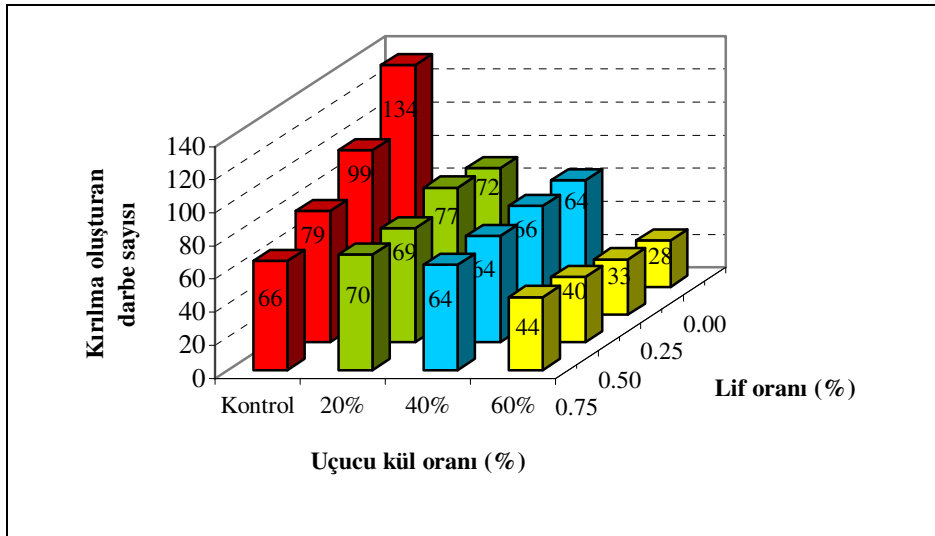
SSB karışım Adı	Darbe deneyi vuruş sayıları ve tokluk değerleri		
	İlk çatlak oluşturan darbe sayısı, N_i	Kırılma oluşturan darbe sayısı, N_k	Darbede kırılma tokluğu, $N.mm/mm^3$
Kontrol	131	134	0.024
0.25PL	82	99	0.018
0.50PL	59	79	0.014
0.75PL	33	66	0.012
20UK	69	72	0.013
20UK0.25PL	53	77	0.014
20UK0.50PL	46	69	0.013
20UK0.75PL	37	70	0.013
40UK	63	64	0.012
40UK0.25PL	48	66	0.012
40UK0.50PL	26	64	0.012
40UK0.75PL	20	64	0.012
60UK	24	28	0.005
60UK0.25PL	21	33	0.006
60UK0.50PL	22	40	0.007
60UK0.75PL	23	44	0.008

SSB karışımlarına ait deneysel çalışma sonucunda elde edilen 28 günlük darbe deneyinde, ilk çatlak oluşturan darbe sayıları uçucu kül ve lif miktarına bağlı olarak Şekil 6.46'da, kırılma oluşturan darbe sayıları ise uçucu kül ve lif miktarına bağlı olarak Şekil 6.47'de gösterilmiştir.

Karışımların 28 günlük ilk çatlak oluşturan ortalama darbe sayıları; kontrol örneklerinde 33 ile 131 arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü örneklerde 37 ile 69 arasında, %40 uçucu küllü örneklerde 20 ile 63 arasında ve %60 uçucu küllü örneklerde 21 ile 24 arasında değişmektedir.



Şekil 6.46. Uçucu kül ve polipropilen lif miktarına bağlı olarak ilk çatlak oluşturan darbe sayıları



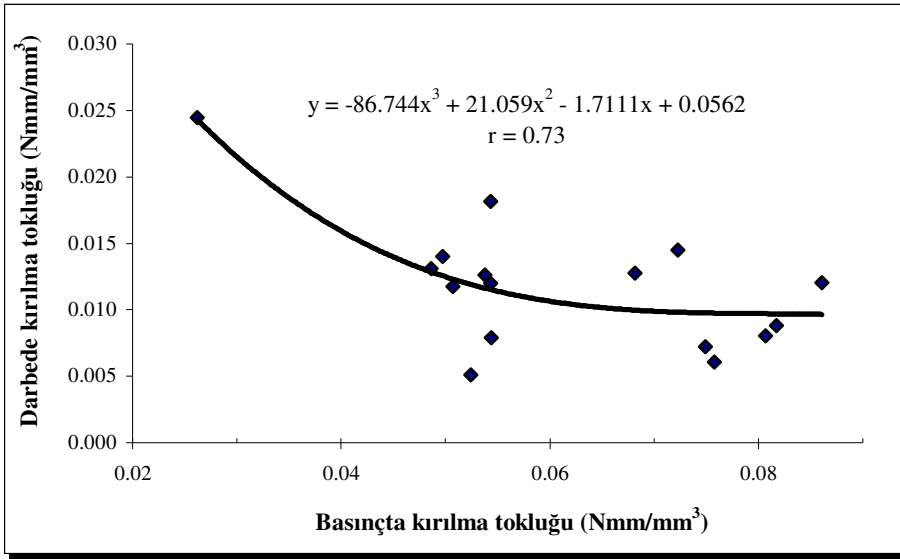
Şekil 6.47. Uçucu kül ve polipropilen lif miktarına bağlı olarak kırılma oluşturan darbe sayıları

Karışımların 28 günlük kırılmaya yol açan ortalama darbe sayıları; kontrol örneklerinde 66 ile 134 arasında değişmekte iken %20 uçucu küllü örneklerde 69 ile 77 arasında, %40 uçucu küllü örneklerde 64 ile 66 arasında ve %60 uçucu küllü örneklerde 28 ile 44 arasında değişmektedir.

Genel olarak, SSB karışımlarında uçucu kül ve lif miktarı arttıkça kırılma oluşturan darbe sayıları azalmaktadır. Ancak karışımlar kendi içlerinde kıyaslandığında, lif miktarı arttıkça ilk çatlak oluşturan darbe sayıları ile kırılma oluşturan darbe sayıları arasındaki fark artmaktadır. Lifler bu bölgede devreye girmektedir.

SSB karışımlarına ait deneysel çalışma sonucunda elde edilen 28 günlük darbeye kırılma tokluğu değerleri ile basınçta kırılma tokluğu

değerleri arasındaki ilişki Şekil 6.48’de gösterilmiştir. Burada; veriler arasında polinomal bir ilişki olduğu, elde edilen korelasyon katsayısının 0.73 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.48. Darbede kırılma tokluğu ile basınçta kırılma tokluğu ilişkisi

6.8. Dayanım özellikleri arasındaki ilişkiler

Betonun çekme dayanımları arasındaki ilişkiler ile çekme dayanımları ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler, TS500 (2000 baskısı)'de aşağıdaki ifadelerle öngörülmektedir. Dayanım değerleri MPa cinsinden,

f_{ctk} : betonun karakteristik çekme dayanımı,

f_{ck} : betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı,

f_{cts} : silindir yarma deneyi ile elde edilen çekme dayanımı,

f_{cte} : eğilme deneyinden elde edilen çekme dayanımı olmak üzere,

$$f_{ctk} = 0.35\sqrt{f_{ck}} \dots\dots\dots\text{Denklem 6.13}$$

$$f_{ctk} = \frac{f_{cts}}{1.5} \dots\dots\dots\text{Denklem 6.14}$$

$$f_{ctk} = \frac{f_{cte}}{2} \dots\dots\dots\text{Denklem 6.15}$$

ifadeleri ile verilmektedir.

Yukarıda verilen denklemlere göre, f_{cts} - f_{ck} , f_{cte} - f_{ck} , f_{cte} - f_{cts} arasındaki TS 500' ün öngördüğü ilişkiler aşağıdaki şekilde bulunur. Denklem 6.13 ve Denklem 6.14'ün eşitliğinden f_{cts} değeri f_{ck} 'ya bağlı ifade edilir, Denklem 6.13 ve Denklem 6.15' in eşitliğinden f_{cte} değeri f_{ck} 'ya bağlı ifade edilip, son olarak da Denklem 6.14 ve Denklem 6.15'in eşitliğinden f_{cte} değeri f_{cts} 'ye bağlı olarak yazıldığında aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$f_{cts} = 0.53\sqrt{f_{ck}} \dots\dots\dots\text{Denklem 6.16}$$

$$f_{cte} = 0.70\sqrt{f_{ck}} \dots\dots\dots\text{Denklem 6.17}$$

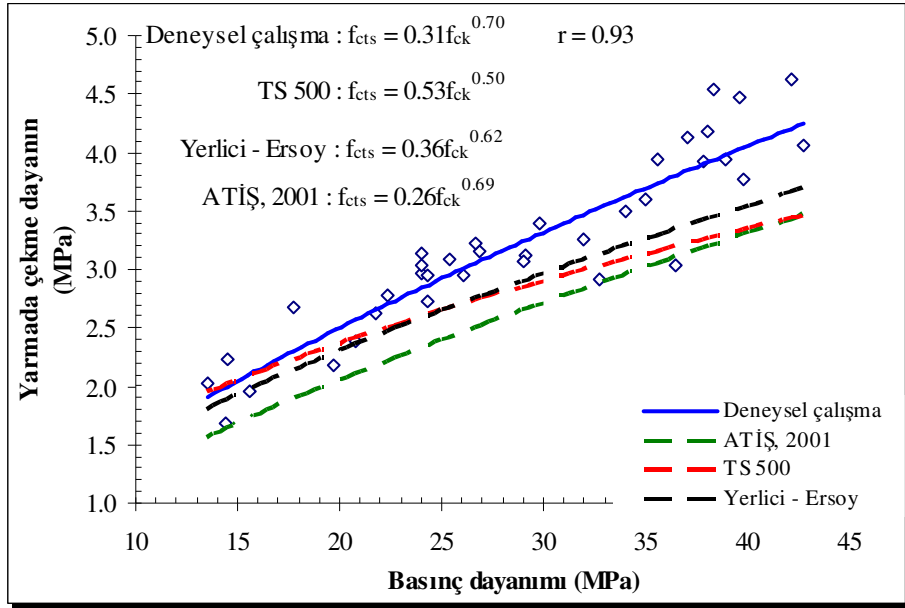
$$f_{cte} = 1.33f_{cts} \dots\dots\dots\text{Denklem 6.18}$$

TS500' ün öngördüğü ilişkilerde kullanılan basınç dayanımları silindir numunelerden elde edilen dayanımlardır. Dayanım özellikleri arasındaki ilişkiler incelenirken, uçucu külün yer değiştirme oranı, polipropilen lif miktarı veya beton yaşı ile ilgili bir ayırım yapılmamış olup, sadece uçucu küllü ve uçucu küllü lifli SSB'lere ait değerler göz önüne alınmıştır.

Atiş (2001), yaptığı çalışmada uçucu kül içeren SSB'lerin özelliklerini incelemiş, normal basınç dayanımı sınırları içerisinde (<40 MPa) deney sonuçları ile TS500'ün öngördüğü ilişkinin oldukça uyumlu olduğunu fakat, yüksek dayanım sınırlarında (>40 MPa) deney sonuçları ile TS500'ün öngördüğü ilişki arasında fark oluştuğunu belirtmiştir. Yazar, bu durumun ilk bakışta dayanımı incelenen betonların uçucu kül içermesinden kaynaklandığı kanaatine varılabileceğini ancak, uçucu kül içermeyen normal betonun dayanım ilişkileri için benzer bir durumla karşılaşan Yerlici ve Ersoy (1995)'un da, TS500'ün yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasında öngördüğü ilişkinin (Denklem 6.16) normal dayanımlı betonlar için gerçekçi değerler verdiğini, yüksek dayanımlı betonlar için ise gerçek durumu iyi yansıtamadığını bildirmiştir. Yerlici ve Ersoy (1995), hem normal dayanımlı betonlar için geçerli olan, hem de yüksek dayanımlı betonlar

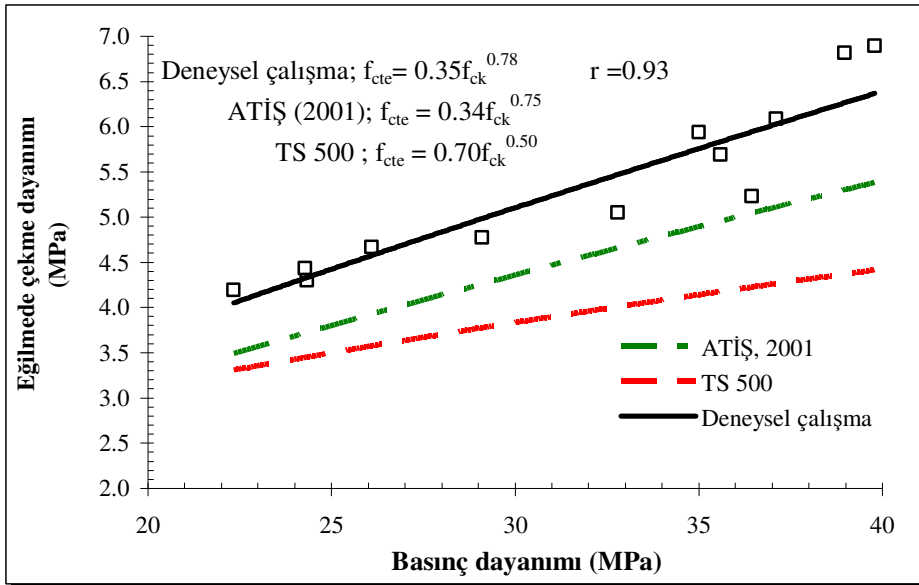
için gerçek durumu TS500'ün öngördüğü ilişkiden daha iyi yansıtacak yeni bir ilişki vermiştir (Atış, 2001).

Deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler kullanılarak uçucu kül içeren SSB'lerin silindir yarma dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 6.49'da gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar arasında istatistiksel olarak üstel bir ilişki tanımlanmış ve TS500, Atış (2001) ve Yerlici ve Ersoy (1995)'ün öngördüğü ilişkilerle uyumluluğu incelenmiştir. Burada, uçucu kül içeren SSB'nin silindir yarma dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin normal betonlar için geçerli olan ilişkiye benzediği sonucuna varılmıştır.



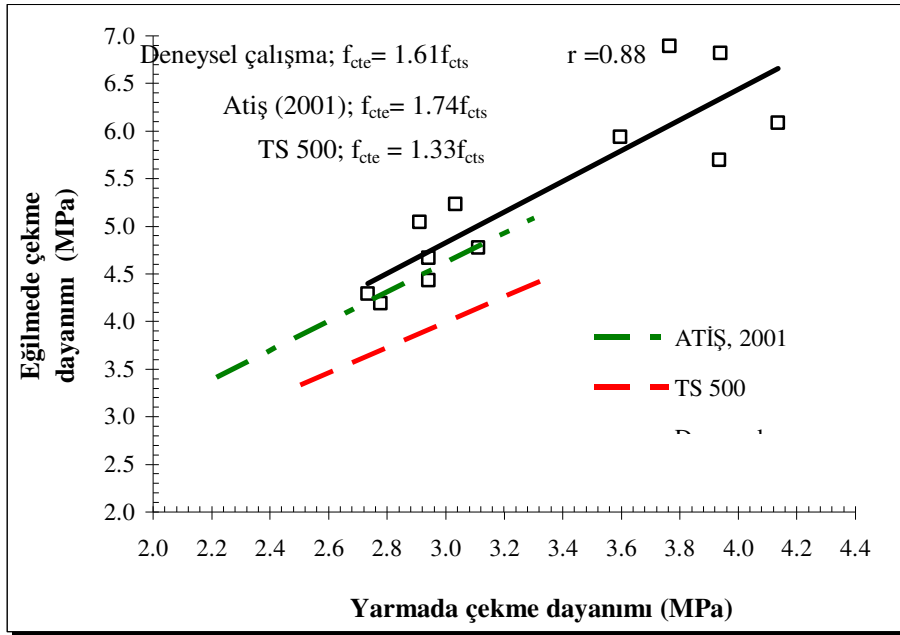
Şekil 6.49. 7, 28 ve 90 günlük silindir dayanımları ile basınç dayanımları ilişkisi

Benzer şekilde, üretilen SSB numunelerinin eğilmede çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenirken, TS500'ün öngördüğü (Denklem 6.17) ve Atiş (2001)'in elde ettiği ilişkiler ile uyumluluğu da araştırılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 6.50'de gösterilmiştir. Eğilmede çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasında istatistiksel olarak üstel bir ilişki elde edilmiş olup, TS500'ün öngördüğü ilişki ile Atiş (2001)'in elde ettiği ilişki de aynı grafik üzerinde kıyaslanmıştır. Şekil 6.50'den görüleceği gibi, uçucu kül içeren SSB'nin dayanımları arasındaki ilişkiler, TS 500'ün normal beton için öngördüğü ilişkiden daha yüksek değerler aldığı ancak Atiş (2001)'in SSB için elde ettiği üstel bağıntı ile daha uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.50. 28 günlük eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi

Uçucu kül içeren SSB numunelerinin eğilmede çekme dayanımları ile yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki incelenmiş ve TS500 ün öngördüğü (Denklem 6.18) ilişki ve Atiş (2001)'in elde ettiği ilişkilerle uyumluluğu da araştırılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanım değerleri grafik olarak Şekil 6.51'de gösterilmiş, aralarında istatistiksel olarak doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Şekil 6.51'den, uçucu kül içeren SSB'nin yarmada çekme dayanımı ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişkinin doğrusala yakın bir ilişki olduğu ve elde edilen ilişkinin normal beton için geçerli olan ilişkiye benzediği görülmektedir.



Şekil 6.51. 28 günlük eğilmede çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı ilişkisi

6.9. Maliyet Analizi Sonuçları

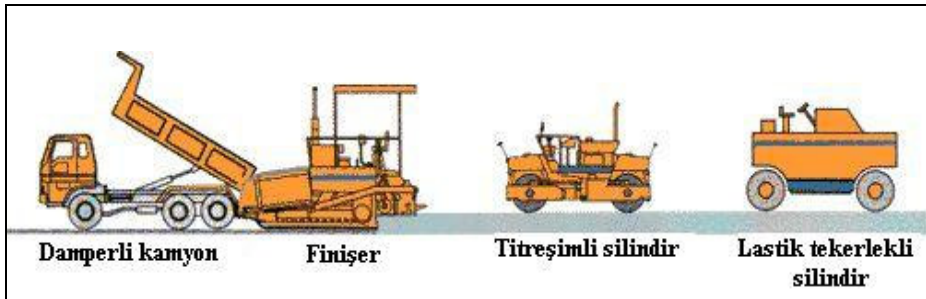
Deneysel çalışma kapsamında % 0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ve % 0, 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif içeren toplam 16 farklı kompozisyonda üretilen SSB karışımlarının 2007 Bayındırlık Birim Fiyatları kullanılarak hesaplanan yaklaşık maliyetleri ile deneysel çalışmada elde edilen SSB dayanımlarına karşılık gelen hazır beton maliyetleri Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. 2007 Bayındırlık birim fiyatları ile deneysel çalışmada üretilen SSB’lerin maliyeti ile SSB dayanımlarına karşılık gelen hazır betonların maliyetinin karşılaştırılması

Karışım adı	Deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük silindirik basınç dayanımı (MPa)	Deneysel çalışmada elde edilen basınç dayanımlarına karşılık gelen geleneksel beton sınıfları	SSB yaklaşık maliyeti (YTL)	2007 BBF ile hazır beton fiyatları (YTL)	Yüzde oranı	Yorum
KONTROL	37	C40	82.87	118.79	% 30	ucuz
0.25PL	36	C35	97.18	111.29	% 13	ucuz
0.50PL	34	C35	111.55	111.29	% 0	aynı
0.75PL	32	C30	125.24	106.91	% 17	pahalı
20UK	40	C40	76.64	118.79	% 35	ucuz
20UK0.25PL	39	C40	90.96	118.79	% 23	ucuz
20UK0.50PL	37	C40	105.28	118.79	% 11	ucuz
20UK0.75PL	35	C35	119.00	111.29	% 7	pahalı
40UK	36	C35	70.32	111.29	% 37	ucuz
40UK0.25PL	36	C35	84.64	111.29	% 24	ucuz
40UK0.50PL	33	C35	98.95	111.29	% 11	ucuz
40UK0.75PL	29	C30	112.66	106.91	% 5	pahalı
60UK	26	C25	64.02	98.79	% 35	ucuz
60UK0.25PL	24	C25	78.36	98.79	% 21	ucuz
60UK0.50PL	22	C20	92.71	91.91	% 1	pahalı
60UK0.75PL	24	C25	106.46	98.79	% 8	pahalı

Deneysel çalışmada, SSB karışımlarında kullanılan malzeme oranlarının arazide uygulandığı varsayılarak ve 2007 Bayındırlık Birim Fiyat rayiçleri baz alınarak hazırlanan en ucuz ve en pahalı SSB maliyet

analizleri Çizelge 6.12 ve Çizelge 6.13'te gösterilmiştir. Analizde Özel-1 pozu olarak adlandırılan uçucu külün fiyatı Rekabet Kurumu Başkanlığının 24.04.2007 tarih ve 07-34/348-128 karar sayılı yazısından 40 YTL/ton olarak elde edilmiştir. Özel-2 pozu olarak adlandırılan polipropilen lifin fiyatı ise internet araştırmasından 5 YTL/kg olarak elde edilmiştir. Bu kapsamda; SSB'nin yaklaşık maliyet analizi; SSB'de kullanılan malzeme, SSB'nin yapılması- yerine konulması ve SSB'nin sıkıştırılması-bakımı olmak üzere üç ana başlıkta toplanmıştır. Hazırlanan örnek maliyet hesabında etkiyen faktörler çeşitli olacak ve uygulanan yere göre değişkenlik gösterecektir. Yapılan örnek yaklaşık maliyet analizinde SSB karışımının hazırlandığı beton santrali ile şantiye mahalli arasındaki mesafenin yaklaşık 10 km olduğu varsayılmış, beton santralinde hazırlanan kuru kıvamdaki SSB'nin, Şekil 6.52'de gösterildiği gibi damperli kamyonlarla şantiye sahasına taşındığı, finişer ile serildiği, 10 tonluk titreşimli silindirle en az 4 geçiş, ardından ise 7-8 tonluk lastik tekerlekli silindirle en az 2 geçiş yapılarak sıkıştırıldığı varsayılmıştır.



Şekil 6.52. SSB yol kaplaması inşaatında kullanılan iş makineleri

Çizelge 6.12. 0.75 PL karışımına ait 2007 BBF ile oluşturulmuş SSB fiyat analizi

Analiz No	Analiz Adı	Ölçü Birimi			
0.75 PL	Silindirle Sıkıştırılmış Beton	M3			
Tanım: Projesinde öngörülen dayanımı sağlayacak şekilde elenmiş ve /veya kırılmış granülometrik agreg a ile çimento, su ve polipropilen lifin otomatik beton santralinde karıştırılması, hazırlanan karışımın damperli kamyonlara yüklenmesi ve döküm yerine taşınması, finişerle serilmesi, 10 tonluk çift tamburlu titreşimli silindirle en az 4 geçiş yapılması, ardından 7-8 tonluk lastik tekerlekli silindirlerle en az 2 geçiş yapılarak sıkıştırılması, sulanması, soğuktan, sıcaktan ve diğer dış tesirlerden korunması, her türlü işçilik, malzeme ve kayıpları, makine, araç ve gereç giderleri, işyerindeki her türlü yatay ve düşey taşımalar yükleme ve boşaltmalar ile yüklenici karı ve genel giderler dahil yerinde dökülmüş 1 m3 beton fiyatı					
Poz No	Cinsi	Birim	Miktar	Rayiç (YTL)	Tutar (YTL)
1- Malzeme					
04.008/2C	Portland çimentosu (Torbali) (TS EN 197-1 CEM I 42,5 R)	ton	0.300	122.00	36.60
04.031	Karma suyu	m ³	0.136	3.50	0.48
04.005/1B	32 mm'ye kadar kırmataş (08.023)	m ³	0.330	14.99	4.95
04.002/2C	Kum (Tuvenan agregadan el ile elenmiş ve yıkanmış ve en az iki 'tane sınıfı' karıştırılarak hazırlanmış-08.008/2-) (Makina ile temin)	m ³	0.438	5.99	2.62
ÖZEL-1	Uçucu ktl	ton	0.000	40.00	0.00
ÖZEL-2	Polipropilen Lif	kg	6.800	5.00	34.00
Malzeme Tutarı (YTL/M3)					78.65
2-Yapılması, yerine konulması					
03.5701	Beton yapma tesisinin 1 saatlik ücreti (1000 litre kapasiteli 50 m ³ /saat)	sa	0.02	25.06	0.50
03.538/2	Kamyonun 1 saatlik ücreti (120 HP gücünde, 7 ton kapasiteli)	sa	0.10	38.74	3.87
03.062/2A	Beton finişeri (takriben 70 HP-50m3/h kapasiteli) 1 saatlik ücreti	sa	0.02	76.57	1.53
01.501	Düz işçi (inşaat işçisi)	sa	2.00	2.75	5.50
01.015	Betoncu ustası	sa	0.50	4.00	2.00
İşçilik ve Makine Tutarı (YTL/M3)					13.41
3- Sıkıştırılması, Bakımı ve Sulanması					
03.542/A	1 Titreşimli silindir 1 saatlik ücreti (9-11 ton-11 ton dahil- statik ağırlık 18-22 ton dinamik kuvvette silindir+paletli traktör takriben 66-86 HP)	sa	0.10	36.76	3.68
03.545	Lastik tekerlekli silindir 1 saatlik ücreti (7-8 tonluk)	sa	0.10	22.42	2.24
01.501	Düz işçi (inşaat işçisi)	sa	0.30	2.75	0.83
04.031	Sulama suyu	m ³	0.40	3.50	1.40
İşçilik ve Makine Tutarı (YTL/M3)					8.14
Ara Toplam (YTL/M3)					100.20
%25 Mütteahhit Karı Genel Toplam(YTL/M3)					125.24

Çizelge 6.13. 40UK karışımına ait 2007 BBF ile oluşturulmuş SSB fiyat analizi

Analiz No 40 UK	Analiz Adı Silindirle Sıkıştırılmış Beton	Ölçü Birimi M3			
Tanım: Projesinde öngörülen dayanımı sağlayacak şekilde elenmiş ve /veya kırılmış granüloметриk agregre ile çimento, uçucu kül ve suyun otomatik beton santralinde karıştırılması, hazırlanan karışımın damperli kamyonlara yüklenmesi ve döküm yerine taşınması, finişlerle serilmesi, 10 tonluk çift tamburlu titreşimli silindirle en az 4 geçiş yapılması, ardından 7-8 tonluk lastik tekerlekli silindirlerle en az 2 geçiş yapılarak sıkıştırılması, sulanması, soğuktan, sıcaktan ve diğer dış tesirlerden korunması, her türlü işçilik, malzeme ve kayıpları, makine, araç ve gereç giderleri, işyerindeki her türlü yatay ve düşey taşımalar yükleme ve boşaltmalar ile yüklenici karı ve genel giderler dahil yerinde dökülmüş 1 m3 beton fiyatı					
Poz No	Cinsi	Birim	Miktar	Rayiç (YTL)	Tutar (YTL)
1- Malzeme					
04.008/2C	Portland çimentosu (Torbalı) (TS EN 197-1 CEM I 42,5 R)	ton	0.180	122.00	21.96
04.031	Karma suyu	m³	0.136	3.50	0.48
04.005/1B	32 mm'ye kadar kırmataş (08.023)	m³	0.326	14.99	4.89
04.002/2C	Kum (Tuvenan agregadan el ile elenmiş ve yıkanmış ve en az iki 'tane sınıfı' karıştırılarak hazırlanmış-08.008/2-) (Makina ile temin)	m³	0.432	5.99	2.59
ÖZEL-1	Uçucu kül	ton	0.120	40.00	4.80
ÖZEL-2	Polipropilen Lif	kg	0.000	5.00	0.00
Malzeme Tutarı (YTL/M3)					34.71
2-Yapılması, yerine konulması					
03.5701	Beton yapma tesisinin 1 saatlik ücreti (1000 litre kapasiteli 50 m³/saat)	sa	0.02	25.06	0.50
03.538/2	Kamyonun 1 saatlik ücreti (120 HP gücünde, 7 ton kapasiteli)	sa	0.10	38.74	3.87
03.062/2A	Beton finişeri (takriben 70 HP-50m³/h kapasiteli) 1 saatlik ücreti	sa	0.02	76.57	1.53
01.501	Düz işçi (inşaat işçisi)	sa	2.00	2.75	5.50
01.015	Betoncu ustası	sa	0.50	4.00	2.00
İşçilik ve Makine Tutarı (YTL/M3)					13.41
3- Sıkıştırılması, Bakımı ve Sulanması					
03.542/A	1 Titreşimli silindirin 1 saatlik ücreti (9-11 ton-11 ton dahil- statik ağırlık 18-22 ton dinamik kuvvette silindir+paletli traktör takriben 66-86 HP)	sa	0.10	36.76	3.68
03.545	Lastik tekerlekli silindirin 1 saatlik ücreti (7-8 tonluk)	sa	0.10	22.42	2.24
01.501	Düz işçi (inşaat işçisi)	sa	0.30	2.75	0.83
04.031	Sulama suyu	m³	0.40	3.50	1.40
İşçilik ve Makine Tutarı (YTL/M3)					8.14
Ara Toplam (YTL/M3)					56.26
%25 Müteahhit Karı Genel Toplam (YTL/M3)					70.32

Çizelge 6.11'den deneysel çalışma kapsamında üretilen uçucu küllü silindirle sıkıştırılmış betonların geleneksel betona kıyasla % 35 ile %37 oranında daha düşük maliyetle üretilebileceği, lifli karışımların lifsiz karışımlara kıyasla maliyeti arttırdığı, ancak yinede %0.25 ve %0.50 oranlarında lif kullanımı geleneksel betona kıyasla daha ucuz olduğu görülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında değişik oranlarda uçucu kül ve polipropilen lif kullanılarak hazırlanan silindire sıkıştırılmış betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki nihai sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Deneysel çalışmada üretilen SSB örneklerinin sıkışma yüzdesi değerleri %98-100 arasında değişmekte olup, PCA (2006)'da SSB yol kaplamaları için verilen sıkışma yüzdesi kriterlerini sağlamıştır.

2. SSB karışımlarına uçucu kül ve polipropilen lif eklenmesi karışımların su muhtevasını arttırmış, dolayısıyla birim ağırlık değerlerini düşürmüştür.

3. %0, 0.25, 0.50 ve 0.75 polipropilen lif içeren SSB karışımlarında çimento yerine;

a. %20 oranında uçucu kül kullanılması halinde karışımların 7 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla düşük değerler aldığı, ancak, 28 ve 90 gün sonunda kontrol karışımları ile hemen hemen aynı yada biraz daha yüksek değer aldığı,

b. %40 oranında uçucu kül kullanılması halinde karışımların 7 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla belirgin bir şekilde düşük olduğu, ancak, 28 ve 90 gün sonunda bu farkın azaldığı,

c. %60 oranında uçucu kül kullanılması halinde karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının belirgin bir şekilde diğer karışımlardan daha düşük değerler aldığı görülmüştür.

4. Çimento yerine %0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanılan karışımlara %0.25 oranında polipropilen lif eklendiğinde

karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla hemen hemen eşit yada biraz daha düşük değerler aldığı, ancak %0.50 ve %0.75 oranlarında polipropilen lif eklenmesi halinde karışımların basınç dayanımlarındaki düşüşlerin belirgin bir hal aldığı görülmüştür.

5. SSB karışımlarının 7 günlük basınç dayanımları; kontrol ve lifli kontrol örneklerinde 27.5 ile 30.6 MPa arasında, %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli örneklerde 24.0 ile 29.8 MPa arasında olup yol kaplaması olarak kullanıldığında kısa sürede tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

6. Geleneksel betondaki olduğu gibi silindirle sıkıştırılmış betonda da S/B oranının basınç dayanımında önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Genel itibarıyla uçucu kül ve lif miktarı arttıkça SSB karışımlarının S/B oranları arttığından basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür.

7. Kontrol karışımlarına kıyasla %40 ve 60 uçucu küllü SSB karışımlarının 90 günlük basınç dayanımları düşük kalmıştır. Uçucu külün puzolanik aktivite indeksinin düşük olması, kullanılan uçucu kül miktarının yüksek olması ve S/B oranının az da olsa uçucu küllü örneklerde yükselmesi bu dayanım düşüşüne gerekçe olarak gösterilebilir.

8. Deneysel çalışmada uçucu küllü ve lifli SSB numunelerine ait elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri, Nipatsat ve Tangtermsirikul (2000)'un elde ettiği formüller yardımıyla tahmin edilen SSB basınç dayanım değerleri ile benzerlik göstermiştir.

9. Silindir yarma deneyinde %0, 0.25, 0.50 ve 0.75 lif içeren SSB karışımlarında çimento yerine;

a. %20 oranında uçucu kül kullanılması halinde 7 günlük silindir yarma dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla biraz düşük olduğu, ancak, 28 ve 90 gün sonunda kontrol karışımları ile hemen hemen aynı yada biraz daha yüksek değer aldığı,

b. %40 oranında uçucu kül kullanılması halinde 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımlarının kontrol karışımlarına kıyasla daha düşük değerler aldığı,

c. %60 oranında uçucu kül kullanılması halinde 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımlarının kontrol karışımlarından belirgin bir şekilde düşük değerler aldığı görülmüştür.

10. Silindir yarma deneyinde çimento yerine %0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanılan karışımlarda %0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında polipropilen lif eklenmesi 7, 28 ve 90 sonunda kontrol karışımlarına kıyasla önemli bir artış yada düşüşe yol açmamıştır.

11. Optimum su muhtevasında maksimum kuru birim ağırlık esası ile hazırlanan SSB karışımlarında uçucu kül ve lif miktarının artması S/B oranını arttırmış, dolayısıyla karışımların S/B oranları sabit tutulamamıştır. S/B oranının artması dayanımlarda olumsuz etki yarattığından polipropilen lif miktarı artışının silindir yarma dayanımına pek etkisi olmamakla beraber bu çalışma kapsamında az da olsa olumsuz etkisi görülmüştür.

12. Deneysel çalışmada elde edilen 28 günlük silindir yarma dayanımı sonuçları, ACI Committee 325'in belirlediği standart limitleri (2.75 ile 4.14 MPa) sağlamıştır.

13. Silindir yarma ve eğilme deneylerinde polipropilen lifsiz örnekler gevrek bir davranış sergilemiş ve maksimum yüke ulaştığı anda numunede gözle görülebilir boyutta çatlayarak kırılma gerçekleşmiştir. Polipropilen lif içeren örnekler ise, sünek bir davranış sergilemiş ve maksimum yüke ulaştığı an oluşan çatlak kılcal boyutta kalmış ve örnek tamamen parçalanmamıştır. Polipropilen lifli SSB'lerde; liflerin 3 boyutlu süreksiz donatı oluşturacak şekilde rasgele dağılmış olarak matris içerisinde bulunmaları, liflerin matris fazında üzerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprücükler gibi davranmaları ve bunun sonucunda oluşan çekme gerilmelerini liflerin karşılaması ile açıklanabilir.

14. Eğilme dayanımları 28 gün sonunda kontrol karışımlarına kıyasla, %20 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda daha yüksek, %40 ve %60 uçucu küllü/uçucu küllü lifli karışımlarda ise daha düşük değerler almıştır.

15. Eğilme deneyinde uçucu kül oranı arttıkça maksimum yükte ölçülen sehim değerleri düşmüştür. Bunun nedeni S/B oranının artmasıyla dayanımın düşmesidir. Polipropilen lif miktarı arttıkça sehim değerinin azda olsa S/B oranının yükselmesine rağmen arttığı, daha sünek bir yapının geliştiği gözlenmiştir. Liflerin beklenen olumlu etkisi S/B oranının artışının genelde gölgesinde kalmıştır.

16. Deneysel çalışmada elde edilen eğilme dayanım değerleri, tahmin edilen eğilme dayanım değerleri ile benzerlik göstermiştir.

17. Deneysel çalışmada 28 gün sonunda elde edilen eğilme dayanım değerleri, yine deneysel çalışmada elde edilen basınç dayanımlarının %14'ü ile %20'si arasında kalmıştır.

18. Deneysel çalışmada elde edilen ultrases hız değerleri 4.5 km/sn'den büyük olduğu için üretilen SSB'lerin kalitesinin mükemmel olduğu, sıkışma değerleri ele alındığında üretilen SSB'lerin boşluksuz bir iç yapıya sahip olduğu, yol kaplaması olarak kullanıldığında durabilitesinin iyi olabileceği sonucuna varılmıştır.

19. Ultrases hız değerleri ile S/B oranı arasında ters orantılı bir ilişki, ultrases hız değerleri ile basınç dayanımı ve maksimum kuru birim ağırlık değerleri arasında ise doğru orantılı lineer bir ilişki elde edilmiştir.

20. Deneysel çalışmada elde edilen elastisite modülleri ile dinamik elastisite modülleri arasında kuvvetli bir ilişki elde edilmiştir.

21. SSB karışımlarında lif oranı arttıkça tokluk değerleri artmış, uçucu kül ve polipropilen lif miktarı arttıkça birim kısalma değerleri yükselmiştir.

22. Kontrol karışımlarına kıyasla %0.25 polipropilen lif içeriğine sahip SSB karışımlarının elastisite modülleri artış gösterirken, %0.50 ve 0.75 polipropilen lif içeren SSB karışımlarının elastisite modüllerinin daha düşük değerler aldığı görülmüştür.

23. Polipropilen lifli ve lifsiz SSB karışımlarındaki uçucu kül miktarının artışı kontrol karışımına kıyasla elastisite modüllerinin daha düşük değerler almasına sebep olmuştur.

24. Genel olarak, SSB karışımlarında uçucu kül ve lif miktarı arttıkça (dolayısıyla S/B oranının artması) kırılma oluşturan darbe sayılarında da azalmalar gözlenmiştir. Ancak karışımlar kendi içlerinde kıyaslandığında, lif miktarı arttıkça ilk çatlak oluşturan darbe sayıları ile kırılma oluşturan darbe sayıları arasındaki fark artmıştır. Lifler bu bölgede devreye girmiştir.

25. Polipropilen lifli ve lifsiz SSB karışımlarına ait deneysel çalışma sonucunda elde edilen 28 günlük darbede kırılma tokluğu değerleri ile basınçta kırılma tokluğu değerleri arasında anlamlı bir ilişki elde edilememiştir.

26. Deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler kullanılarak uçucu kül içeren polipropilen lifli ve lifsiz SSB'lerin silindir yarma dayanımları ile basınç dayanımları arasında üstel bir ilişki elde edilmiştir. Elde edilen bu üstel ilişkinin, TS500 ile Yerlici ve Ersoy (1995)' un normal betonlar için öngördüğü ilişki ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

27. Uçucu kül içeren polipropilen lifli ve lifsiz SSB numunelerinin eğilmede çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasında üstel bir ilişki elde edilmiş olup, elde edilen bu ilişkinin TS 500'ün normal beton için öngördüğü ilişkiden daha yüksek değerler aldığı ancak Atış (2001)'in SSB için elde ettiği üstel bağıntı ile daha uyumlu olduğu görülmüştür.

28. Uçucu kül içeren polipropilen lifli ve lifsiz SSB numunelerinin eğilmede çekme dayanımları ile silindir yarma dayanımları arasında doğrusal bir ilişki elde edilmiş olup, bu ilişkinin normal beton için geçerli olan ilişkiye benzediği sonucuna varılmıştır.

29. Deneysel çalışma kapsamında üretilen uçucu küllü SSB'lerin geleneksel betona kıyasla % 35 ile %37 oranında daha düşük maliyetle üretilebileceği, lifli karışımların lifsiz karışımlara kıyasla maliyeti arttırdığı, ancak yinede %0.25 ve %0.50 oranlarında lif kullanımı ile geleneksel betona kıyasla daha ucuz olduğu sonucuna varılmıştır.

30. Karıştırma işlemleri esnasında kuru kıvama sahip polipropilen lifli SSB'de liflerin karışım içerisinde homojen dağılması zor olmuş, topaklanmalar görülmüştür.

31. Üretilen polipropilen lifli ve lifsiz SSB numunelerin gözle yapılan muayenesinde, sıkıştırma işlemleri esnasında kullanılan bastırma plakasının (Bkz. Şekil 5.3) tabanı düz olduğundan, deneye tabi tutulacak numune 1 saat öncesinde kür havuzundan çıkarıldığında, katmanların birleşim yerlerinde ve silindir yarma deneyinde yarılan numunelerin iç kısmındaki katman birleşim yerlerinde çizgi şeklinde nem içerdiği görülmüştür. Bunun katmanlar arasında aderansın düşük olduğu dolayısıyla dayanımlarda düşüslere yol açtığı düşünülmektedir.

Yukarıdaki sonuçlara dayanarak, SSB'de polipropilen lif kullanımı S/B oranını artırmış ve dayanımlarda azalmalara sebep olmuştur. Kullanılan uçucu külün puzolanik aktivite indeksi düşük olmasına rağmen tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda, akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile sabit S/B oranında benzer karışımlar hazırlanarak polipropilen lifin SSB'nin dayanımlarına etkisi incelenebilir. Ayrıca, hızlandırılmış kür uygulamasıyla uçucu küllü SSB'lerin uzun periyotlardaki basınç dayanımlarını belirlemeye yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- ACI Committee 207**, 1988, Roller Compacted Mass Concrete, *ACI Materials Journal*, 85.
- ACI Committee 325.10**, 1995, State-of-the-Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements, *ACI Manual of Concrete Practice*.
- ACI Committee 544**, 1988, Measurement of Properties of Fibre Reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 85(6): 583-589.
- Ağar, E. ve Tasdemir, Y.**, 2007, Silindirle Sıkıştırılabilen Beton Yollar, *Türkiye hazır beton birliği*, <http://www.thbb.org/Article.aspx?ID=4>
- Akçalı, Ü.**, 2007, 2007 Yılı İnşaat Birim Fiyat Analizleri-I, Şafak Matbaacılık San.Tic.Ltd.Şti, Ankara, 550s.
- Andriolo, F.R.**, 1998, The Use of Roller Compacted Concrete, Brasil, 554p.
- Arslan, A. ve Aydın A.C.**, 1999, Lifli Betonların Genel Özellikleri, *Hazır Beton Dergisi*, (36): 67-75.
- Aruntaş, H.Y.**, 2006, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım potansiyeli, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 21(1): 193-203.
- ASTM C 311**, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 1170**, Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 1176**, 1998, Standard Practice For Making Roller Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table, Annual Book of ASTM Standards.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM C 597**, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 618**, 2002, 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 Standards.
- ASTM C 1435**, 1999, Standard Practice For Molding Roller Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D 698**, Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D 1557**, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort, Annual Book of ASTM Standards.
- Atış, C.D.**, 2001, Uçucu Kül İçeren Silindire Sıkıştırılabilen Betonların Özellikleri, *Türk J Engin Environ Sci*, 503-515.
- Atış, C.D., Sevim, U.K., Özcan, F., Bilim, C., Karahan, O., Tanrikulu, A.H. and Ekşi, A.**, 2004, Strength Properties of Roller Compacted Concrete Containing a Non-Standard High Calcium Fly ash, *Materials Letters*, 1446-1450.
- Atış, 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– 1121.
- Aulia, T.B.**, 2002, Effects of Polypropylene Fibers on The Properties of High Strength Concretes, *Lacer*, 43- 59.
- Baradan, B.**, 2004, Yapı Malzemesi II, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 221s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cannon, R.W.**, 1993, Air-entrained Roller Compact Concrete, *Concrete International*, 15(5), 49-54.
- Casias, T. J., Goldsmith, V. D., and Benavidez, A. A.**, 1988, Soil Laboratory Compaction Methods Applied to RCC, *Roller Compacted Concrete II*, 107-122.
- Choi, Y.K. and Groom, J.L.**, 2001, RCC Mix Design-Soils Approach, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13:71-76.
- Çakmakçoğlu, A.**, 2002, Silindirle Sıkıştırılmış Beton (RCC) Üretimi İçin Otomasyon, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, http://www.proksis.com.tr/index/basin_hzb_02.htm.
- Çivici, F. ve Eren, İ.**, 2004, Çelik Lifli Betonun Direkt Çekme Dayanımının Ölçülmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma, *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 434:49-53.
- Delatte, N., Amer, N. and Storey, C.**, 2003, Improved Management of RCC Pavement Technology, University Transportation Center for Alabama (UTCA) Report 01231, 46p.
- Department of Army (DOA)**, 1995, Engineering and Design Roller Compacted Concrete Pavement Design and Compaction, U.S. Army Corps of Engineering, Technical Letter, No: 1110-3-475.
- Erdoğan, T.Y.**, 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- Erdoğan, K., Tokyay, M. ve Türker, P.**, 2003, Traslar ve Traslı Çimentolar, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ar-Ge Enstitüsü, Ankara, Y99-2, 63s.
- Ersoy, H.Y.**, 2001, Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San.ve Tic.Ltd.Şti., İstanbul, 227s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gagne, R.**, 1999, Proportioning for Non-Air-Entrained RCCP, *Concrete International*, 21 (5), 37-41.
- Gao, P., Wu, S., Lin, P., 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*, 586-590.
- Gauthier, P. and Marchand, J.**, 2005, Design and Construction of Roller Compacted Concrete In Quebec, Canada, 111p.
- Ghafoori, N and Zhang, Z.**, 1995, Sulfate Resistance of Roller Compacted Concrete, *ACI Materials Journal*, 95 (4): 347-355.
- Gokoz U.N and Naaman, A.E.**, 1981, Effect of Strain Rate on The Pull Out Behaviour of Fibers in Mortar, *The International Journal of Cement Composites*, 3(3): 187-202.
- Halsted, G.E.**, 2005, Roller-Compacted Concrete Pavement: Design and Construction, Portland Cement Association.
- Hassani, A. and Saghafi, B.**, 2006, Roller Compacted Concrete for Heavy Duty Pavements, 6th International DUT Workshop on Fundamental Modeling of Design and Performance of Concrete Pavements, Belgium.
- Jofre, C., Fernandez, R., Josa, A., and Molina, F.**, 1998, Spanish Experience with RCC Pavements, *Roller compacted concrete II*, 467-483.
- Kajorncheappunngam, S. and Steawart D. F.**, 1992, Rice Husk Ash in Roller Compacted Concrete, *Concrete International*, 14(4): 38-44.
- Karayolları Genel Müdürlüğü**, 1991, Toprak ve Stabilizasyon laboratuvarı Ders Notları, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Keifer, O.**, 1988, Corps of Engineers Experience with RCC Pavements, *Roller Compacted Concrete II*.
- Koçak, E.S.**, 1998, A Suitable Roller Compacted Concrete For Kahramanmaraş-Suçatı Dam, MSc Thesis, Middle East Technical Universty, 130p.
- Kokubu, K., Cabrera, J.G. and Ueno, A.**, 1996, Compaction Properties of Roller Compacted Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 109-117.
- Li, Q., Zhang, F., Zhang, W., and Yang, L.**, 2002, Fracture and Tension Properties of Roller Compacted Concrete Cores in Uniaxial Tension, *Journal of Materials In Civil Engineering*.
- Liu, T. C.**, 1991, Performance of Roller Compacted Concrete - Corps of Engineers' Experience, ACI Special Publication SP-126, Durability of Concrete, Second International CANMET/ACI Conference, 11: 155-167.
- Ludwig, D., Nanni, A. and Shoenberger, J.E.**, 1994, Application of Roller Compacted Concrete Technology to Roadway Paving, US Army Corps of Engineers (USACE), Tecnical Report, CPAR-GL-94-1.
- Marchand, J., Gagne, R., Ouellet, E., and Lepage, S.**, 1997, Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete - A Review, *Advances in Concrete Technology*, V. M.
- Murphy, H.W.**, 1987, Highway Construction in Queensland, American Concrete Institute, Compilation 8: 30-36, reprinted from *Concrete International: Design and Construction* 9(2).
- Natajara, M.C., Nagaraj, T.S., and Basavaraja, S.B.**, 2005, Reproportioning of steel Fiber Reinforced Concrete Mixes and Their Impact Resistance, *Cement and Concrete Research*, (35): 2350-2359.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nipatsat, N. and Tangtermsirikul, S.,** 2000, Compressive Strength Prediction Model for Fly Ash Concrete, *ThammasaInt. J. Sc. Tech.*,5(1).
- Özkan, Ö.,** 2006, Çelikhane ve yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri, *İMO Teknik Dergi*, 257: 3893-3902.
- Pigeon, M. and Malhotra, V.M.,** 1995, Frost Resistance of Roller Compacted High-Volume Fly Ash Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(4): 208-211.
- Pigeon, M. and Marchand, J.,** 1996, Frost Resistance of Roller Compacted-Concrete, *Concrete International*, 18(7): 22-26.
- Piggott, R. W.,** 1986, Roller Compacted Concrete for Heavy Duty Pavements: Past performance, Recent projects, and Recommended Construction Methods, Roller Compacted Concrete Pavements and Concrete Construction, Transportation Research Record 1062, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Piggott, R. W.,** 1999, Roller Compacted Concrete Pavements, A Study of Long Term Performance, Portland Cement Concrete – “Research & Development” RP366.01P.
- Portland Cement Association (PCA),** 1987, Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements.
- Portland Cement Association (PCA),** 1994, Portland Cement Association, 10(1). Skokie, IL, 4 p.
- Portland Cement Association (PCA),** 2004, Roller Compacted Concrete Density: Principles and Practices.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Portland Cement Association (PCA)**, 2004, Frost Durability of Roller Compacted Concrete Pavements, Service d'Expertise en Matériaux Inc., Research and Development Bulletin RD135, Canada, 138p.
- Portland Cement Association (PCA)**, 2006, Production of Roller Compacted Concrete.
- Prusinski, J.**, 1997, Roller-Compacted Concrete Carries a Heavy Load, Roads & Bridges, 68-69.
- Robins, P.J. and Calderwood, R.W.**, 1978, Explosive Testing of Fiber Reinforced Concrete, *Concrete*, 26-28.
- Ragan, S.A.**, 1988, Proportioning RCC Pavement Mixtures, *Roller Compacted Concrete II*, 380-393.
- Rollings, R. S.**, 1988, Design of Roller Compacted Concrete Pavements, *Roller Compacted Concrete II*, 454-466.
- Santana, M.T.**, 1998, A Geotechnical Methodology for Roller Compacted Concrete Mixture Design, 8th International Symposium on Concrete Roads, Lisboa, Portugal.
- Schrader, E. and McKinnon, R.**, 1984, Construction of Willow Creek Dam, *Concrete International*, 6(5), 38-45.
- Sun, W., Liu, J., Qin, H., Zhang, Y., Jin, Z. and Qian, M.**, 1998, Fatigue Performance and Equations of Roller Compacted Concrete with Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, 28(2): 309-315.
- Tarun R.N., Yoon-Moon, C., Rudolph N.K., Shiw S.S., Lori-Lynn C. P., and Bruce W.R.**, 2001, Strength and Durability of Roller Compacted HVFA Concrete Pavements, Department of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science, The University of Wisconsin – Milwaukee, Report No. CBU-2001-08.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Taşdemir, M.A.**, 2002, Uçucu Kül Nedir, ACE 2002 Sempozyumu, *İTÜ İnşaat Fakültesi*.
- Taşdemir, M.A., ve Bayramov, F.**, 2002, Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ Dergisi*, 1(2): 125-144.
- Taşdemir, Y., Vinson, T.S. ve Ağar, E.**, 2002, Roller Compacted Concrete Pavements, Fifth International Congress On Advances in Civil Engineering, İstanbul Technical University, İstanbul, 1121-1129.
- Tokyay M., Erdoğan K.**, 2001, Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, TÇMB AR-GE Enstitüsü, Ankara.
- Toutanji, H; McNeil, S; Bayasi, Z.**, 1998, Chloride Permability and Impact Resistance of Polypropylene Fiber Reinforced Silica Fume Concrete, *Cement and Concrete Research*, 28(7):961-968.
- TS 639**, 1975, Uçucu Küller – Çimentoda Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3114 ISO 4012**, 1998, Beton Basınç Mukavemeti Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3502**, 1981, Betonda Statik Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5**, 2002, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6**, 2002, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TS EN 196-1**, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-2**, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-21**, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 21: Klorür, Karbondioksit ve Alkali Muhtevası Tayini, 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, Genel Çimentolar-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.
- 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.
- US Army Corps of Engineers (USACE)**, 2000, Roller-Compacted Concrete, Engineer Manual, EM 1110-2-2006.
- Walraven, J.**, 1999, The Evolution of Concrete, Structural Concrete, *Journal of fib*, 1(1): 3-11.
- Wang, N., Mindess, S., Ko, K.**, 1996, Fiber Reinforced Concrete Beams Under Impact Loading, *Cement and Concrete Research*, 26(3): 363-376.
- Yeğinoğlu, A., ve Ertün, T.**, 2004, Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ayyıldız Matbaacılık Ltd.Şti., Ankara, 53s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yetgin, Ş. ve Çavdar, A.,** 2005, Doğal Puzolan Katkı Oranının Çimentonun Dayanım, İşlenebilirlik, Katılaşma ve Hacim Genleşmesi Özelliklerine Etkisi, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.*, 17 (4): 687-692.
- Qasrawi, H.Y., Asi, İ.M., Al-Abdul Wahhab, H.I.,** 2005, Proportioning RCCP Mixes Under Hot Weather Conditions for a Specified Tensile Strength, *Cement and Concrete Research*, 267-276.

ÖZGEÇMİŞ

09.08.1979 yılında Hassa/HATAY'da dünyaya gelen A.Atacan ÜTE, T.C. vatandaşıdır. İlk, orta ve lise öğrenimlerini Adana'da tamamladı. 1997 yılından itibaren Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde sürdürdüğü lisans eğitimini 2002 yılında tamamladı.

Kasım 2002 - Mart 2003 tarihleri arasında Denizli'de özel bir şirkette saha mühendisi olarak görev yaptı. Nisan – Eylül 2003 tarihleri arasında 291nci kısa dönem olarak askerlik hizmetini tamamladı. Haziran 2004 - Mayıs 2008 tarihleri arasında Milli Savunma Bakanlığı İzmir İnşaat Emlak ve NATO Enfrastrüktür Bölge Başkanlığında kontrol mühendisi olarak görev yaptı. 2008 yılı Mayıs ayından bu yana özel bir şirkette çalışmaktadır. 2005 güz yarıyılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.