



T.C.
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İNCE MALZEME MİKTARININ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILAN YOL
BETONLARININ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

BEDRETTİN MENEMENCİOĞLU

MART 2014

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNCE MALZEME MİKTARININ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILAN YOL
BETONLARININ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

BEDRETTİN MENEMENCİOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

Mart 2014

Bedrettin MENEMENCİOĞLU tarafından Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU danışmanlığında hazırlanan “İnce Malzeme Miktarının Silindirle Sıkıştırılan Yol Betonlarının Özelliklerine Etkisi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Osman GÜNAYDIN, Adıyaman Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL, Niğde Üniversitesi

ONAY:

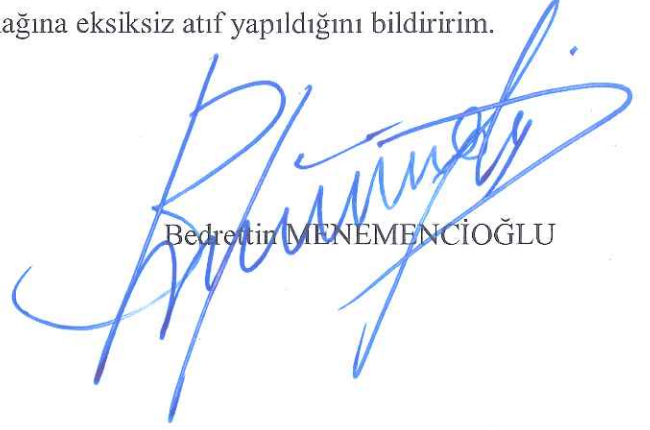
Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../20... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .../.../20... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bedrettin Menemencioğlu', is written over the printed name.

Bedrettin MENEMENCİOĞLU

ÖZET

İNCE MALZEME MİKTARININ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILAN YOL BETONLARININ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

MENEMENCİOĞLU, Bedrettin

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

Mart 2014, 132 sayfa

Bu çalışmada, ince malzeme miktarının silindirle sıkıştırılan yol betonlarının (SSB) özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında maksimum tane çapı 63 μ olan kalsit, ince agrega ile toplam agreganın ağırlıkça %0, %2, %4, %6, %10 ve %14'ü oranlarında ikame edilerek, 6 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımların optimum su muhtevaları modifiye proktor deneyi kullanılarak tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin yaş birim hacim ağırlıkları, basınç dayanımları, ultrases geçiş hızları, eğilmede ve yarmada çekme dayanımları, elastisite modülü ve aşınma dayanımı değerleri ölçülmüştür. İnce malzeme miktarı artıkça numunelerin yaş birim hacim ağırlıkları artmakta, ancak sınır bir değerden sonra azalmaktadır. SSB'nin dayanım gelişimi, normal betonlara kıyasla daha hızlı olmaktadır. İnce malzeme miktarı SSB'nin dayanım değerlerini ve elastisite modülünü olumsuz yönde etkilemiştir. Ancak %4 ikameli karışım en yüksek aşınma direncini göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Silindirle sıkıştırılan beton, rijit üst yapı, kalsit, betonun optimum su muhtevası, modifiye proktor testi, basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, aşınma dayanımı

SUMMARY

THE EFFECT OF FINE MATERIAL AMOUNT ON THE PROPERTIES OF ROLLER COMPACTED CONCRETE

MENEMENCİOĞLU, Bedrettin

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Kubilay AKCAOZOGLU

March 2014, 132 pages

In this study, the effect of fine material amount on the properties of roller compacted concrete (RCC) was investigated. The fine aggregate was replaced with calcite which maximum particle size was 63 μ , in amount of 0%, 2%, 4%, 6%, 10% and 14% by weight of total aggregate and six different mixtures were prepared in the study. The optimum water contents of the mixtures were determined by using modified proctor test. Fresh unit weight, compressive strength, ultrasonic wave velocity, flexural tensile strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and abrasion resistance of produced specimens were measured. The fresh unit weight of specimens increased depending on increasing fine aggregate amount, however decreased after a limit value. The strength development of RCC was faster than ordinary concretes. Fine material amount adversely affected the strength values and modulus of elasticity of RCC. However the mixture containing 4% fine material showed highest abrasion resistance.

Keywords: Roller compacted concrete, rigid pavement, calcite, optimum water contents of concrete, modified proctor test, compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, abrasion resistance.

ÖN SÖZ

Bu çalışma, sabırla ve büyük bir özveri ile değerli yardımlarını ve kıymetli vakitlerini benden esirgemeyen değerli danışmanım İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerinden Sayın Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'nun katkılarıyla gerçekleşmiştir.

Zengin yeraltı ve yerüstü kaynaklarına sahip olmasına rağmen, halen ekonomik güç ve dışa bağımlılık konusunda yeterli durumda olamayan ülkemizde, atılacak en önemli adımlardan biri de ulaşım ağlarına gereken önemi vermek ve ileri teknoloji imkânlarını kullanarak ulaştırmayı en iyi seviyeye çıkarmak olacaktır.

Ülkemizde ulaşım ağının en önemli parçası olan karayollarımız; son dönemlerde daha yoğun çalışmalar yürütülmesine rağmen, artan ağır taşıt trafiği ve nüfusa oranla, halen yeterli seviyede kalite ve konfora sahip düzeyde değildir. Ülkemizin karayolu ağının kısa sürede bozulmasının ve çevre kirlenmeleri ile kazalar açısından yaşanan olumsuzlukların başlıca sebepleri arasında; toplam yolcu ve yük taşımalarında karayolu taşımasının payının, diğer taşıma türlerine göre ve gelişmiş ülkelerdeki karayolu taşımacılığının oranlarına nispeten, çok yüksek olması yer almaktadır. Çalışmamda da atıfta bulunduğum bazı araştırmacılara göre bu oran diğer ülke karayollarına kıyasla sekiz katına ulaşmaktadır.

Karayolu maliyetinde; bakım ve onarım maliyetlerinin önemli bir miktar teşkil ettiği de dikkate alındığında, ekonomik güç ve dışa bağımlılık konusunda yeterli durumda olamayan ülkemizde, yapılacak karayollarında üst yapı standartları ve maliyetler açısından optimum şartlar sağlanması çok önem arz etmektedir. Bu anlamda esnek üst yapı yollar yerine rijit üst yapı yolların yapılmasıyla; karayollarımızın yapısal ve yüzey özellikleri bakımından daha uzun ömürlü olması, üst yapı bozulmalarının süresinin çok artması ve yapılacak harcamaların da ciddi anlamda azalacağı açıktır. Bundan dolayı ülkemizde rijit üst yapı yolların öncelikle yapım standartları, dizayn parametreleri ve kontrol aşamalarına önem verilmelidir.

Esnek üst yapıların malzeme olarak önemli bir kısmının dış kaynaklı olduğu, oysa rijit üst yapılarda ise kullanılan malzemelerin tamamının ülkemizin kendi öz kaynaklarından temin edildiği göz önüne alınırsa; ülkemiz karayolları ağında rijit üst yapı yolların yapılmasının gerekliliği görülmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde SSB kaplamalı yolların yapılması; diğer rijit üst yapı türlerine göre ülkemizde mevcut karayollarında kullanılan makine parkında değişkenlik gerektirmemekte olup, makine parkı için ekonomik olarak ilave yüksek maliyetlerin oluşmasına neden olmamaktadır.

Bu çalışmanın ülkemiz karayollarında SSB kaplamalı yolların veya rijit üst yapıların kullanımının yaygınlaşmasına, ağır ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda, eğimin fazla olduğu yollarda, zayıf zeminli bölgelerde veya şehir içi trafiğinin durup kalktığı kavşak ağzlarında SSB kaplamalı rijit üst yapıların kullanımının çok avantajlı mühendislik bir çözüm olduğu farkındalığının artırılması, SSB kaplamalı rijit üst yapıların yapım standartları ve dizayn parametrelerinin gelişmesi ve üniversitelerde bu konularda yapılacak çalışmalara katkıda bulunmasını dilerim.

Yüksek Lisans çalışmalarım sırasında, beni bilgi birikimleriyle yönlendiren ihtiyaç duyduğum konularda desteğini esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'na saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda çalışmalarım süresinde bilgi birikimleriyle destek olan İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e ve Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Doç. Dr. Osman GÜNAYDIN'a teşekkür ederim.

Ayrıca Yüksek Lisans Tez konumun belirlenmesinde bana yardımcı olan Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge D. Bşk. Sayın Ahmet Gürkan GÜNGÖR'e Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge D. Bşk. Malzeme Lab. Şb. Md.'den Beton Lab. Şefi Sayın Ali ÜNSAL'a, Karayolları 3. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge Başmüh. Sayın Hakan AKCEYLAN, Karayolları 3. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge Başmüh.'nden Beton Lab. Şefi Sayın Ahmet KORMAZ'a ve yayınlarıyla bana katkıda bulunan TCMB'e teşekkür ederim.

Aynı zamanda çalışmalarım kapsamında malzeme temini konusunda yardımlarını esirgemeyen Kolin İnşaat'a, Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası, NİĞTAŞ Mikronize Kalsit San. Tic. Ltd. Şti.'ne, Tema Beton'a teşekkür ederim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca benden her türlü desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
FOTOĞRAF DİZİNİ	xvii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II YOL ÜST YAPILARI	4
2.1 Yol Üst Yapılarının Sınıflandırılması	4
2.2 Yol Üst Yapı Tipi Seçim Esasları	5
2.2.1 Yol üst yapı tipi seçiminde teknik ölçütler	5
2.2.1.1 Dıştan gelen yüklerin taban zeminine iletilmesi	5
2.2.1.2 Trafik	7
2.2.1.3 İklim	7
2.2.1.4 Malzeme	8
2.2.2 Yol üst yapı tipi seçiminde ekonomik ölçütler	9
2.2.2.1 Toplam ekonomik maliyet	9
2.2.2.2 Ülkede mevcut yolların üstyapı durumu	14
2.2.2.3 Yol üst yapı inşasında mevcut makine parkının kullanılabilirliğinin maliyete etkisi	14
2.2.2.4 Enerji tüketimi	14
2.2.3 Rijit ve esnek yol üst yapılarının karşılaştırması.....	16
2.3 Rijit Yol Üst Yapılar	24
2.3.1 Rijit yol üst yapıların tarihçesi	24
2.3.2 Rijit yol üst yapıların türleri	28
2.3.2.1 Kalın plak kaplamalar	29
2.3.2.2 Lifli beton plak kaplamalar	29

2.3.2.3 Ön germeli beton kaplamalar	30
2.3.2.4 Silindirle sıkıştırılan beton kaplamalar	30
2.3.2.5 Kendiliğinden yerleşebilen beton plaklar	31
2.3.2.6 Sürekli betonarme yol kaplamaları	31
2.3.2.7 Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar	31
2.3.2.8 Derzli donatılı tipteki rijit üst yapılar	32
2.3.2.9 Sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar	33
2.3.2.10 Kompozit donatılı tipteki rijit üst yapılar	35
BÖLÜM III SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KAPLAMALAR	36
3.1 Silindirle Sıkıştırılan Betonların Tarihçesi ve Uygulamaları	39
3.2 Karışım Bileşim Oranlarını Saptama Yöntemleri	42
3.2.1 Optimal hamur hacmi metodu	44
3.2.2 Katı askı modeli	45
3.2.3 Zemin sıkıştırma metodu	45
3.2.4 Beton kıvam test metodu	47
3.3 Silindirle Sıkıştırılan Betonlarda Kullanılan Malzemeler	48
3.3.1 Çimento	49
3.3.2 Agrega	50
3.3.3 Karma Suyu	53
3.3.4 Katkı Maddeleri	54
3.3.4.1 Mineral katkılar	54
3.3.4.2 Kimyasal katkılar	55
3.3.5 Kalsit	56
3.4 Silindirle Sıkıştırılan Taze Betonların Özellikleri	57
3.4.1 İşlenebilirlik	57
3.4.2 Su / çimento oranı	59
3.4.3 Birim ağırlık	59
3.4.4 Hava içeriği	60
3.4.5 Segregasyon	60
3.5 Silindirle Sıkıştırılan Sertleşmiş Betonların Özellikleri	61
3.5.1 Basınç dayanımı	61

3.5.2 Eğilme dayanımı	67
3.5.3 Yarmada çekme dayanımı	69
3.5.4 Büzülme	70
3.5.5 Elastisite modülü	71
3.5.6 Durabilite	72
3.6 Silindire Sıkıştırılan Betonların Uygulama Aşamaları	74
3.6.1 Karıştırma ve taşıma	74
3.6.2 Serme ve sıkıştırma	76
3.6.3 Derzler	79
3.6.4 Kür işlemi	79
3.7 SSB Avantaj ve Dezavantajları	80
3.7.1 SSB'nin avantajları	80
3.7.2 SSB'nin dezavantajları	81
3.8 SSB'nin Maliyeti	82
BÖLÜM IV. MALZEME ÖZELLİKLERİ ve DENEYSEL ÇALIŞMA	83
4.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri	83
4.1.1 Çimento	83
4.1.2 Agrega	84
4.1.3 Kalsit	86
4.1.4 Karışım ve bakım suyu	87
4.2 Optimum Su Muhtevasının Bulunması	88
4.3 Beton Karışım Oranları	94
4.4 Deney Numunelerinin Hazırlanması	95
4.5 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar	99
4.5.1 Taze beton birim hacim ağırlığının belirlenmesi	99
4.5.2 Basınç dayanımının belirlenmesi	99
4.5.3 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi	100
4.5.4 Eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi	102
4.5.5 Yarmada çekme dayanımının belirlenmesi	103
4.5.6 Elastisite modülünün belirlenmesi	104
4.5.7 Aşınma dayanımının belirlenmesi	106

BÖLÜM V. DENEY SONUÇLARI BULGULAR ve TARTIŞMA	107
5.1 Taze Beton Birim Hacim Ağırlıkları	107
5.2 Basınç Dayanımı Değerleri	109
5.3 Ultrases Geçiş Hızları	111
5.4 Eğilmede Çekme Dayanımı Değerleri	112
5.5 Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri	114
5.6 Elastisite Modülü Değerleri	116
5.7 Aşınma Dayanım Değerleri	117
BÖLÜM VI SONUÇ ve ÖNERİLER	120
6.1 Sonuçlar	120
6.2 Öneriler	122
KAYNAKLAR	123
ÖZ GEÇMİŞ	132

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Teknik parametrelere göre üstyapı seçimi	9
Çizelge 2.2	Ekonomik parametrelere göre üst yapı seçimi	15
Çizelge 2.3	ABD' deki yol kaplamalarının servis ömrü (yıl) karşılaştırılması .	21
Çizelge 2.4	Rijit - esnek üst yapı kıyaslaması	24
Çizelge 3.1	Geleneksel beton ve SSB kaplamalar için hazırlanmış karışım örneği	44
Çizelge 3.2	SSB ve geleneksel beton kaplaması üretiminde kullanılan malzemelerin karşılaştırılması	48
Çizelge 3.3	1 m ³ SSB yol kaplaması için karışım dizayn örnekleri	48
Çizelge 3.4	Agrega gradasyon limitleri	51
Çizelge 3.5	Agrega ve bağlayıcıların granülometri sınırları	52
Çizelge 3.6	SSB ve geleneksel beton karışımlarının kıyaslanması	62
Çizelge 3.7	Şekil 3.9.'de gösterilen karışımların bağlayıcı dozajları	66
Çizelge 3.8	SSB'li betonlarda çekme direnç değışim (Mpa)	69
Çizelge 3.9	Büzölme miktarları kıyaslanması($\mu\text{m}/\text{m}$)	70
Çizelge 4.1	Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri	84
Çizelge 4.2	Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri	84
Çizelge 4.3	Şahit beton karışımında kullanılan agreganın eleklerden geçen miktarları	85
Çizelge 4.4	Karışımlara ait optimum su muhtevası maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri	94
Çizelge 4.5	1m ³ betonu oluşturan malzemelerin miktarları	95
Çizelge 5.1	Karışım betonlarına ait optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve maksimum yaş birim hacim ağırlık değerleri	108

Çizelge 5.2	Numunelerin 3, 7, 28, 90 ve 180 günlük ortalama basınç dayanım sonuçları	110
Çizelge 5.3	Numunelerin ultrases geçiş hızları	111
Çizelge 5.4	Numunelerin 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımları ve eğilmede çekme / basınç dayanım sonuçları	113
Çizelge 5.5	Numunelerin 3 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları ve yarmada çekme / basınç dayanım sonuçları	116
Çizelge 5.6	Numunelerin 28 günlük basınç dayanımları ve silindir numuneler üzerinde yapılan elastisite modülü deney sonuçları	116
Çizelge 5.7	Numunelerin 28 ve 90 günlük aşınma direnç oranları ve artış oranları	118

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Esnek ve rijit üst yapılarda taban zemininde oluşan gerilme	6
Şekil 2.2	Esnek ve rijit üst yapılarda yük dağılımı	6
Şekil 2.3	Rijit üst yapı toplam maliyet grafiği	10
Şekil 2.4	Yol üst yapılarının yapım maliyetlerinin karşılaştırılması	12
Şekil 2.5	Rijit üst yapı bakım maliyeti	13
Şekil 2.6	Asfalt ve beton yolda ağır vasıta tekerleği	20
Şekil 2.7	Asfalt ve beton yolda sürüş rahatlık indeksi	21
Şekil 2.8	Uygulamadaki kaplama tipleri	28
Şekil 2.9	Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar	32
Şekil 2.10	Derzli donatılı tipteki rijit üst yapılar	33
Şekil 2.11	Sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar	35
Şekil 3.1	SSB karışımları için tipik su muhtevası – kuru birim ağırlık eğrisi ..	46
Şekil 3.2	SSB için optimum harç parametreleri	47
Şekil 3.3	Çimento içeriği ile basınç dayanımı ilişkisi	62
Şekil 3.4	Basınç dayanımı ile su / bağlayıcı oranı ilişkisi	63
Şekil 3.5	İnce malzeme içeriğinin betonun basınç dayanımına etkisi	64
Şekil 3.6	Bağlayıcı tip ve miktarının SSB'nin basınç dayanımına etkisi	64
Şekil 3.7	RCC ve % 30 - % 50 arası yığılımlı puzolan hacminin eşdeğer çimento hacmi ile yerleştirilmesi	65
Şekil 3.8	RCC ile puzolansız ortalama değer yığılımı	66
Şekil 3.9	Uçucu kül içeriğinin SSB'nin basınç dayanımına etkisi	67
Şekil 3.10	SSB ve geleneksel beton karışımlarına ait eğilme dayanımları	68
Şekil 3.11	Uçucu kül içeriğinin SSB'nin eğilme dayanımı üzerinde etkisi	69
Şekil 3.12	Farklı tip çimento ve su / bağlayıcı malzeme oranlarındaki SSB karışımlarına ait elastisite modülleri	72
Şekil 3.13	Kaplama maliyetlerinin karşılaştırılması	82
Şekil 4.1	Şahit betona ait agreganın granülometri eğrisi	85
Şekil 4.2	Kullanılan tüm karışımlara ait agregaların granülometri eğrisi	86
Şekil 4.3	Çalışmada kullanılan kalsitin granülometri eğrisi	87

Şekil 4.4	Su muhtevası ile kuru birim ağırlık ilişkisi	91
Şekil 4.5	Şahit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi etkisi	91
Şekil 4.6	%2 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi	92
Şekil 4.7	%4 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi	92
Şekil 4.8	%6 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi	93
Şekil 4.9	%10 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi	93
Şekil 4.10	%14 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi	94
Şekil 4.11	15 cm ebatlı küp numunenin sıkıştırma aparatı	96
Şekil 4.12	Kiriş numune sıkıştırma aparatı	97
Şekil 4.13	Silindir numune sıkıştırma aparatı	98
Şekil 4.14	7.1'lik küp numune sıkıştırma aparatı etkisi	99
Şekil 4.15	Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi	101
Şekil 5.1	Numunelerin 3, 7, 28, 90 ve 180 günlük ortalama basınç dayanım sonuçları	110
Şekil 5.2	Numunelerin 7 ve 28 günlük numunelerin eğilme dayanım sonuçları	114
Şekil 5.3	Numunelerin 28 günlük numunelerin basınç dayanımları – elastisite modülleri arasındaki ilişki	117
Şekil 5.4	Numunelerin 3, 7, 28, 90 ve 180 günlük numunelerin eğilme dayanım sonuçları	119

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1	1920 ile 1930'lu yıllarda rijit üst yapı uygulamaları	25
Fotoğraf 2.2	Berlin yakınlarında 1930'lu yıllarda inşa edilen rijit üst yapı otoyol	26
Fotoğraf 2.3	Dreve-de-Lorraine Karayolu, Brussels; 1925 yılında boyuna derz olmadan inşa edilmiş olan derzli rijit üst yapı	26
Fotoğraf 3.1	Willow Creek Barajı	40
Fotoğraf 3.2	Çine Adnan Menderes Barajı	42
Fotoğraf 3.3	SSB'nin taşınması ve yerleştirilmesi	75
Fotoğraf 3.4	Rolkrit uygulaması	76
Fotoğraf 3.5	Rolkritin finişerle zemine serilmesi	78
Fotoğraf 4.1	Otomatik modifiye proktor deney aleti	89
Fotoğraf 4.2	SSB'ların modifiye proktor deneyi yapılarak maksimum kuru birim ağırlığının belirlenmesi	90
Fotoğraf 4.3	15 cm ebatlı küp numunenin sıkıştırma işlemi	96
Fotoğraf 4.4	Kiriş numunenin sıkıştırma işlemi	97
Fotoğraf 4.5	Silindir numunenin sıkıştırma işlemi	98
Fotoğraf 4.6	Numunelerin basınç dayanımı test aleti	100
Fotoğraf 4.7	Numunelerin ultrases geçiş hızının belirlenmesi	101
Fotoğraf 4.8	Eğilmede çekme dayanımı deney düzeneği	102
Fotoğraf 4.9	Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği	103
Fotoğraf 4.10	Elastisite modülü ölçümü deney düzeneği	104
Fotoğraf 4.11	Böhme aşınma deneyi yapılması	106

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
NaCl	: Sodyum klorür
NaCl	: Sodyum klorür
MPa	: Megapaskal
F tipi uçucu kül	: Yalnızca puzolanik özelliğe sahip($SiO_2+Al_2O_3+FeO_3 \geq \%70$ Bitümlü veya parlak kömürden elde edilen uçucu küller)
NPÇ 32.5	: Normal Portland Çimentosu 32,5 Mpa
W	: Su muhtevası
Tip I	: Normal tip normal portland çimentosu
Tip II	: %40 oranına kadar puzolan içeren portland çimentosu
Tip III	: Erken dayanım kazandıran modifiye portland çimentosu

Kısaltmalar	Açıklama
THBB	: Türkiye Hazır Beton Birliği
A.B.D.	: Amerika Birleşik Devletleri
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolları ve Taşımacılık İdareleri Birliği
BSK	: Bitümlü Asfalt Kaplama
M.Ö.	: Milattan Önce
Y.Y.	: Yüzyıl
SSB / RCC	: Silindirle Sıkıştırılabilen Beton
Rolkrit	: Roller Compacted Concrete
ACI	: Amerika Beton Enstitüsü
Betonpact	: Kuru Yoğun Beton
ASTM	: Amerikan Malzeme Test Birliği Kurumu

BÖLÜM I

GİRİŞ

Bir ülkedeki ulaşım ağı, o ülkenin can damarları sayılır ve ülke ekonomisinin gelişmesinde en başta gelen parametrelerden biridir (Ecevit, 2007).

Başka bir deyişle ülkelerin ulaşım ağının yeterli düzeyde ve standartta olması gelişmişliğin bir göstergesi olarak görülmektedir. Ülkemizde ağır taşıt trafiği her geçen gün artmakta ve bu durum yol üst yapılarında önemli problemlerin oluşabilmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla performans kriterlerinin daha da önemsenmesi veya yükseltilmesi önem kazanmakta olup, yeni metodların kullanılarak kalitenin artırılması hedeflenmelidir.

Zengin yeraltı ve yerüstü kaynaklarına sahip olmasına rağmen ekonomik olarak güçsüz ve dışa bağımlı olan ülkemizde, atılacak en önemli adımlardan biri de ulaşım ağına gereken önemi vermek olacaktır. Ulaşım ağının bir parçası olan karayolları, artan ağır taşıt trafiği ve nüfusuna oranla yetersiz düzeydedir. Ekonominin zayıf olması ve kaynak sıkıntısından dolayı yapılacak yollarda, üstyapı standartları ve maliyetler açısından optimum şartlar sağlanmalıdır (Edis, 2007).

Karayolu üst yapısı, yol inşaatı maliyetlerini azımsanmayacak oranda etkileyen yol yapı elemanıdır. İyi bir üst yapı, yol kullanıcılarının en temel talebi olan güvenli ve konforlu sürüşü sağlamalıdır. Yol üst yapı teknolojisinin sürekli değişime açık bir yapıda olması nedeniyle, gelişmelerin yakından takip edilerek Ülkemiz şartlarını da göz önünde bulundurarak şartnamelerin hazırlanması ve uygulamaya geçirilmesi önem arz etmektedir (Güngör, 2008).

Ekonomik açıdan bakılacak olursa karayolu ulaştırıcılığı ile ilgili en önemli giderlerden biri, yolların onarım ve yenilenmesini de kapsayan bakım harcamalarıdır. Bir ülke de yapılacak yollar hem yapısal olarak ve hem de yüzey özellikleri bakımından ne kadar uzun ömürlü olurlarsa, yapılacak harcamaların da o kadar azalacağı açıktır. Uzun ömürlü yolların yapımı için de öncelikle dizayn ve kontrol aşamalarına önem verilmelidir (Karpuz, 2008).

Ülkemizdeki karayolu trafiğinde ilginç bir özellik olarak ağır taşıt oranı, toplam trafik içinde %50 ile %70 arasında pay almaktadır. Bu oran gelişmiş ülkelerde %10 - %20 kadardır. 1985 yılında yürürlüğe giren 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu'nun yönetmeliği ile yasal tekil dingil yükü 10 tondan 13 tona, çift (tandem) dingil yükü ise 16 tondan 19 tona çıkarılmıştır. Ülkemizde yeterli düzeyde ağırlık kontrolü yapılmadığı ve genellikle de aşırı yüklemelere gidildiği için toplam trafik içinde yer alma payı oldukça fazla olan ağır taşıtların, yola verdikleri yıpranma zararı da o oranda artmaktadır. Bir yandan ağır taşıt oranının yüksekliği, diğer yandan da her bir taşıtın zarar faktörünün oldukça yüksek olması nedeniyle ülkemiz karayollarının, oransal olarak diğer ülke karayollarına kıyasla sekiz kere daha fazla yüklendiği, ekonomik ömürlerinin azaldığı, bakım ve onarım çalışmalarının daha sık yapılması ile bu yolların hizmet verebilir düzeyde tutulabilmelerine çalışılacağı, bunun için de periyodik üstyapı yenilemeleri yapılması planlanmıştır (Ecevit, 2007).

Yol yapımında kullanılacak malzemelerden beklenen en önemli özelliklerden birisi, proje şartlarının ekonomik olarak yerine getirilmesine katkı sağlamaktır. Bunun yanında uzun kullanım ömrü, düşük bakım onarım harcamaları, yapım ve onarım süresinin kısa olması, çevre uyumu, atık maddelerin kullanılabilmesi ve kalite kontrol işlerine uygun olma gibi özelliklerde göz önünde bulundurulmalıdır. (Arslan, 2007)

Son yıllarda ortaya çıkan yeni ihtiyaçlar nedeni ile kullanımda çeşitli özellikleri geliştirilmiş veya yeni üretim ve uygulama tekniklerine sahip, bu özellikleri ile fonksiyonel kullanım imkânı sağlayarak çeşitli problemleri sahip olduğu özelliklerle ortadan kaldıran betonların kullanımı ve kullanım alanlarının farklılığı giderek yaygınlaşmaktadır.

Dolayısı ile ülkemiz kendi kaynakları göz önünde bulundurularak, ekonomik, üstün kalite, güvenlik ve konfor kriterlerini taşıyacak bir yol üst yapısının dizaynı hedeflendiğinde; silindirle sıkıştırılan beton kullanılması gerekliliği gündeme gelmektedir. Silindirle sıkıştırılan beton 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.

Geleneksel beton kaplamalara göre daha düşük su / imento oranına sahip olan SSB kaplamalar, bitümlü kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınabilmekte, serilebilmekte ve sıkıştırılabilmektedir. 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 (Çetin, 2009).

BÖLÜM II

YOL ÜST YAPILARI

Bu bölümde yol üst yapı tipleri, üst yapı tipi seçim kriterleri, esnek ve rijit üst yapıların özellikleri ve karşılaştırılması hakkında genel bilgiler verilmektedir. Bölümün ilerleyen kısımlarında silinirle sıkıştırılan beton yol kaplamaları hakkında tanıtıcı bilgiler ve üst yapılarda silindirle sıkıştırılan betonların kullanımına ilişkin çalışmalar hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

2.1 Yol Üst Yapılarının Sınıflandırılması

Karayolları üstleneceği trafiğin yoğunluğu, araç tipi dağılımı, sürüş güvenliği vb. unsurlarla, iklim koşullarına ve bölgenin gereksinimlerine uygunluğu yanı sıra ekonomiklik göz önüne alınarak projelendirilip inşa edilmektedir (Pancar, 2008).

Yol üst yapıları (kaplamaları); trafik yüklerini zemine ileten, çevre ve trafik etkilerine karşı koyan mühendislik yapılarıdır. Trafik yüklerini zemine iletme kabiliyetleri her bir tabakanın yük dağıtma özelliğine bağlıdır. Bu nedenle üst yapı kalınlığı zemin taşıma gücüne ve üst yapının tipine bağlı olarak değişir (Tunç, 2007).

Karayollarında değişik tipte üst yapılar kullanılmaktadır. Ara tipler ihmal edilerek, birbirinden tamamen farklı yapıda olan yol üst yapıları, oluşturuldukları malzemeye bağlı olarak (Ecevit, 2007);

- Esnek Üst Yapılar,
- Rijit Üst Yapılar olarak iki ana gruba ayırmaktadırlar.

Diğer bir sınıflandırmaya göre ise yol ve hava alanı kaplamaları (Tunç, 2004);

- Rijit (Beton),
- Esnek,
- Kompozit olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilmektedir.

Rijit kaplamalar (Beton yol, beton kaplama); ağır ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda granüler bir alt temel tabakası üzerine yapılan beton plakalardan ibarettir.

Esnek kaplamalar(Beton asfalt, asfalt yol, asfalt kaplama); çok tabakalı bir yapı olup, alt tabakalar dren kabiliyeti yüksek granüler malzemelerle ve üst tabakalar ise yüksek stabilite ve sürüş konforunu sağlamak amacıyla asfalt karışımlarla yapılmaktadır.

Kompozit kaplamalar; beton kaplamaların üzerine sıcak asfalt karışım takviye tabakası yapılarak veya bazen de esnek kaplamaların üzerine beton kaplama yapılarak elde edilir

2.2 Yol Üst Yapı Tipi Seçim Esasları

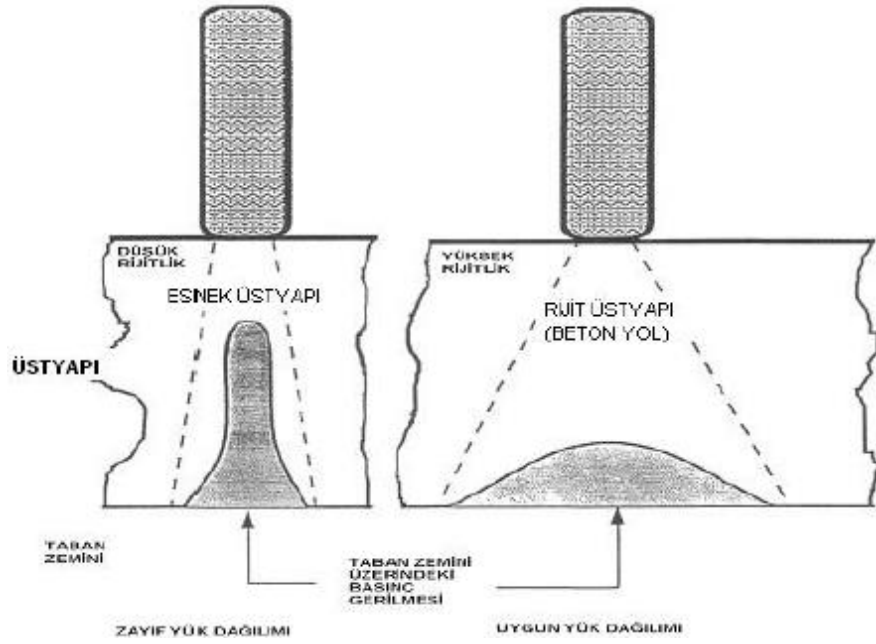
Gerek yeni karayolu yapımında, gerekse üst yapı yenileme çalışmalarında üst yapı seçimi büyük önem taşımaktadır. Zira karayollarında üst yapı tipi seçimi, değişik ve çok sayıdaki ölçütlere dayandırılması gereken kapsamlı bir konu özelliği taşımaktadır. Seçim yapılırken, üst yapı tipleri teknik ve ekonomik bakımdan karşılaştırılmalı ve ülke koşulları da dikkate alınarak, karara varılmalıdır (Ecevit, 2007).

2.2.1 Yol üst yapı tipi seçiminde teknik ölçütler

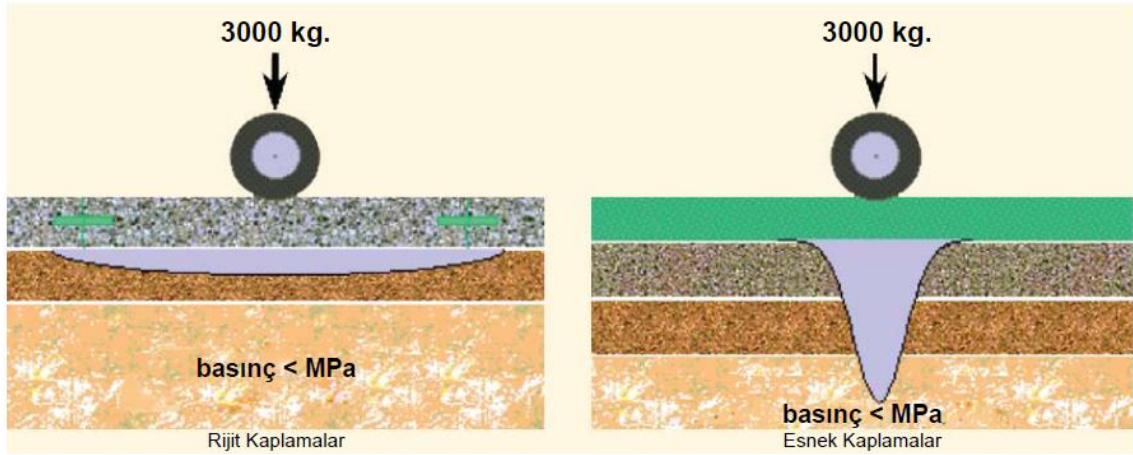
Üst yapı seçiminde bakılacak teknik parametrelerden bazıları şöyledir;

2.2.1.1 Dıştan gelen yüklerin taban zeminine iletilmesi

Üst yapı, belirli trafik yüklerini taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak bir düzeye indirerek tabana iletirken, kendi içyapısında da tahribat olmamalıdır. Esnek ve rijit olmak üzere iki gruba ayrılan yol üst yapıları, trafik yükünü taban zeminine iletme ve tahrip olma şekilleri yönünden Şekil 2.1. ve Şekil 2.2. görüldüğü gibi farklılıklar göstermektedir (Çetin, 2009).



Şekil 2.1. Esnek ve rijit üst yapılarda taban zemininde oluşan gerilme (Çetin, 2009).



Şekil 2.2. Esnek ve rijit üst yapılarda yük dağılımı (Yeğinobalı, 2009).

Yolların tahrip olma mekanizması çok karışık olmakla beraber, bunu başlıca iki ana nedene bağlamak mümkündür. Birincisi, taban zemininde veya yol üst yapısını oluşturan tabakaların birinde meydana gelen gerilmelerin, malzemenin sınır gerilme değerlerini aşması ve iç dengenin bozulması ile ortaya çıkan kaymalardır. İkincisi ise taban zemininde veya yol üst yapısı tabakalarının birindeki yüksek basınç gerilmeleri ve rutubet oranındaki önemli değişimler altında oldukça büyük oturmaların ortaya çıkması ve üst tabakaların oturmalara uymaması sonucunda oluşan çatlaklar ve kopmalar olarak açıklanmaktadır. Esnek üst yapı iyi projelendirilmezse, yukarıda açıklanan iki nedenden biri yolun tahrip olmasına sebep olur. Rijit beton plak, taban zeminini ile sürekli temas

halinde olduğu müddetçe taşıyıcı bir eleman olarak vazife görür. Taban zemini çeşitli nedenlerle yer yer çökerse, taban zemininin deformasyonuna uyamayan rijit beton plak, bu kısımlarda kiriş gibi çalışmaya başlar, ancak betonun düşük olan çekme direncinin aşılması sonunda kaplama kırılır. Buradan görüleceği gibi, esnek üst yapılar her iki nedene bağlı olarak bozuldukları halde, rijit üst yapıların bozulması yalnızca ikinci nedene dayanmaktadır (Giriş, 2007).

2.2.1.2 Trafik

Üst yapı tipi seçiminde en önemli etkenlerden biri de trafik parametreleridir. Trafik hacmi ve yıllık trafik artış oranı yüksek, ayrıca trafik içindeki ağır taşıt miktarı yüksek olan yollar için rijit üst yapı daha uygun olmaktadır. Düşük trafik artışları halinde ise, kademeli inşaata elverişli esnek üst yapı ile gelişen trafiğe cevap vermek mümkün olabilmektedir (Ecevit, 2007).

Eğimi fazla, trafiği az olmayan yollarda rijit üst yapılar daha uygundur. Yol üzerindeki seyir hızının 80 km/saat'ten 50 km/saat'e düşmesi zemin deformasyonlarının %17 artmasına neden olmaktadır. Ağar vd. (1998), özellikle yokuş yukarı eğimli şeritlerde tekerlek oluşu oluşumunun hızlanıyor olmasını, bu şeritlerde seyreden trafiğin hızını nispeten düşük olmasına bağlamaktadır. Bu durumda, genel olarak trafiğin sıkışmasını önleyici ve dolayısıyla trafik hızını arttırıcı önlemlerin, zaman ve enerji tasarrufu yanında yol yıpranmasını azaltıcı bir etkisinin de olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca şehir içi trafiğinin durup kalktığı kavşak ağzlarında bitümlü karışım kaplamalarda dalgalanma - yığılmalar ya da çatlama ve oyuklar oluştuğu ancak bu kısımlara beton kaplama yapılması durumunda gayet güzel sonuçların alındığı bildirilmektedir (Karpuz, 2008).

2.2.1.3 İklim

İklimsel koşullar üst yapıda kayda değer gerilmelere, defleksiyonlara ve deformasyonlara neden olan nem ve sıcaklık değişimlerini kapsar. Örneğin sıcaklık ve nem değişimleri; kayda değer oranda plak çatlama ile sonuçlanan, plakta kırılmalara ve eğilme gerilmelerine neden olabilirler. Özellikle karasal iklime sahip bölgelerde yağış oranının ve gece gündüz sıcaklık farkının fazla olması, donma -

çözülme olayını arttırmaktadır. Ayrıca buzlanmayı önleyici tuzların da kullanılması, tuzların kar suları ile eriyik hale geçip(NaCl ve CaCl) kaplama bünyesine sızmasına, yol üst yapılarında oluşabilecek deformasyonların artmasına neden olmaktadır. Yaz aylarında da gündüz kaplama yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır.

Mevsimler arasında büyük farklar olan kara iklimi hüküm süren bölgelerde, asfalt betonunun viskoelastik davranışlı bir malzeme olması sebebiyle, yazın tekerlek izi oluşmasına direnç gösteren, kışın ise çatlamayan bir bitümlü karışımın formüle edilmesi oldukça güçtür. Bu tip bölgelerde rijit üst yapıların kullanılması daha uygundur, ancak dikkat edilmesi gereken husus, beton plaklar arasındaki derzlerin kışın çok açılması sebebiyle beton plağın altının yer yer boş kalması olarak tanımlanan “pompaj olayını” kolaylaşmasıdır. Derz boşluklarını uygun malzeme ile doldurmak, kayma demiri kullanmak ve beton plak ile taban zemini arasına granüler malzemedan “kaplama altı tabakası” yapmak suretiyle pompaj olayı sakıncası giderilebilmektedir. Bitümlü kaplamalarda taban zeminindeki nem oranının en çok %2 olması istenir. Bu zorunluluk bitümlü kaplamaların uygulama süresinin kısılmasına neden olur. Rijit üst yapılar ise nemli zeminler üzerinde de yapılabilmektedir (Çetin, 2009).

2.2.1.4 Malzeme

Esnek üst yapılarda bağlayıcı malzeme olarak kullanılan bitüm, termoplastik bir malzeme olup; sıcaklığa bağlı olarak gevrek elastik, elasto - plastik, visko - elastik ve viskoz olmak üzere değişik reolojik hallerde bulunmaktadır. Rijit üst yapılarda bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun özellikleri sıcaklığa bağlı olmadığından, bu sakınca bulunmamakla beraber diğer taraftan, ani sıcaklık değişimleri beton plağın altı ve üstü arasında sıcaklık farkı doğurmakta, plağın kamburlaşmasına, eğilme gerilmelerinin artmasına yol açmaktadır. Nem farkı da benzer etkiler yaratmaktadır. Asfalt betonunun gerilme - deformasyon ilişkileri, yükleme hızının ve sıcaklığın fonksiyonu olduğundan, çimento betonu gibi sabit bir elastisite modülü ve poisson oranı bulunmamaktadır. Üst yapı projelendirme yöntemleri genellikle elastik varsayımlara dayandığından, esnek üst yapıların projelendirilmesi, rijit üst yapıya göre daha karmaşıktır. Bu güçlük yolun takviyesi sırasında da kendini göstermektedir. Üst yapı seçimini etkileyen teknik parametreler Çizelge 2.1.'de özetlenmiştir (Ağar vd, 1998)

Çizelge 2.1. Teknik parametrelere göre üstyapı seçimi (Ağar vd, 1998)

Teknik Parametre \ Üst Yapı Tipi	Esnek Üst Yapı (Kaplama tabakası asfalt betonu-BSK)	Rijit Üst Yapı (Kaplama tabakası çimento betonu)
<u>Taban zemini taşıma değeri (CBR)</u>		
20 > CBR > 6	+	+
CBR < 6	-	+
<u>Trafik</u>		
Büyük trafik hacmi	++	++
Yüksek yıllık artış oranı	-	++
Düşük yıllık artış oranı	+	-
Yüksek ağır taşıt oranı	-	++
Yüksek sıcaklık(ve farkı)	-	++
Onarımdan kaynaklanan geçikme	-	+

Çizelgede (+ veya ++) işareti uygun olma durumunu, (-) işareti ise, elverişsiz olma durumunu göstermektedir.

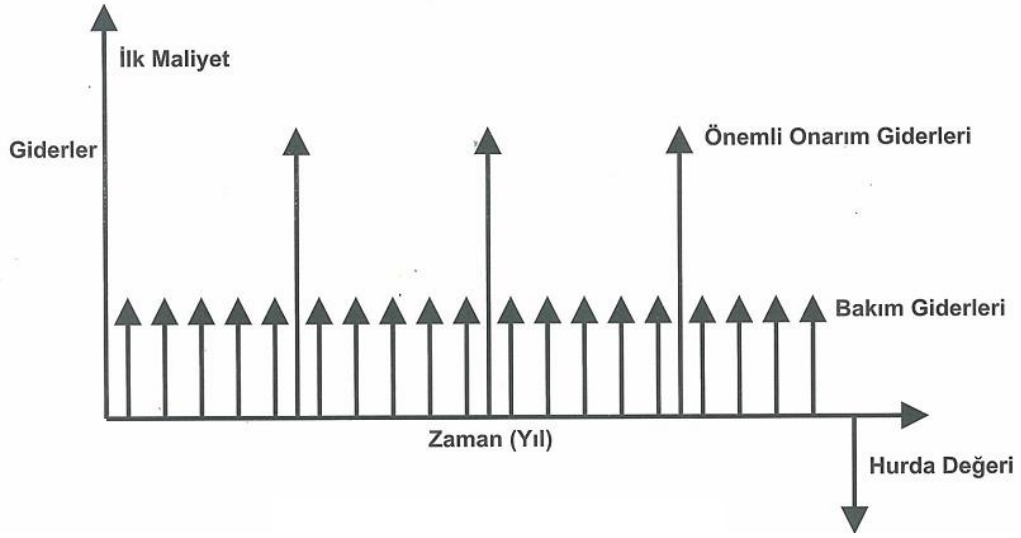
2.2.2 Yol üst yapı tipi seçiminde ekonomik ölçütler

Ekonomik karşılaştırma yapılabilmesi için, farklı zamanlarda yapılan harcamaların aynı yıla dönüştürülmesi, güncellenmesi gerekmektedir. Güncelleme için, faiz ve iskonto hesaplarından faydalanılmaktadır. Üst yapı tipi seçiminde göz önüne alınacak ekonomik ölçütler dört başlık altında toplanmaktadır:

2.2.2.1 Toplam ekonomik maliyet

Üst yapı tipi seçiminin en önemli ölçütü, uzun bir zaman dilimi, proje ömrü için hesaplanan toplam ekonomik maliyettir. Bir karayolunun gerçek ekonomik maliyeti, ilk yapım maliyeti, proje ömrü süresindeki bakım maliyeti ve bakım işlemleri nedeniyle ortaya çıkacak kullanma açısından gecikme maliyetlerinin toplamı olmaktadır (Ecevit, 2007).

Faydalı ömür; ilk maliyete ilaveten, yol inşaatlarını örnek aldığımızda, periyodik bakım ve onarım maliyetlerini içerir, bazen de kullanıcı maliyetlerini içerebilir. Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi toplam maliyet; ilk maliyet, ondan sonra periyodik bakım giderleri, önemli onarım giderleri ve neticede eğer bir kazanç sağlanıyorsa hurda değer bir gelir olarak gösterilir. Faydalı ömür maliyeti, kullanıcıya ait maliyetlerin de bir bölümünü kapsayabilir, ama genellikle sosyoekonomik, ekolojik faktörler itibara alınmaz (Yeğinobalı, 2002).



Şekil 2.3. Rijit üst yapı toplam maliyet grafiği (Yeğinobalı, 2002).

İlk yapım maliyeti

Bir üst yapının ilk yapım maliyeti hesaplanırken, aşağıda belirtilecek bazı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bunlar:

- Kullanılacak malzemelerin cins, miktar ve kaynaktaki maliyetlerinin tespiti,
- Malzemelerin taşıma maliyeti,
- İşçilik giderleri,
- İnşaat makineleri ile ilgili masraflar ve
- Sabit masraflar olarak sıralanabilir (Çetin, 2009).

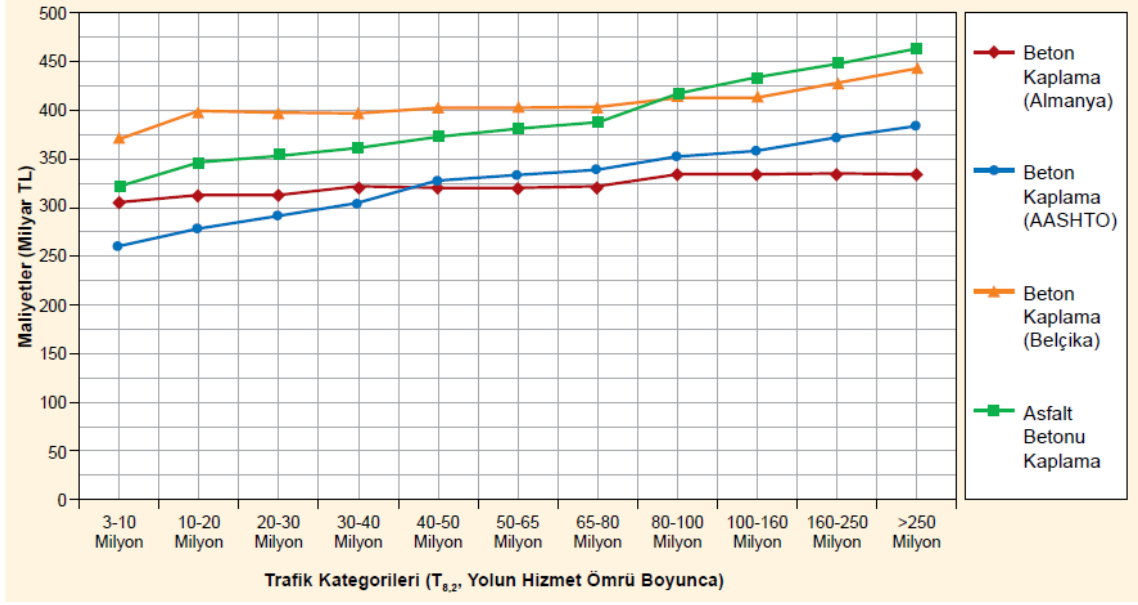
Beton yolların ilk yapım maliyeti genellikle asfalt yollardan yüksektir. Ancak, asfalt üretiminde kullanılan ham petrolün çok büyük bir kısmının ithal edilmesine karşılık, Türkiye bugün çimento üretimi bakımından Dünya'nın ve Avrupa'nın önde gelen ülkeleri arasında yer almaktadır. Ülkemizde 5 adet rafineriye karşılık, ülkenin bütün bölgelerine dağılmış ve uluslararası standartlara uygun çok sayıda çimento fabrikası ve hazır beton üretim tesisi bulunmaktadır. Bu bakımdan beton yollar asfalt yollara göre, malzeme bakımından, daha avantajlı görünmektedir (Çetin, 2009).

Araştırmacılar rijit üst yapı yolların esnek üst yapı yollara göre ilk yapım maliyetinin, bilinenin tersine, sadece sağlam zeminde ve düşük trafik hacimli yerlerde biraz yüksek olduğunu belirtmektedir. Ama yine de bakım ve onarım maliyetleri düşünülerek yapılan yollarda bile rijit üst yapı yolun tercih edilmesi gerekir. Ülkemizde yollarda %40 ağır taşıt trafiği olduğu da düşünülürse, rijit üst yapı yolun hem ekonomik olduğu hem de

bir zorunluluk olduğu açıktır (Zülkadiroğlu, 2006).

Ülkemizde beton yolun ilk yapım maliyetinin asfalt yolunkinden daha fazla olduğuna dair yerleşmiş bir kanı vardır. Ağar vd. (1998), tarafından yapılan bir çalışmada 20 yıllık hizmet ömrü esas alınarak zayıf zemin (CBR %3) ve iyi zemin (CBR %10) üzerinde değişik proje trafiği değerlerine göre esnek ve rijit üst yapıların ilk maliyetleri karşılaştırılmıştır. Araştırmacıların belirttiğine göre taban zemininin zayıf olması durumunda beton kaplama düşük trafik hacimlerinde bile asfalt kaplamalardan daha ekonomik olmaktadır. Ayrıca zeminin daha kuvvetli olması durumunda, asfalt kaplama belirli bir trafik değerine kadar daha ucuza mal olmakta, yüksek trafik hacimlerinde ise yine beton kaplama daha ekonomik olmaktadır.

THBB tarafından yapılan bir çalışmada asfalt ve beton yol üst yapılarının yapım maliyetleri karşılaştırılmıştır (Uçar vd., 2002). Bu amaçla şerit genişliği 3.5 m olmak üzere 2 şeritli, platform genişliği 12 m olan tipik bir yol kesiti düşünölmüş, taban zemini için CBR değerı %10 kabul edilmiştir. Trafik yükü olarak 8.2 tonluk eşdeğer dingil yükünün tekerrür sayısına bağlı olarak 11 farklı trafik kategorisi ele alınmıştır. Esnek üst yapı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından uygulanan esaslara göre tasarlanmış, rijit üst yapının tasarımında ise derzli donatısız kaplama için üç farklı ülkede uygulanan yöntemler takip edilmiştir. Bunlar A.B.D. de uygulanan AASHTO yöntemi, Almanya'da uygulanan RstO yöntemi ve Belçika'da uygulanan katalog yöntemidir. Bu suretle üst yapı tabakaları, kalınlıkları ve kullanılacak malzeme nitelikleri belirlendikten sonra Karayolları Genel Müdürlüğü, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Demiryolları, Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü tarafından 2002 yılında uygulanan birim fiyat ve rayiçler esas alınarak yolun 1 km uzunluğu için birim yapım maliyetleri hesaplanmıştır. Şekil 2.4.'te göröldüğü gibi rijit üst yapıların genel olarak esnek üst yapıdan daha düşük bir yapım maliyetine sahip oldukları görölmektedir. Sadece Belçika yöntemine göre tasarlanmış beton kaplamanın maliyeti belirli bir trafik yüküne kadar asfaltınkinden daha fazla, ağır trafik kategorilerinde ise daha az olmaktadır (Uçar, 2002).



Şekil 2.4. Yol üst yapılarının yapım maliyetlerinin karşılaştırılması (Uçar, 2002).

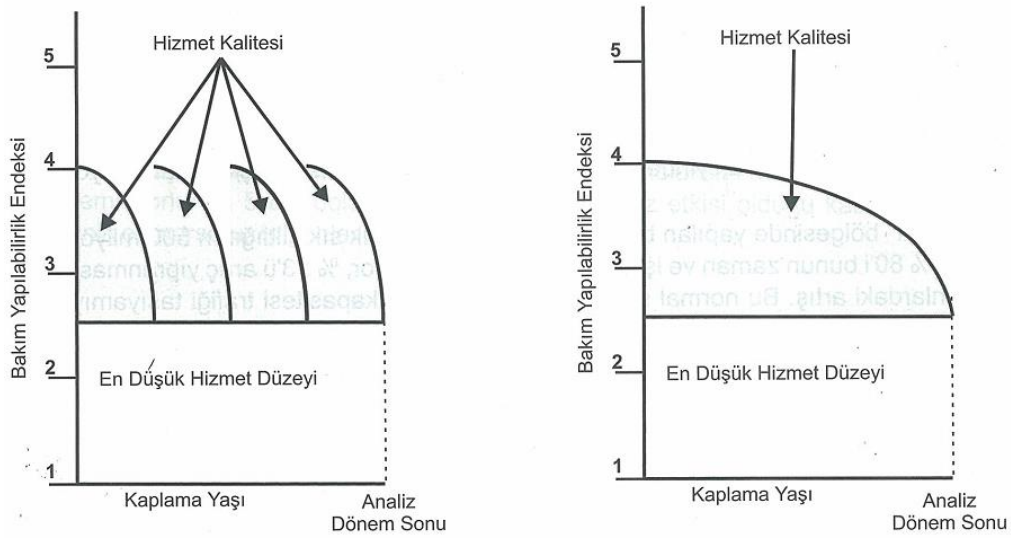
Bakım-onarım maliyeti

Trafik ve iklim koşulları yolun bozulmasına neden olan iki önemli etkidir. Bu etkilere karşı koymak, düzenli bakım yapmak suretiyle sağlanabilmektedir. Optimum bir bakım programında en önemli husus, üst yapının durumunun iyi bir şekilde bilinmesi olmaktadır. Rijit üst yapılar, 30 - 40 yıllık hizmet süreleri için projelendirilmektedir. Beton yollarda yüzey yenileme ve takviye işlemlerine gerek duyulmamaktadır. Projelendirme ve yapım işlemlerinin uygun şekilde gerçekleştirilmesi halinde, beton yollar tüm hizmet ömürleri boyunca az miktarda bakım gerektirmektedir. Beton kaplamaların zor ve pahalı onarımlara neden olabilecek projelendirme ve yapım hatalarına esnek üst yapılardan daha duyarlı olması nedeniyle, başlangıçtan itibaren yüksek projelendirme ve yapım standartlarına göre yapılması gerektiği vurgulanması zorunlu bir husus olmaktadır (Ağar vd., 1998).

Genellikle 20 yıllık bir süre için projelendirilen esnek üst yapılar, rijit üst yapılardan oldukça farklı bir bakım ve onarım ömrüne sahiptir. Esnek üst yapı yollarda görülen yerel bozuklukların her kış mevsimi sonunda bakımı dışında, ilk 5 yıldan sonra, küçük onarımlar ve yüzey kaplaması gerekebilmekte, 10. yılda yol yüzeyinin büyük bir olasılıkla yenilenmesi ve pürüzlendirilmesi gerekmekte, bir 5 yıl daha geçtikten sonra ilk 5 yıldaki gibi yüzey yapısını restore etmek gerekmektedir. 20 yılsonunda ise, esnek

üstyapılı yol tasarım ömrünün sonuna geleceğinden, yapının yeni bir üstyapı ile takviyesi zorunlu olmaktadır. Bunların dışında, temel ve alt temel tabakalarının onarım ve değiştirilmesi gibi çok önemli bakım çalışmaları gerekli olabilmektedir (Ecevit, 2007).

Aşağıdaki Şekil 2.5.'de ki iki diyagramda en düşük hizmet düzeyi endeksine göre yapılması gereken bakımlar(onarım ve yenileme) öngörülmüştür. Sağdaki grafik beton yola, sol taraftaki grafik ise asfalt yola ait bakım ihtiyacını göstermekte olup, aynı analiz dönemi dikkate alındığında beton yolun, dört kat daha uzun bir sürede hizmet düzeyinin devam ettiği görülmektedir (Yeğinoğlu, 2002).



Şekil 2.5. Rijit üstyapı bakım maliyeti (Yeğinoğlu, 2002).

Yolu Kullananlara Maliyeti

Normal durumlarda, lastik eskimesi, yağ, yakıt tüketimi gibi işletme masrafları, her iki üst yapı tipinde eşit durumda bulunmaktadır. 20 - 30 yıllık hizmet ömrü süresinde, yol bakım çalışmalarının yol açtığı gecikmeler esnek üstyapılarda büyük ekonomik zararlara yol açmaktadır. Beton yollarda bu sakınca yok denecek kadar azdır (Ecevit, 2007).

2.2.2.2 Ülkede mevcut yolların üstyapı durumu

Mevcut bir yol üst yapısının takviyesi için beton yollar ekonomik olmamaktadır. Bu nedenle, ülkedeki yolların üst yapısının esnek olması halinde, takviyenin asfalt kaplama ile yapılması uygun olmaktadır. Üst yapının temel ve kaplama tabakalarının değiştirilmesinin gerekli olduğu yenileme çalışmalarında ancak rijit üst yapı seçeneği de dikkate alınabilmektedir (Ağar vd., 1998).

2.2.2.3 Yol üst yapı inşasında mevcut makine parkının kullanılabilirliğinin maliyete etkisi

Ülkedeki yolların mevcut durumu ve yakın planlamadaki yapılacak olan üst yapı / üst yapı tipi çalışmalarına göre, her bir ülkedeki mevcut ve gerekli makine parkı değişkenlik göstermektedir. Yapılacak olan üstyapı tipi seçiminde, ülkedeki mevcut makine parkı ilave yüksek maliyetlerin oluşmaması için dikkate alınmalıdır.

Ülkemiz gibi genel olarak BSK tipinde üst yapı yapılması planlanan ve bu durum için gerekli makine parkına sahip olan ülkelerde; alt yapı(toprak işi) inşası için gerekli makineler, mekanik malzeme ve BSK’da kullanılan finişerler ve yüksek bedellerde inşa edilen asfalt plentleri bulunmakta ve kullanılmaktadır. Ülkemizde asfalt plentleri son zamanlarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Bizim ülkemiz gibi olan ülkelerde; beton yol uygulamalarına geçilmesi, geleneksel beton ile beton yol tercihinde eldeki makinelerin ancak alt yapının inşasında kullanılabilirliğini mümkün kılmakta, mevcut asfalt finişerlerini boşa çıkartmakta, üst yapı uygulaması için özel ve ciddi fiyatlarda ki beton finişerlerinin teminini gerektirmektedir. Bu durum geleneksel beton ile beton yol tercihinde üst yapı inşasında ülkeye ciddi ek maliyet getirecektir.

2.2.2.4 Enerji tüketimi

Enerji sorunlarının ciddilik düzeyi, zamana ve ülkelere göre değişkenlik göstermektedir. Buna karşılık, kaplama yapım stratejisinin seçiminde, en önemli ölçütler olan yapım ve bakım giderlerinin yanı sıra, problemin enerji yönü de dolaylı olarak seçimi etkileyebilmektedir. Fransa’da yol yapım, bakım ve onarım çalışmalarda harcanacak enerji miktarlarının, esnek ve rijit üst yapılar için hesaplanıp karşılaştırılması sırasında,

malzemelerin elde edilmesi, taşınması, yol için gerekli karışımların hazırlanması, yola serilmesi için tüketilen enerji miktarları dikkate alınmıştır. Karşılaştırma sonunda bulunan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilmektedir (Ağar vd., 1998).

- Asfalt enerji veren bir madde olarak alınırsa, günlük ortalama trafiğin 3000'in üstünde olması halinde, rijit üst yapıların yapımı esnek üst yapılarından daha az enerji gerektirmektedir.
- Asfalt enerji vermeyen bir malzeme gibi düşünülürse, rijit üst yapılarda esnek üst yapıdan fazla enerji kullanıldığı görülmekte, trafik hacmi düştükçe bu fark artmaktadır.
- Yüksek trafik hacmi halinde, 25 yıllık bir periyot için, beton yolların bakımında esnek yollardan daha az enerji tüketildiği ortaya çıkmakta, düşük trafik hacmi halinde ise, iki üst yapı tipinin bakım masrafları birbirine yaklaşmaktadır.
- Günlük ortalama trafiğin 750'nin üstünde olması halinde ilk yapım ile 25 yıllık bakım için tüketilen enerji miktarı, beton yollarda esnek tipten daha az olmaktadır.

Ülkemiz koşullarına göre yapılan hesaplamalarda da benzer sonuçlar bulunmuştur. Üst yapı seçimini etkileyen ekonomik parametreler Çizelge 2.2.'de özetlenmiştir (Çetin, 2009).

Çizelge 2.2. Ekonomik parametrelere göre üst yapı seçimi (Çetin, 2009).

Ekonomik Parametre \ Üst Yapı Tipi	Esnek Üst Yapı (Kaplama tabakası asfalt betonu-BSK)	Rijit Üst Yapı (Kaplama tabakası çimento betonu)
İlk yapım maliyeti	+	-
Ömür boyu toplam maliyet (ilk yapım+bakım+gecikmeler)	-	+
Çimento, curüf ve ucucu külün bol ve kolay bulunması	-	+
Mevcut üst yapıların esnek olması	+	-
Yüksek iskonto oranı	+	-
Enerji azlığı	-	+

Çizelgede (+) işareti uygun olma durumunu, (-) işareti de elverişsiz olma durumunu göstermektedir.

Teknik ölçütlere göre seçim yapılması durumunda; taşıma gücü zayıf taban zemini, büyük hacimli trafik, yüksek yıllık trafik artış oranı, yüksek ağır taşıt miktarı, yüksek sıcaklık durumlarında rijit üst yapılar, büyük trafik hacmi, düşük yıllık trafik artış oranı durumlarında esnek üst yapılar uygun olmaktadır. Ekonomik ölçütlere göre üst yapı

seçimi yapıldığı takdirde; ömür boyu toplam maliyet, çimento, cüruf, uçucu külün bol ve kolay bulunması ve enerji azlığı durumlarında rijit üst yapılar, ülkedeki ilk yapım maliyeti ve iskonto oranının yüksek olması halinde ve takviye çalışmalarında esnek üst yapılar uygun olmaktadır. Ancak şu unutulmamalıdır ki, üst yapı tipi seçiminde, teknik ve ekonomik ölçütlerin birlikte dikkate alınması uygundur. Ölçütlerin tek olarak değerlendirilmesi, en uygun çözüm için yeterli olmamaktadır (Ecevit, 2007).

2.2.3 Rijit ve esnek yol üst yapılarının karşılaştırması

Karayollarında kullanılan, birbirinden tamamen farklı yapıda olan, esnek ve rijit yol üst yapıları teknik, ekonomik, çevresel ve estetik v.b. yönler dikkate alınarak şöyle karşılaştırılabilir;

- 1- Mevcut üst yapılar, beton asfalt kaplamalı olup bunlarda sadece kaplamanın değişmesi şeklinde bir onarım gerekiyorsa, bu takviye çalışması için yine esnek üst yapı uygulaması daha uygundur. Fakat onarım, temel ve kaplamanın değişmesi şeklinde yapılacaksa bu takdirde rijit üst yapı uygulaması seçeneğinin de göz önünde bulundurulması gerekir. Nitekim kaplamanın beton asfalt ile takviye ile yenilenmesi durumunda yol, yine eski durumuna getirilmiş olunacak, fakat rijit plak yapımında o yolun kalitesi, belirgin bir şekilde yükselmiş olacaktır. Bu husus, teknik ve ekonomik parametrelerin kıyaslanacağı ciddi bir fizibilite çalışması gerektirir (Çetin, 2009).
- 2- Petrol üreten veya petrol gereksinmelerinde herhangi bir sorunu bulunmayan ülkelerde esnek üst yapılar ekonomik olmakta, buna karşılık çimento üretimi yönünden ileri düzeyde bulunan ülkelerde, rijit üst yapıların daha rantabl olduğu görülmektedir (Ağar vd., 1999).
- 3- Petrol damıtan rafinerilerin sayısının az olduğu ülkelerde, esnek üst yapıların bağlayıcısı olan asfaltın, çeşitli plant veya santrallere taşınması ve nakledilmesi, yüksek bir ulaşım maliyetini de beraberinde getirmektedir. Aynı sorun çimento üreten fabrika sayısının azlığı durumunda da yaşanır (Pancar, 2008.).
- 4- Beton asfalt üretimi, pahalı santraller (plantler) gerektirmektedir. Ayrıca esnek üst yapılar rijit üst yapılara kıyasla daha fazla enerji harcanması sonunda yapılır (Çetin, 2009).

- 5- Beton yolun hizmet ömrü asfalt yolunkinden 1.5 - 2.0 kat daha uzundur. Çok daha az bakım ve onarım ister. Dolayısı ile yapım maliyetinin asfalt yoldan pahalı olması halinde bile hizmet ömrü bazında çok daha ekonomiktir (Zülkadiroğlu, 2006).
- 6- Beton yollar asfalt yollara göre daha az mevsimsel hasara uğrarlar. Betonun dayanımının en çok önem kazandığı mevsim ilkbahardır. AASHTO tarafından yapılan bir araştırmaya göre, asfalt yolların %61'i Kanada bahar koşullarında bozulmaktadır. Oysa ki, bu oranın beton yollarda sadece %5,5 olduğu görülmüştür. (Pancar, 2008.)
- 7- Normal olarak beton yolda giden taşıt düzgün asfalt yoldakinden biraz daha fazla gürültü çıkarır. Son yıllarda geliştirilen yüzey pürüzlendirme yöntemleri ve derz dolguları ile bu fark ortadan kaldırılmış veya en az düzeye indirilmiştir (Zülkadiroğlu, 2006).
- 8- Bir alt temel, temel ve beton asfalt kaplamadan oluşan esnek üst yapının toplam kalınlığı, rijit plak ve altında kumlu yastık tabakasından oluşan rijit üst yapının toplam kalınlığına kıyasla çok daha fazladır. Bütün tabakalarda ana malzeme, agregadan oluşmaktadır. Bu nedenle sonuçta, eşdeğer niteliklere sahip olsalar dahi, esnek üst yapı yapımı için gereken agrega miktarı, rijit üst yapıya göre daha fazla olmaktadır. Agreganın kalitesi yönünden ise, esnek üst yapılar için çok kaliteli agreganın kullanılması zorunludur. Buna karşılık rijit üst yapılarda, daha düşük kalitedeki agreganın da kullanımına olanak bulunmaktadır (Ecevit, 2007).
- 9- Esnek üst yapılarda bağlayıcı olarak kullanılan asfalt malzemesi, bünyesinde çeşitli uçucu maddeleri içermekte ve bu uçucu maddelerin zamanla kaybolması sonunda da kaplamada “yaşlanma” adı verilen bir tür gevrekleşme ve eskime görülmektedir. Esnek üst yapılar ayrıca benzin, motorin, yağ ve tuz gibi maddelerin yol üzerine dökülmesi ile de kimyasal yapılarında değişimler gösterir. Rijit üst yapılarda ise kullanılan bağlayıcı çimento olup herhangi bir uçucu madde içermemektedir. Bu nedenle sözü edilen yaşlanma olgusu, rijit kaplama için söz konusu değildir. Bunun yanı sıra, yukarıda sayılmış olan ve eritici özelliği bulunan kimyasal maddelerin beton yol üzerine dökülmesi durumunda da üst yapının hiç bir özelliğinde değişim görülmemektedir (Çetin, 2009).

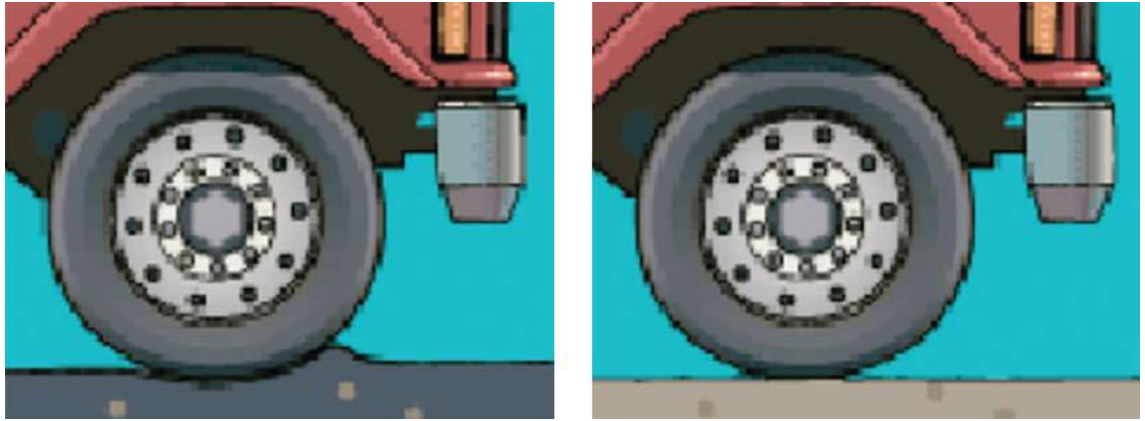
- 10- Kaplamanın ömrü süresince verdiği hizmetin kalitesinin karşılaştırılması bakımından bir puanlama ile yolların yıllara göre “bozunma hızı” hesaplanmıştır. Buna göre, asfalt yol %80 performansa yaklaşık 7 yılda inerken, beton yol aynı performans düzeyine 13 yılda inmektedir. Bunun yanında, asfalt tamir kaplamasının bozunma hızı yeni asfaltın da çok üzerinde olmaktadır. Tamir kaplamasının ömrü 7 yılda %70’e inmekte ve 20 yılda tamamen ortadan kalkmaktadır (Pancar, 2008).
- 11- Esnek kaplamaların yapım ve uygulama aşamalarında, ısıtma ve kurutma işlemlerinin bulunması nedeniyle çevre kirliliğinin ortaya çıktığı görülmüştür. Rijit üst yapı yapımının ve uygulamasının hiçbir aşamasında böyle bir sorunla karşılaşılması söz konusu değildir (Ecevit, 2007).
- 12- Esnek kaplamalarda taban zeminindeki nem oranının en çok %2 olması istenir. Daha yüksek taban zeminine sahip taban zeminlerinde, esnek üst yapı uygulaması son derece sakıncalı olup, kaplama ömrünüde büyük ölçüde azaltır. Rijit üst yapılarda ise böyle bir sorun bulunmamakta ve hatta iyi bir kenetleme için taban zemininde nemlilik, hatta ıslaklık aranmaktadır (Ecevit, 2007).
- 13- Esnek üst yapılar, sıcaklıkla çok yakın ilişki içerisindedir. Plent ve santralde yapımının belli bir ısı değerinin üzerinde gerçekleşmesi zorunluluğu, sonrada yüksek ısıda korunup döküm yerine iletilme, dökülme ve sıkıştırılma zorunluluğu, aynı zamanda uygun iklim koşullarına gereksinme gösterir. Nitekim bir esnek kaplamanın yapımı ve uygulanması için hem kuru hem de sıcak bir hava gerekmektedir. Bu koşullar, uygulaması iklime bağlı olan esnek kaplamaların yapım zamanını ve süresini büyük ölçüde kısıtlar. Rijit üst yapılar için böyle bir sakınca söz konusu değildir. Aşırı yağışın ve aşırı derecede bir soğuk havanın (5 °C’nin altında) olmadığı her zamanda rijit üst yapı uygulaması yapılabilmektedir. Bu nedenle rijit üst yapıların, yıl içindeki uygulama süresi toplamı, esnek üst yapılarınkine kıyasla çok fazladır (Çetin, 2009).
- 14- Mevsimler arasında büyük sıcaklık farkları bulunan ülkelerde, esnek üst yapılar daha az ömürlü ve dayanıksız olup, daha fazla bakım ve onarıma gereksinme gösterdiği bilinen bir gerçektir. Buna karşılık bu şekildeki iklim koşullarından

beton yollar çok daha az etkilenmekte, hemen hemen hiç bozulmamakta, dolayısı ile de herhangi bir bakım ve onarım zorunluluğu getirmemektedir (Ecevit, 2007).

- 15- Her iki kaplamanın sıkıştırılmasında büyük farklılıklar bulunmamaktadır. Esnek üst yapıların kaplamalarının belirli bir ısıda iken (125 °C) dökülmesi ve sıkıştırılması gerekir. Bu ısı değerindeki düşmelerde, sıkıştırma iyi bir şekilde gerçekleşmemekte ve belirli bir ısının altındaki asfalt betonu, yumuşaklığını kaybetmekte, kaplamada da boşluk yüzdesi artmaktadır. Rijit üst yapılar ise vibratörle sıkıştırılmakta olup ısı kaybı gibi bir sorun, beton kaplamalar için söz konusu değildir (Çetin, 2009).
- 16- Esnek üst yapılarda yapım ilerleme hızları; plent kapasitesine, plent ile döküm yeri arasındaki uzaklığa, döküm ve sıkıştırmadaki çabukluğa bağlıdır. Rijit üst yapılarda yapım hızı, transmikserlerin kapasitesine ve sayısına, imalat yeri ile döküm yeri arasındaki uzaklığa, döküm sırasındaki vibrasyon ve perdahlama işlerinin çabukluğuna bağlı kalmaktadır (Çetin, 2009).
- 17- Beton asfalt kaplama çok kolay bir şekilde yama tutabilen bir malzemedir. Rijit üst yapılarda ise bu onarım çok daha zahmetli olup plağın kırılması ve yerine yeni plağın dökülmesi gerekir. Betonun demir donatının bulunması ve bunun da kesilip yeniden yapım zorunluluğu, ayrıca yeni dökülen betonun da belirli bir süre bekletilmesi gereği, bunun yaratacağı gecikme ve yolun o kısmının yine de zayıf kalabilecek olması gibi hususlar, rijit üst yapının esnek üst yapılara karşı zayıf yönleridir. Fakat rijit üst yapılar, çok daha dayanıklı bir kaplama türü olup, çok az bakım ve onarım gerektirir bu nedenle uzun vadede dikkate alındığında, onarımı çabuk ve kolay olmasına karşılık çok sık periyotlarda onarım gerektirecek olması, esnek üst yapıların rijit üst yapılara karşı zayıf yönünü ortaya çıkarmaktadır (Ecevit, 2007).
- 18- Esnek üst yapılar, serilip sıkıştırıldıktan birkaç saat sonra trafiğe açılabilir. Buna karşılık rijit üst yapıların trafiğe açılması için en az 7 gün beklenmesi ve betonun belirli bir dirence ulaşım süresinin geçmesi gerekmektedir. Ancak bu husus, beton içine yapım sırasında katılan prizi ve sertleşmeyi çabuklaştırıcı katkı maddeleri ve erken dayanımı yüksek çimentolar kullanılarak giderilebilmekte ve rijit üst yapının trafiğe açılabilme süresi azaltılabilmektedir. Rijit üst yapı

uygulaması olan yerlerde trafiğe yol vermek amacı ile servis yollarına gerek duyulabilmekte, bu da ek masrafa yol açmaktadır (Ecevit, 2007; Zülkadiroğlu, 2006).

- 19- Asfalt yolda giden araçların özellikle ağır vasıtaların tekerlekleri, Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi beton yüzeyine göre daha yumşak olan asfalt kaplama yüzeyine gömülerek zorlandığından, beton yolda gidenlere oranla daha fazla yakıt tüketirler (Zülkadiroğlu, 2006).



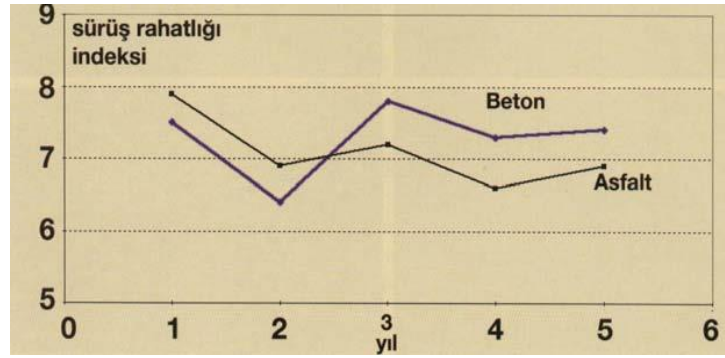
Şekil 2.6. Asfalt ve beton yolda ağır vasıta tekerleği (Yeğınobalı, 2009).

- 20- Beton kaplamalarda aşınma miktarı normal dayanımlı betonlarda (20 MPa) kuru halde asfaltın %60'ı, ıslak halde ise asfaltın 1/3'ü kadar olmaktadır. Beton dayanımı arttıkça aşınma dayanımı artmaktadır (Zülkadiroğlu, 2006).
- 21- Beton kaplamanın, sınanmış en önemli avantajı uzun yapısal ömrü ve dayanımıdır. Bugüne kadar uygulanmış olan projelerde, aynı iklim şartlarında, asfalt yollarda beton yolların servis ömrü bakımından performansları, örneğin ABD'de eyalet karayolları birimlerince, yıllar içerisinde izlenerek kaydedilmiştir. Ağır kış şartlarına ve yaz sıcaklarına maruz kalan ve ağır araçları taşıyan bu yolların performansları incelendiğinde, Çizelge 2.3. de görülen sonuçlar elde edilmiştir (Pancar, 2008).

Çizelge 2.3. ABD’ deki yol kaplamalarının servis ömrü (yıl) karşılaştırılması (Pancar, 2008).

Kuruluş	Beton	Asfalt	Oran
Wisconsin	20-25	12-14	1,7-1,8
Minnesota	35	20	1,8
Kentucky	20	12	1,7
New York	20-25	10-13	2,0-1,9
Colorado	27	6-12	4,5-2,3
FHWA(1985)	13-30	6-20	2,2-1,5

22- Kanada’nın Nova Scotia Eyaleti Ulaştırma ve Bayındırlık Bakanlığı tarafından beş yıl süre ile yürütülen bir araştırmada 104 numaralı otoyolun 1994 yılında inşa edilen ve birbirine komşu asfalt ve beton bölümleri üzerinde sürüş yapılan araştırmanın sonuçlarına göre beton yolların sürüş rahatlığı incelenmiştir. Deneme sürüşlerinde toplanan bilgiler kaplama yüzeyinin geometrik düzgünlüğü ve oluşan bozulmalarla ilişkili bir “sürüş konfor indeksi”ne çevrilmiştir. Şekil 2.7.’da görüldüğü gibi, ilk iki yıl asfalt yolda sürüş daha rahat iken sonraki yıllarda üstünlük daha dayanıklı olan betona geçmiştir (Yeğınobalı, 2009).



Şekil 2.7. Asfalt ve beton yolda sürüş rahatlık indeksi (Yeğınobalı, 2009).

23- Gerek esnek üst yapılarda, gerekse rijit üst yapılarda, yüzeydeki kayma sürtünme katsayıları hemen hemen aynı olup ve 0.60 ile 0.90 arasında değişmektedir. Fakat her iki üst yapının da ıslak koşullar altında olduğu durumlarda, rijit üst yapı yüzeyindeki kayma sürtünme katsayısındaki azalma, esnek üst yapıya kıyasla çok daha azdır. Bu da rijit üst yapıların, güvenlik yönünden çok önemli bir üstünlüğünü oluşturur (Ecevit, 2007).

- 24- Her iki kaplama türü de iyi bir şekilde uygulanma koşulu ile hemen hemen aynı konfora sahip, ancak açık rengi sebebiyle rijit üst yapılar, gece karanlığında da görülebilmekte, esnek üst yapılar gece karanlığında, herhangi bir çizgileme veya reflektörlü sınır taşları yapımı uygulanmamışsa, far ışığı altında dahi yeterli görülmemektedir (Ağar vd., 1999.).
- 25- Beton, doğal olarak açık renklidir ve araçlardan veya sokak lambalarından gelen ışıkları koyu asfalt kaplamalara göre daha az emmektedir. Bu sebeple, beton yollarda gece görüşü artmaktadır. Bir bilimsel araştırmaya göre, bu gece görüşü artışı, %45 civarında olabilmektedir. Örneğin, asfalt yolda 250 watlık bir lamba yerine, beton yolda aynı sayıda 172 watlık lamba yeterli olabilmektedir veya kilometre başına asfalt yolda 20 lamba gerekirken, beton yolda 14 lamba yeterli olmaktadır. Yolların hepsi aydınlatılmamaktadır; ama %15'inin aydınlatılacağı hesaba alınırsa beton yol kilometre başına yılda 6260 kilowat tasarruf anlamına gelmektedir. Beton yol, ıslak olduğu zaman bile tehlikeli far ışığı yansımalarına sebep olmamaktadır. Bu olay trafik güvenliği açısından çok önemlidir (Pancar, 2008).
- 26- Rijit üst yapı uygulamasında, esnek üst yapı uygulamasına kıyasla daha fazla sayıda kalifiye elemana ihtiyaç duyulur. Bu durum rijit üst yapılar için bir dezavantaj gibi görünmesine rağmen daha fazla sayıdaki kalifiye eleman gereksinimi, daha yüksek düzeydeki bir kalite anlamına gelmektedir. (Ecevit, 2007).
- 27- Rijit üst yapılar demir donatı kabul eden tek üst yapı tipidir. Maliyeti artıran bir husus olmakla beraber donatının kullanılabilir olması, rijit üst yapı ömrünü daha da arttıran bir avantaj sayılır (Ağar vd., 1999).
- 28- Rijit üst yapılarda belirli aralıklarla derz yapılması zorunludur. İstenen düzeyde ve kalitede yapılmamış olan derzler belirli bir gürültüye ve konfor eksikliğine de neden olmaktadır. Bu derzlerin esnek üst yapılarda yapılmaması ve kaplamanın esnek olması nedeniyle kendi bünyesi içinde genişip büzülebilen asfalt yollarda bu durum, belirli bir avantaj sayılır (Çetin, 2009).

29- Esnek ve rijit üst yapılar, trafik yükünü taban zeminine iletme ve tahrip olma şekilleri yönünden farklılık göstermektedir. Esnek üst yapılar, üzerlerine gelen yükleri bir alt tabakaya yayarak iletirler. Kaplamadan temele, temelden alt temele ve nihayet alt temelden taban zeminine iletilen yükler, her bir tabaka geçişinde gittikçe yayılmakta ve daha geniş bir alana dağılmaktadır. Böylece doğal zemine (altyapıya) ulaşan yük, büyük bir alana yayılmış olur ve esas taşıyıcı olan altyapı, yüksek gerilmelere maruz kalmaz. Rijit kaplamada durum tamamen farklıdır. Rijit üst yapıların taşıma kapasitesi, elastisite modülü ve dolayısıyla rijitliği çok yüksek olan beton plağın eğilme direncine dayanır. Rijit üst yapı plağı, elastik bir zemine oturan bir kiriş gibi çalışır ve üzerine gelen yükleri çok daha geniş bir alana yayarak taban zeminine iletir. Beton plağın altında meydana gelen gerilmeler, kaplamada oluşan defleksiyonun ve taban reaksiyon modülünün (yatak katsayısı) bir fonksiyonudur. Rijit üst yapının taşıma gücü, taban zeminin direncine bağlı değildir. Bu nedenle rijit üst yapılar, zayıf taban zeminleri üzerinde, esnek üst yapılara kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir (Ecevit, 2007).

Yukarıda 29 madde içinde belirtilmiş olan rijit - esnek üst yapı kıyaslaması, Çizelge 2.4.'te özetlenmiştir. Çizelge 2.4.'ten de anlaşılacağı gibi her iki üst yapı türü için de avantajlı ve uygun olan durumların yanı sıra uygun olmayan ve sakıncalı olan durumlar da sıralanmıştır. Tamamen artılardan oluşan tek bir kaplama türünün uygulanması, bu koşullarda olanak dışıdır, çünkü birçok parametre birbiri ile çelişmektedir bu nedenle üst yapı seçiminde, o yoldan beklenen performans ve ülkenin çeşitli koşulları (ekonomi, iklim, trafik, teknik olanaklar, kalite tercihi vs.) dikkate alınmak ve optimum sonuca ulaşmak zorunluluğu doğmaktadır.

Çizelge 2.4. Rijit - esnek üst yapı kıyaslaması (Çetin, 2009).

Parametreler	Esnek Üst Yapı	Rijit Üst Yapı
Trafığe çabuk açılabilme	+	-
Demir donatı kullanabilme	-	+
Onarım sıklığı	-	+
Dayanıklılık	+	+
Islak halde kayma sürtünme katsayısı	-	+
Zayıf taban zemininin bulunması	-	+
Yapım sırasında ısı kaybının yol açacağı sorunlar	-	+
Kaliteli agrega gereksinimi	-	+
Derz yapma zorunluluğu	+	-
Seyir konforu		+
Gece seyirde görüş olanakları	-	+
Yaşlanma ve kimyasal maddelerden etkilenme	-	+
Yapım sırasında çevre kirliliğini artırıcı etki	-	+
Enerji azlığından etkilenme	-	+
Taban zeminindeki ıslaklık	-	+
İklim koşullarına bağımlılık	-	+
Trafikte yüksek yıllık artış oranı	-	+
Trafikte düşük yıllık artış oranı	+	-
Trafikte yüksek ağır taşıt oranı	-	+
Üstyapı kaplama takviyesi	+	-
Üstyapı temel+kaplama değişimi	+	+
Yüksek iskonto oranı ve sınırlı yatırım kaynakları	+	-

++:çok avantajlı, çok uygun; +: avantajlı, uygun; -: sakınca yaratır, uygun değil; -:çok sakıncalı, hiç uygun değil

2.3 Rijit Yol Üst Yapılar

2.3.1 Rijit yol üst yapıların tarihçesi

Yollarda hidrolik ve puzolanik bağlayıcılar ilk olarak Romalılar tarafından M.Ö.1.YY.'da kullanılmıştır. Taşları birbirine bağlamak için kullanılan bağlayıcı iki kısım doğal puzolan ve bir kısım kireçten oluşmuştur. 1865'de İskoçya'da ilk beton yol denemeleri, 1880'de Avustralya'da ilk beton yollar yapılmaya başlanmıştır (Karpuz, 2008.).

Bugün de kullanılmakta olan haliyle ve belgelenmiş olan ilk rijit üst yapı Amerika Birleşik Devletleri Ohio Bellefontin Kasabası'nda George Batholomew tarafından 1891 yılında inşa edilmiştir. George Batholomew bu proje girişiminden önce yapacağı üst yapının en az 5 yıl dayanacağına dair 5000 dolarlık garanti bedeli yatırmak zorunda

kalmıştır. Ancak yapacağı üst yapının 100 yıldan daha uzun bir süre için hizmet vereceğini düşünememiş veya rijit üstyapılar adına sahip olduğu düşüncenin dünyanın her bir yanına yayılacağını bilememiştir. 12 Kasım 1991’de Batholomew’in torunları, kasaba halkı ve ilgili resmi devlet daireleri Amerika’da rijit üst yapıların doğuşunun yüzüncü yılını kutlamak için bir araya gelmişlerdir (Ecevit, 2007).

1913 yılında Arkansas’ta Amerika’nın ilk beton otoyolu yapılmış, 1914 Amerika’da 3.500 km beton yol yapımı tamamlanmış, yol yapımında “Silindirle Sıkıştırılan Beton Yollar” kullanılmaya başlanmıştır. 1924 Fransa’da beton yol yapımı programı başlatılmıştır (Karpuz, 2008).

1920 ile 1930 yılları arasında rijit ve diğer tip üstyapıların taşınma, yerleştirme, sıkıştırma ve tamamlama işlemleri elle yapılan iş gücüne dayanmaktaydı. Fotoğraf 2.1. ve Fotoğraf 2.2.’de Almanya’da, 1930 yıllarda inşa edilmiş olan bir derzli rijit üst yapı görülmektedir. 1930’lu yıllarda 2. Dünya Savaşı’na hazırlanan Almanya’da beton otoyolların uzunluğu 4000 km’yi bulmuştur (Ecevit, 2007; Çetin, 2009).



1920’li yıllarda ABD’de sabit-kalıp ile beton kaplama uygulaması



1930’lu yıllarda Almanya’daki mekanik beton kaplama uygulaması

Fotoğraf 2.1. 1920 ile 1930’lu yıllarda rijit üst yapı uygulamaları. (Çetin, 2009).



Fotoğraf 2.2. Berlin yakınlarında 1930'lu yıllarda inşa edilen rijit üst yapılı otoyol (Çetin, 2009).

Daha sonra İsviçre, Belçika başta olmak üzere, diğer Avrupa ülkelerinde de beton yol yapımı başlamıştır (Ecevit, 2007).

Belçika'da Fotoğraf 2.3.'de görülebileceği gibi, 1925 yılında Brussels'in güneyindeki Dreve-de-Lorraine Karayolu'nda inşa edilen derzli rijit üst yapı hala iyi durumdadır. Belçika'da otoyolların yaklaşık olarak %40'ı rijit üst yapılar kullanılarak inşa edilmiştir (Çetin, 2009).



Fotoğraf 2.3. Dreve-de-Lorraine Karayolu, Brussels; 1925 yılında boyuna derz olmadan inşa edilmiş olan derzli rijit üst yapı (Çetin, 2009).

Bu yıllarda Belçika ve Fransa'da beton otoyol yapmaya başlamıştır. Otoyollarda beton plak kalınlıkları daha büyük (24 cm) seçiliyordu. Bu kalınlığın 5 cm'lik üst kısmı aşınma tabakasına ait oluyordu. Yol betonunun hazırlanması şantiyenin önerisine göre, iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Birinci yöntemde, beton sabit santralde karıştırılmış, daha sonra yola vagonet veya kamyonlarla taşınmıştır. İkinci yöntemde ise, yol şantiyesi ilerledikçe beton santrali yer değiştirmiştir. Aynı dönemde, A.B.D'de yukarıda belirtilen iki yöntem birleştirilerek uygulanmıştır (Giriş, 2007).

Kayar kalıp sistemi, Iowa Eyaleti Karayolları komisyonunda malzeme mühendisi olarak çalışan J. W. Johnson tarafından geliştirilmiş olup, 1950'li yıllarda Kayar kalıp kullanımıyla beton yol yapımında hız ve kalite artmıştır (Karpuz, 2008).

Avusturya'da 1950'li yıllardan itibaren ağır kamyon trafiği altında çok iyi performans gösteren birçok rijit üst yapılar inşa edilmiştir. Hollanda da gözlemlenen en eski rijit üst yapı 1950 yılında inşa edilmiştir (Çetin, 2009).

Betonun kalıplar arasına serilmesi, kalıpların nivelmanı ve yerlerinden oynamayacak şekilde tespiti sayesinde, yolun enine profili kadar boyuna profilinin de kalitesinin garanti altına alınması mümkün olmuştur. Metalik deforme olmayan kalıplar kullanılması, inşaat makinelerinin de yolda deformasyona, bozulmalara yol açmadan taşınmasına olanak sağlamıştır. Betonun yola serilmesinden, sıkıştırılıp perdahlanmasına kadar olan tüm işler önce A.B.D.'de sonra Almanya, Belçika ve Japonya'da makineler grubu ile gerçekleştirilmiştir (Giriş, 2007).

A.B.D.'de 1957 yılında başlayan "Eyaletlerarası Otoyol Sistemi" tamamlandığında önemli bölümü beton kaplama olarak 60 000 km'den fazla yol yapılmıştır. (Çetin, 2009).

1960 – 1970 yıllarda ABD ve Kanada'da beton yol yapımı yoğunlaşmış olup, ABD'de 70.000 km beton yol yapılmıştır (Karpuz, 2008).

Sürekli betonarme yol tekniği ilk Brüksel - Liege arasında 1970'de uygulanmaya başlanmıştır. Fransa'da ise ilk uygulama 1983'te otoyol takviyesi aşamasında yapılmıştır.

Beton yol teknolojisinde yaşanan hazır beton, kayar kalıp, geçirimli beton, lifli beton, ön gerilmeli beton, sürekli betonarme gibi yenilikler ve hızlı gelişmelerle beton kaplama, günümüzün modern yolları için asfalt kaplamalara karşı vazgeçilmez bir seçenek haline gelmiştir (Giriş, 2007).

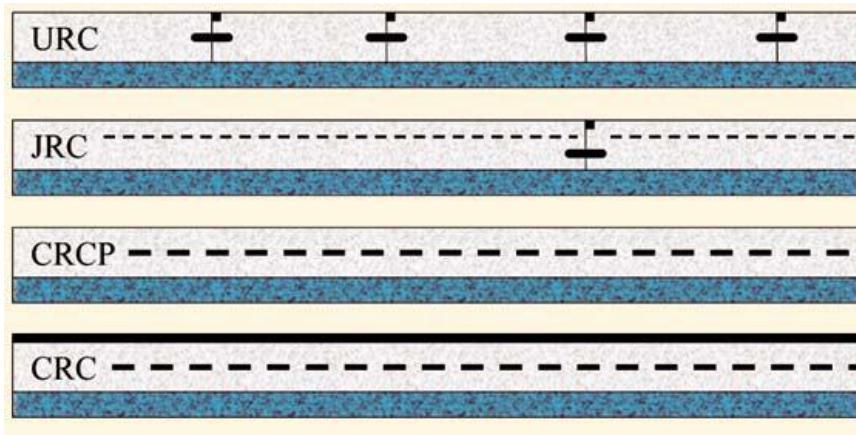
2.3.2 Rijit yol üst yapıların türleri

Dünyada uygulanmış ve uygulanması için araştırılmış birçok rijit üst yapı tipi bulunmaktadır. Rijit üst yapıları yol kaplamaları literatürde farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bazı araştırmacılar en yaygın kullanılan rijit üst yapı tiplerinin sınıflandırmasını şu şekilde yapmıştır (Edis, 2007) ;

- Kalın plak kaplamalar,
- Lifli beton plak kaplamalar,
- Ön gerilmeli beton kaplamalar,
- Silindirle sıkıştırılan beton(SSB) kaplamalar,
- Kendinden yerleşebilen beton kaplamalar,
- Sürekli betonarme yol kaplamaları.

Bir başka sınıflandırma türünde ise rijit kaplamalar aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır. Mevcut uygulanmakta olan kaplama tipleri Şekil 2.8.'de verilmiştir (Pancar, 2008).

- Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar (URC),
- Derzli donatılı tipteki rijit üst yapılar (JRC),
- Sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar (CRCP),
- Kompozit donatılı tipteki rijit üst yapılar (CRC).



Şekil 2.8. Uygulamadaki kaplama tipleri (Yeğınobalı, 2009).

Beton yol kaplamaları yerleştirme ve sıkıştırma tekniğine bağlı olarak da sınıflandırılmaktadır. Bunlar (Zülkadiroğlu, 2006) ;

- Masterla yerleştirilen ve sıkıştırılan tipteki rijit üst yapılar,
- Silindirle yerleştirilen ve sıkıştırılan tipteki rijit üst yapılar.

2.3.2.1 Kalın plak kaplamalar

Kaplama ve temel tabakalarını, mevcut makine donanımı ile bir tek geçişte dökerek işlem sayısı azaltılmaktadır. Kalın plak uygulamalarında kaplamanın harekete karşı olan eylemsizliği artar. Derzlerde dingil yüklerinin aktarımı iyileşir. Betonun rötresi azalır. Isı değişikliklerine karşı duyarlılık düşer. Bileşimde tane boyutu daha büyük olan agrega kullanılarak, ince agrega ve çimento oranları azaltılabilir. Bu olanak; eğimi yüksek yol kesimlerinde ve dever uygulamalarında kolaylık sağlar. Beton üretimi, ulaştırılması, dökümü, serilmesi, sıkıştırılması tek işlemle yapılabildiği için yatırım maliyetlerinde önemli ölçüde düşüşe neden olur.

Zeminin geoteknik özellikleri ve günlük ortalama trafik değerleri, yapının belirlenmesinde önemli faktörleri oluştururlar. Zemindeki suyun neden olduğu erozyon, kaplamanın kalınlığının belirlenmesinde ve drenaj sisteminin projelendirilmesinde önemli rol oynar. Özellikle kaplama bünyesine girme potansiyeli yüksek olan yağış sularının, bu ortamı çabuk terk edebilmeleri için sisteme özgü drenaj önlemleri tasarlanmalıdır (Zülkadiroğlu, 2006).

2.3.2.2 Lifli beton plak kaplamalar

Çimento, agrega ve liflerden oluşan betona lifli beton denir. Lifler genellikle süreksiz ve beton içine homojen dağılmış olarak yer alır. Betonun takviye etmek için uygun biçimleri bulunmaktadır. Lifi tanımlayan en uygun parametrenin “boy / çap oranı” olduğu kabul edilmektedir. Bu parametre lif uzunluğunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle bulunur. Yol betonlarında en çok kullanılan lifler arasında yer alan çelik lifler, betonun eğilme direncini, çarpmaya dayanıklılığını, tokluğunu, yorulma direncini ve çatlamaya karşı direncini hissedilir düzeyde iyileştirmektedir. Betonun içine 4 cm uzunluğunda ve 0.4 mm çapında çelik tel parçaları konması durumunda, malzemenin çekme gerilmelerine karşı direnci artmakta, ayrıca betonun gevrekliği azalmaktadır (Edis, 2007).

2.3.2.3 Ön germeli beton kaplamalar

Yeterli bir ön gerilme işlemi uygulamak suretiyle, gerilmeler yönüyle homojen duruma getirilen beton plakda, ısı değışikliklerinden ve mekanik zorlamalardan kaynaklanabilecek çekme gerilmeleri oluşmamakta, bu sayede plak kalınlıklarının, taşıma gücü yüksek tabakalar üzerinde 12 – 15 cm'ye kadar düşürülebilmesi mümkün olmaktadır (Edis, 2007).

Ön germeli plak, dingil yüklerinin uygulanmasından önce plakda yatay yönde basınç gerilmelerinin oluşmasını sağlayan tek döşeme türüdür. Yapılan araştırmalar ve deneyimler, ön germeli plağın, en az iki konuda olumlu etkisinin bulunduğunu göstermiştir;

- Yol malzemeleri daha etkin ve ekonomik bir biçimde kullanılabilir.
- Daha az bakım ve onarım talebi, ayrıca daha uzun hizmet ömrü gibi olumlu sonuçları doğuracak olan, daha az sayıdaki derze gereksinim duyulmakta, ayrıca çatlak oluşum ve gelişme olasılıkları azalmaktadır (Edis, 2007).

Klasik beton plakda, tekerlek yüklerinden kaynaklanan gerilmelerin malzemenin elastik bölgesinde kalması gerektiğinden, kaplama kalınlığı, eğilme gerilmelerine veya betonun kopma – kırılma modülüne göre hesaplanmaktadır. Bu tasarım yaklaşımında plağın en üst ve en dibindeki liflerde çok farklı gerilme tür ve değerleri ortaya çıktığından malzeme, uygulanan yüklere göre tam ölçü ve biçimde kullanılamamaktadır. Bu olgu, malzemedен optimum düzeyde faydalanılamadığını göstermektedir (Edis, 2007).

2.3.2.4 Silindirle sıkıştırılan beton kaplamalar

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) normal betona göre su içeriği az ve işlenebilirliği yok denecek düzeyde olan, çok daha düşük çimento oranına sahip, titreşimli yol silindirleri ile sıkıştırılan ve kesikli(süreksiz) tane dağılımlı kırılmış agregadan üretilen bir beton yol karışımıdır.

2.3.2.5 Kendinden yerleşebilen beton kaplamalar

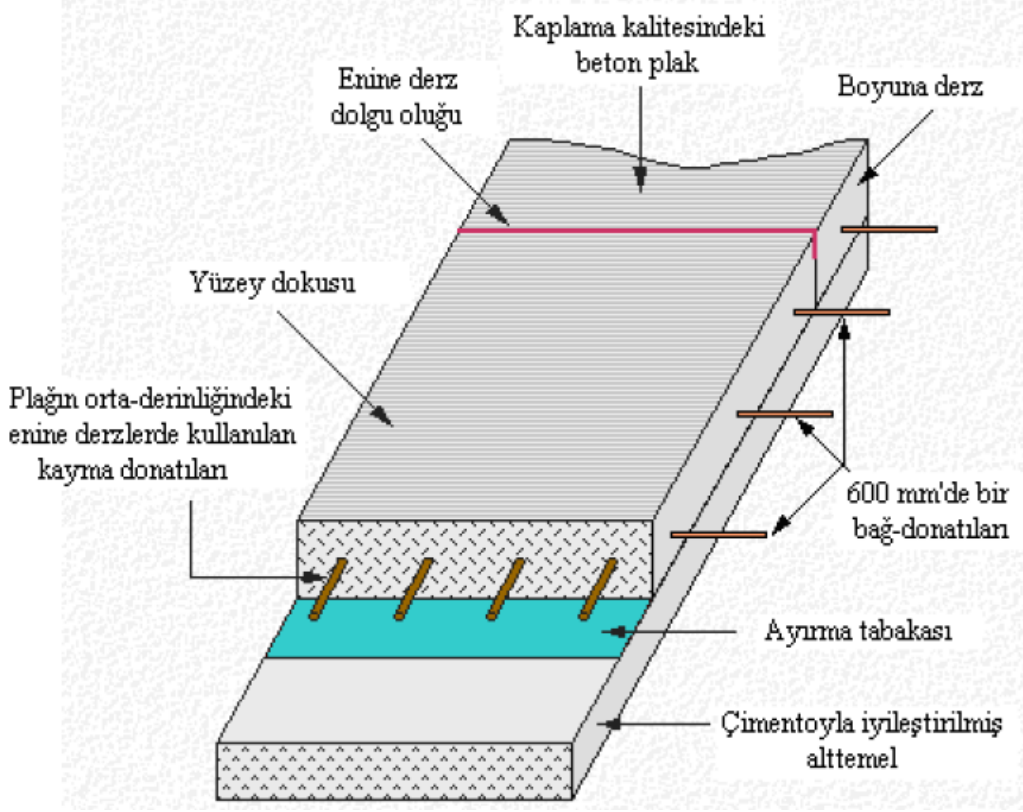
Katkı maddesiyle akışkan hale getirilmiş yüksek mukavemete sahip betonlardır. Bu betonların avantajları arasında; çok yüksek mukavemet, durabilite, şekil verilebilme kolaylığı, iş gücü azalması vb. sayılabilirken dezavantajları arasında küre karşı hassasiyet, rötne çatlaklarının çabuk oluşumu ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması sayılabilir. Bu betonların rijit üst yapılarda kullanılması henüz araştırılmamış bir konudur (Edis, 2007).

2.3.2.6 Sürekli betonarme yol kaplamaları

Sürekli betonarme yol tekniğinde çatlakların meydana gelmesini önlemek ve bunların açılacak derzlerle belirli ve arzu edilen yerlerde oluşmasını sağlamak yerine, çatlakların rastgele oluşmasına olanak tanır. Aynı zamanda meydana çıkacak çatlakların açılmaması ve yüklerin iletilmesi sürekli donatılarla temin edilir. (Ağar vd., 1998).

2.3.2.7 Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar

Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar, 3 - 6 m uzunluğunda kısa anolardan oluşur. Bloklar 125 - 350 mm kalınlığında olup donatı çeliği içermezler. Derzler zayıflatılmış yüzey kasılan tipte olup geçmeli veya geçmesiz olabilirler. Anolar genel olarak granüler malzeme, çimento veya bitümlü tabakalar üzerine inşa edilir. Zayıf beton ve sıkıştırılmış kaba agregadan inşa edilen temeller, halen bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Temel tabakası kalınlıkları 100 - 200 mm olabilir. Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılarda kısa derz aralığı, ano ortası çatlamayı asgariye indirmek ve derz açıklıklarını nispeten küçük tutmak için kullanılır. Aynı sebepten dolayı bağlanmış boyuna derzler de buna dahildir. Derzlerde bağlantı yükü transferinde, malzeme kenetlenmesinden yararlanır. Ağır trafik taşıyan yollarda, özellikle nemli bölgelerde, yük transferini geliştirmek için beton demirleri veya daha ziyade stabilize temel tabakası kullanılır. Gerek derzli donatısız tipteki gerekse derzli donatılı tipteki rijit üst yapılarda, plak ile alt temel arasındaki sürtünmenin azaltılarak orta açıklıktaki çatlamaların engellenebilmesi için bir ayırma membranına ihtiyaç duyulur (Şekil 2.9.) (Ecevit, 2007).

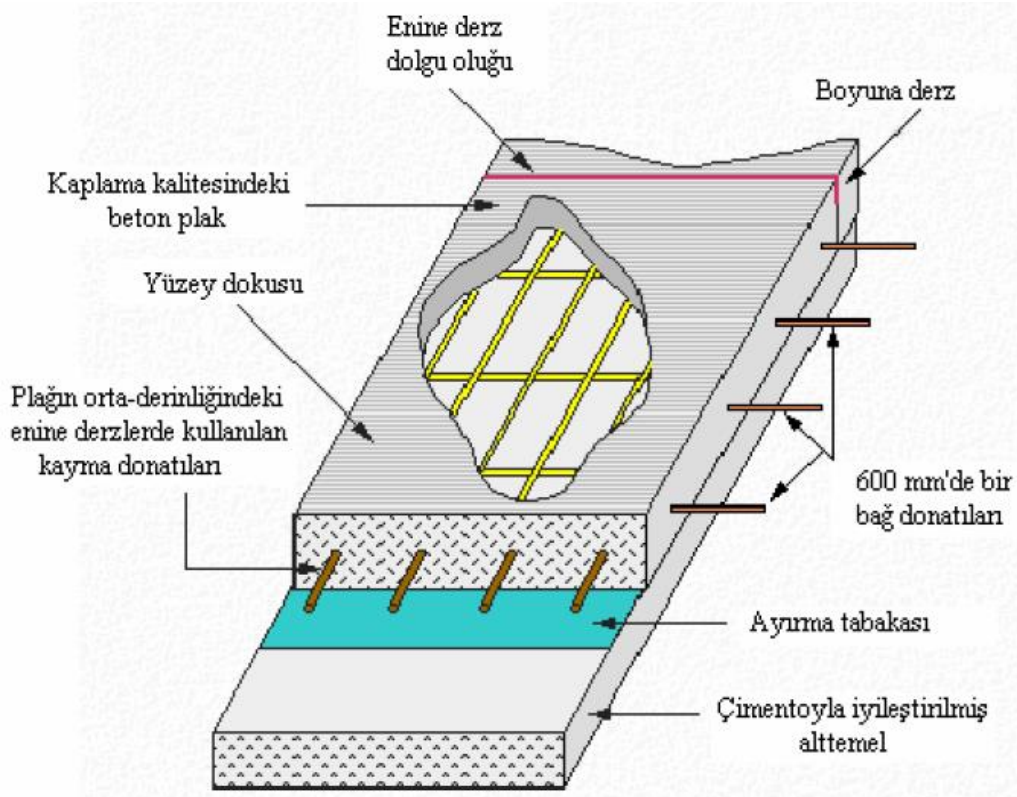


Şekil 2.9. Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar (Ecevit, 2007).

2.3.2.8 Derzli donatılı tipteki rijit üst yapılar

Derzli donatılı tipteki rijit üst yapılar, uzunlukları 8 m - 30 m'lik anolardan oluşur. Blok kalınlıkları 150 mm - 350 mm olup, ortalarında donatı çelik ağı geçmektedir. Temel tabakası kalınlığı 100 mm - 200 mm'dir. Daha uzun derz aralığı verildiğinde kurumadan dolayı büzülmeye ve ısıdan dolayı kıvrılmaya bağlı olarak bu tür kaplamada çatlaklar oluşur. Donatı çeliği kullanılmasının amacı da bu ano ortası çatlaklarının oluşmasını engellenmesidir. Çatlakları sıkı tutarak, yük transferinin sağlanması çelik tarafından yapılır. Burada çelik, beton bloğun esneklik kapasitesini artırmak için kullanılmamaktadır. Daha uzun derz aralığı kullanılması ayrıca daha büyük derz açıklıklarına neden olur. Dolayısı ile derzler arası yük transferini sağlamak için donatı çubukları kullanılır. Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar, donma ısısındaki bölgelerde ve nemli bölgelerdeki şehirlerarası yollarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Derzli donatılı tipteki rijit üst yapılar, enine derz aralıklarının artırılmasına olanak tanıyan donatılar dışında derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar ile benzerdir. Gerek derzli donatısız tipteki gerekse derzli donatılı tipteki rijit üst yapılarda, plak ile alttemel

arasındaki sürünmenin azaltılarak orta açıklıktaki çatlamların engellenebilmesi için bir ayırma membranına ihtiyaç duyulur (Şekil 2.10.) (Çetin, 2009).



Şekil 2.10. Derzli donatılı tipteki rijit üst yapılar (Çetin, 2009).

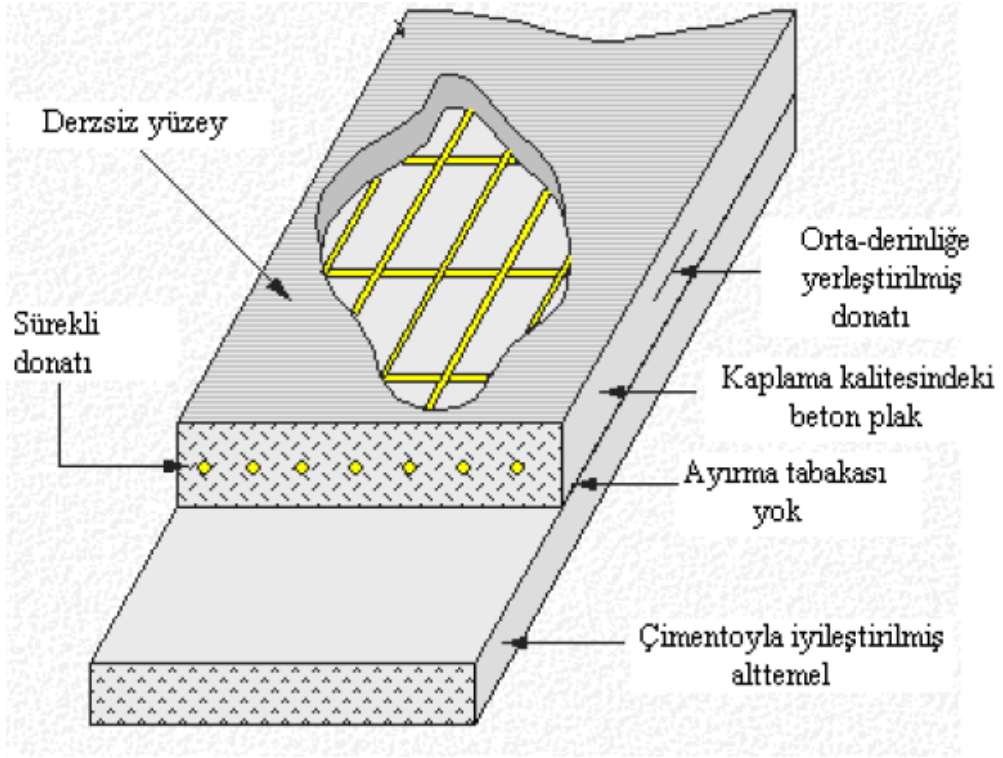
2.3.2.9 Sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar

Sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar, enine derzler olmaksızın döşenen beton bir plaktan oluşur. Yüksek donatı içeriği buna olanak tanır ancak diğer tüm betonarme yapılarda olduğu gibi, donatılar çatlakları önlemez sadece kontrol altında tutar. Çelik donatı plak boyunca sürekli olarak vardır ve derzler yalnızca hergün iş bitiminde konulur. Plak kalınlıkları 150 mm - 250 mm olur. Bu tür kaplamalarda derzli donatılı tipteki rijit üst yapılardan oldukça fazla çelik vardır. Genel olarak kesit alanının %5 - %7'i kadardır. Uzun derz aralıklarının bir sonucu olarak, bu tür kaplamalarda kaplama ömrünün ilk birkaç yılı boyunca 0.6 m -2.4 m'lik aralıklarla enine çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar plak içindeki donatı çeliği sağlam olduğu sürece sıkıca kapalı kalırlar. Eğer çelik yüksek çekme gerilmelerine karşı koyamayacak durumda ise, enine çatlaklar açılarak bozulabilirler. Uzunlamasına çatlaklarla birleşen bozulmuş çatlak bölgeleri, ciddi kaplama bozulmasına işaret eden, yüzeysel oyulmalara (zımbalama etkisi) yol

açabilir. Plak desteğini artırmak ve tekerlek yükleri altındaki ano gerilmelerini azaltmak için bu kaplama ile birlikte genellikle bir stabilize temel kullanılır. Bu kaplama türünün yaygın olarak kullanılmasına karşılık toplam beton kaplamaya oranı oldukça düşüktür. Derzli donatısız ve derzli donatılı tipteki rijit üst yapılarda görülen ayırma membranı, beton temel ile alt temel arasında daha yüksek bir düzeydeki sürtünmenin elde edilebilmesi için sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılarda çıkarılmıştır (Şekil 2.11.) (Ecevit, 2007).

Beton plaklar, tasarım aşamasında planlanan aralıklarla yapılacak enine ve boyuna derzlerle parçalara bölünmekte olup, bu çözüm geniş çatlakların ortaya çıkmasının bir dereceye kadar önlenmesini ve en önemlisi, plak süreksizliklerinin belirli yerlerde oluşmasını sağlar. Dingil yüklerinden kaynaklanan tekrarlı zorlamalar ayrıca iklim koşullarının sürekli değişimi derzlerin açılmasına, diğer taraftan geçirimsiz malzemelerle doldurulmuş olmasına rağmen, derz aralıklarından giren suların taban zeminine doğru sızmasına neden olur. İnce kum, şilt, kil gibi ufak taneli taban zeminleri sızan su ile doymuş duruma erişince, sık tekrarlanan ağır tekerlek yükleri etkisi ile su - zemin karışımı çatlak ve derzlerden hızla yukarı çıkar. 'Pompaj Olayı' adı verilen bu etki plak altındaki taban malzemesinin kaybı, kaplamanın kenar ve köşelerde desteksiz kalması ve direncinin kaybolması sonucunu doğurur. Derzlerle ayrılmış plaklarda kot farkları meydana gelir. Bakımsız kalmış ve dolayısıyla geçirimsizliğini kaybetmiş derzlerde belirlenen diğer bir sakıncalı durum da, donatıların paslanarak belli bir dönem sonunda dirençlerini kaybetmeleridir. Diğer taraftan plak yüzeyinde kaçınılmaz bir süreksizlik yaratan derzlerin seyir konforunu azalttığı, yapılan gözlem ve deneylerden, taşıt lastiklerinde hızlı aşınmaya yol açtığı belirginlik kazanmıştır. Anılan bütün bu sakıncaların giderilmesi amacıyla geliştirilen sürekli (derzsiz) betonarme yol tekniğinde çatlakların meydana gelmesini önlemek veya bunların belirli ve arzu edilen yerlerde oluşmasını sağlamak yerine, çatlakların rastgele oluşmasına olanak tanınır. Ancak karşılığında meydana çıkan çatlakların açılmaması ve yüklerin iletilmesi sürekli donatılarla temin edilir. Bu amacın yerine getirilmesi için donatı kesitinin çeliğin elastik limitini ile çarpılması sonucu elde edilen değer, kopma gerilmesinde çalışan beton keskindeki çekme değerinden yüksek olması gerekecektir. Tasarım hesapları, bu sonuncu durumun temini için beton kesitinde yaklaşık %0.67 oranında donatı kullanılması gerektiğini göstermektedir. Yol yapılarında olduğu kadar, hava alanları

pistlerinde de sürekli betonarme üstyapıların başarıyla kullanılması mümkün olmaktadır (Edis, 2007).



Şekil 2.11. Sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar (Edis, 2007).

2.3.2.10 Kompozit donatılı tipteki rijit üst yapılar

Beton yol inşaatlarında sürekli donatılı tipteki gibi dizayn edilen rijit üst yapının üzerine beton asfalt kaplama yapılması ile oluşturulurlar. Rijit üst yapının ağır yük taşıyabilme kapasitesi özelliği ile beton asfalt kaplamasının sürüş kalitesi özelliği bir araya getirilerek kullanılmaktadır.

BÖLÜM III

SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KAPLAMALAR

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 silindire sıkıştırılmış beton (SSB / RCC(Roller Compacted Concrete)), dayanıklılığı, ekonomikliği ve hızlı yerleştirme tekniği ile son zamanlarda tüm dünyanın ilgisini çekmiş özel bir beton türüdür (Üte, 2008).

SSB, 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 (Atiş, 2001).

SSB'nin geniş alanda kullanılması, özel bir ekipmana gereksinme duyulmamasından ve beton asfalt kaplamalarının yapıldığı makinelemlerle inşa edilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte; yapım kolaylığı, çalışan eleman sayısını azaltması ve yüksek üretim hızı ve bunlara bağlı olarak maliyetin düşmesi de büyük oranda kullanılmasının nedenleri olarak sıralanabilir. Ayrıca, RCC kaplamalar, geleneksel beton kaplamalara göre daha kısa bir sürede trafiğe açılabilir (Edis, 2007).

RCC'ler geniş kullanım alanına sahip olup, barajlarda kullanılan RCC'ler üç ana grupta toplanabilirler;

- Düşük Dozajlı RCC'ler

Bunların bağlayıcı dozajı 100 kg/m^3 den azdır, bağlayıcının % 40'ı puzolan ve özellikle F tipi uçucu küldür, barajın çekirdeğinde 30 cm kalınlıklı tabakalar halinde serilip sıkıştırılırlar.

- RCC Baraj Betonu

Daha ziyade Japonya'da uygulanan konservatif bir uygulama şeklidir. Beton 70 cm - 100 cm'lik tabakalar halinde mono blok olarak sıkıştırılır, daha sonra memba mansap

yönünde kesilerek derzlendirilir. Bağlayıcı dozajı 120 kg/m^3 - 130 kg/m^3 arasındadır ve bunun % 20 - % 35'i F tipi uçucu küldür. Barajın orta kısmındaki bu beton üstten 2 m - 3 m kalınlığında olan ve dalıcı vibratörle sıkıştırılmış normal betonla korumaya alınır (Jofre, 1993).

- Yüksek Hamur İçerikli RCC

En yaygın uygulama bulan türüdür. Beton hava boşluğu en alt düzeydedir ve katmanlar arasındaki aderans, ilave bir işleme gerek kalmadan sağlanır. Bağlayıcı dozajı 150 kg/m^3 'ten fazladır, puzolan yüzdesi % 70 - % 80'dir. Yapı hacminin küçültülmesi ve kullanılan malzemenin ucuzlaması, işçiliğin kolaylaşması ve zamanın kısılması büyük ekonomi sağlamaktadır. Çok kaba olarak bu ekonomi RCC için % 50'lere varmaktadır. (Topçu, 2006).

SSB kaplamalar, geleneksel beton kaplamalara göre yeni bir beton kaplama türü olup, karıştırılması, serilmesi ve sıkıştırılması, beton asfalt kaplamalarda kullanılan benzer teknikler kullanılarak yapılmaktadır (Edis, 2007).

SBB kaplamalarda kullanılan SSB'ler geleneksel betona göre çok daha düşük çimento oranına sahip olup, daha kuru kıvamdadır(sıfır çökme). Düşük çimento dozajı nedeniyle ekonomik bir beton olduğundan, yol ve baraj inşaatları gibi kütle betonları için uygundur (Baradan vd., 2012).

SSB'ye "Rolkrit"de denilmekte olup, rolkit "Roller Compacted Concrete" kelimelerinin kısaltılmış halidir. Amerika Beton Enstitüsü (ACI), rolkit'i sertleştirilmemiş durumunda silindirler tarafından sıkıştırılmış beton olarak tanımlar. Çünkü düşük çimento dozajları ile üretilen bu betonlar, hiç çökme vermeyen ve titreşimli yol silindirlerini taşıyabilecek kadar kuru ve bu araçlarla sıkıştırıldıklarında alt tabakalarına yapışacak kadar nemlenen betonlardır. Bunların taşınmasında ve serilmesinde damperler ve dozerler kullanılır (CAC 2002a).

Bir başka tanımlamaya göre de silindirle sıkıştırılan yol kaplama betonlarına kuru yoğun beton(betonpact) denilmektedir. Betonpact; kesikli(süreksiz) tane dağılımı, kırılmış agrega, priz geciktirici(ayrıca mümkün olduğu takdirde akışkanlaştırıcı) katkı maddeleri, düşük su / çimento oranı kullanılan bir beton yol karışımıdır (Ağar vd., 1998).

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 vd., 2002).

Sertleştirilmiş RCC'nin özellikleri tümüyle yerleştirilmiş betonunun özellikleri ile aynıdır. Öyle ki RCC genelde yerleştirilmiş betonun tipik işlem özelliklerinin dışında sertleştirme özellikleri ile yapılır. Rolkrit veya silindirlenmiş beton terimleri bu konu için daha fazla kullanılır (Topçu, 2006).

RCC kaplamalar, geleneksel beton kaplamalara göre yeni bir beton kaplama türü olup, karıştırılması, serilmesi ve sıkıştırılması, beton asfalt kaplamalarda kullanılan benzer teknikler kullanılarak yapılmaktadır. Geleneksel beton kaplamalara göre daha düşük su / çimento oranına sahip olan RCC kaplamalar, bitümlü kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınabilmekte, serilebilmekte ve sıkıştırılabilmektedir. RCC kaplamalar genellikle çift tamburlu titreşimli silindir ile sıkıştırılmaktadır. RCC ismini, kaplamanın yapım yönteminden almaktadır. Bu yapım tekniği kullanılarak, büyük miktarda beton, donatısız olarak yerleştirilmektedir. RCC kaplamaların maliyeti, geleneksel beton kaplamalardan % 10 ile % 30 arasında daha düşüktür. RCC 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 (Edis, 2007).

RCC göçme olmayan betonların aplikasyonunun uygulanması için taşınabilir, yerleştirilebilir, zemin ve kayalık yerlerin yapımında kullanılan aletlerin sıkıştırmasıyla kullanılabilir. İdeal RCC projeleri büyük yerleşim alanları, küçük veya donatısız alanlar, küçük veya gömülü metal işleri ve küme gibi projeleri içerir. RCC uygulaması diğer yapım yöntemlerine göre ekonomik olarak daha uygun olduğundan kullanılır. Büyük yastık işleri, radye temel, asfaltlanmış alan, yekpare açılmış temeller, temel tabaka, batardo, yekpare dolgu, acil onarımlar için uygulanır. Ayrıca beton ağırlık barajlarında da kullanılabilir. Bunun dışında yol kaplaması olarak da kullanılabilir (Topçu, 2006).

RCC yapım teknikleriyle yapılan RCC ağırlık barajları, olağan beton ve toprak set barajlara göre fiyat ve hızlı yapım v.b. nedenlerden ötürü ekonomik açıdan rekabet

sağlarlar. Ayrıca, RCC'nin düşük dayanımlı olması sebebiyle daha az çimento ve derecelendirilmemiş (dolayısıyla daha ucuz) agrega kullanılabilir. Buna ek olarak, düşük dayanımlı RCC'de çatlak oluşumu yüksek dayanımlı betonlara göre daha düşüktür. Kalınlığın artması da dayanımını arttırmaktadır. Böylece, bakım maliyetleri düşük bir yol kaplaması üretilebilir. RCC malzemelerinin geleneksel beton malzemesine göre daha ucuz olması ve düşük kalınlıklarda yapılması, ekonomik açıdan büyük avantajlar kazandırmaktadır (Keifer, O., 1988).

RCC hafif, orta ve ağır trafiğe sahip yol üst yapılarında kullanılabilir niteliğe sahiptir. Trafikten kaynaklanan zorlamaların artması durumunda bu tür kaplam yüzeyinin bir bitümlü yüzeysel kaplama ile örtülerek takviye edilmesi uygun olmaktadır (Ağar vd., 1998).

3.1 Silindirle Sıkıştırılan Betonların Tarihçesi ve Uygulamaları

İlk geleneksel beton kaplama, 1865 yılında İskoçya'da inşa edilmiştir. Aradan yaklaşık 50 yıl geçtikten sonra, 1910'lu yıllarda bir çok ülkede silindirle sıkıştırılan beton kaplamalar yapılmıştır. 1930'lu yıllarda inşaat mühendisliğinin bir çok alanında, sıkıştırmalar titreşim uygulanarak yapılmasına karşın, titreşimli sıkıştırma kadar iyi kalite sağlayabilecek silindir bulunmadığı için, sıkıştırmada silindir kullanılmamıştır. Silindir, yalnızca çimento içeren temel tabakalarının yapımında kullanılmıştır (Edis, 2007).

Silindirle sıkıştırılmış betonun uygulamasının 2. Dünya Savası'nın öncesinde başladığı bilinmektedir. O zamanlarda hava alanları apronları ve otoyolların temelaltı tabakasını kuvvetlendirmek amacıyla kullanılan silindirle sıkıştırılmış beton uygulamasının izine daha sonra 1964 yılında İtalya'da yapılan bir baraj inşaatında rastlanmıştır (Edis, 2007).

1970'li yıllardaki petrol krizi nedeniyle bitümlü bağlayıcı fiyatlarının yükselmesi, SSB kaplamalarının gündeme gelmesini sağlamıştır. SSB kaplamaların bilinen ilk modern örneği 1970 yılında, İspanya'da, düşük hacimli trafiğe sahip olan bir yolda uygulanmıştır. Ağır taşıt trafiğini taşıyan diğer bir SSB kaplama uygulaması da 1976 yılında Kanada'da yapılmıştır (Topçu, 2006).

Petrol krizi sonucu yol betonu ile ilgilenen kuruluşlar, bir taraftan bitümlü bağlayıcılarda tasarruf sağlamak için yeni yöntemlere yönelirken, diğer taraftan malzeme için gerçekleştirilen yatırımları en aza indirmeye çalışmışlardır. Bu düşünce ile 1975'te Fransa'da elde mevcut olan ve bitümlü kaplama üretimi için kullanılan makine parkı ile çimento betonu kaplamaların üretim olanakları aranmaya başlanmış ve betonpact adı verilen beton türü geliştirilmiştir. Makine parkında yer alan finişer ve greyderlerin yeni tekniğe uyarlanabilmesi için aşağıda belirtilen üç ana konu hedeflenmiştir;

- Beton kıvamı, nemli toprak kıvamını sağlayabilecek şekilde değiştirilmesi,
- Şantiyedeki organizasyon aksamalarını karşılayabilmek için yeterli işlenebilirlik düzeyi ve gecikmelere uygun priz süresinin dikkate alınması,
- Platformu kısa sürede trafiğe açabilmek amacıyla yeterli taşıma gücünün çabuk elde edilmesi.

Bu hedeflere erişebilmek için kuru yoğun botonda, tane dağılımı, dozaj, katkı maddeleri ve su / çimento oranları konusunda araştırmalar yapılmıştır. Sonuçta kesikli(süreksiz) tane dağılımı, kırılmış agrega, priz geciktirici(ayrıca mümkün olduğu takdirde akışkanlaştırıcı) katkı maddeleri, 330 kg dozajlı NPC 32.5 çimentosu ve düşük su / çimento oranı kullanımıyla güvenilir bir beton yol karışımı elde edebileceği gösterilmiştir (Ağar vd., 1998).

Ancak tamamı SSB tekniği ile inşa edilen ilk baraj ABD'nin Oregon eyaletinde 1982 yılında inşasına başlanan Willow Creek Barajı olmuştur (Fotoğraf 3.1.) (Edis, 2007).



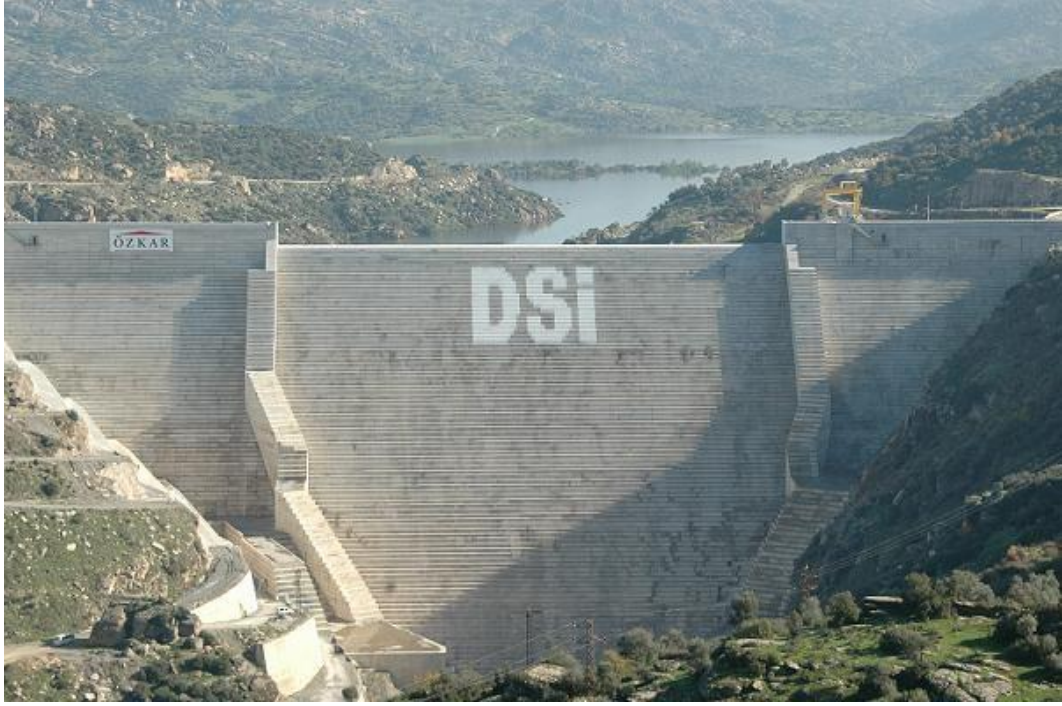
Fotoğraf 3.1. Willow Creek Barajı (Edis, 2007).

Ülkemizde ilk SSB uygulaması 1980'li yılların başında Karakaya Barajı memba batardo inşaatında olmuştur. Daha sonra Atatürk Barajı, Sır ve Berke Barajlarının bazı kısımlarında uygulanmıştır (Baradan vd., 2012).

Sıkıştırılmış beton; hızlı inşa edilebilir, sağlam ve devamlı bir beton olarak kullanıldığı baraj inşaatı teknolojisinden yararlanmıştır. 1985 senesinden 1990'lı yılların sonuna dek geçen zamanda silindirle sıkıştırılmış beton kullanılarak inşa edilen veya edilmekte olan 15 m.'den yüksek baraj sayısı 7'den 160'a yükselmiştir. Günümüzde baraj inşasında silindirle sıkıştırılmış beton bütün dünyada kabul edilir bir yöntem olmakla beraber yoğunlukla uygulanan ülkeler Japonya, A.B.D., Brezilya ve İngiltere'dir (Çetin, 2009).

1980 yılından sonra, Fransa, Almanya, Norveç, İsveç, Finlandiya, Danimarka, Avusturya, Arjantin ve Japonya gibi ülkelerin her birinde 100.000 m² den fazla SSB kaplamalı yol inşa edilirken, Şili, Uruguay, Meksika, Kolombiya, Ekvator ve Güney Afrika gibi ülkelerde çok az veya deneme yolu olarak kullanılmıştır. Uygulanan SSB kaplamalı yol miktarı 1990 yılının sonunda toplam 12.000.000 m² yi aşmış olup SSB uygulamasının yarısı İspanya'da yapılmıştır. Otoyollarda kullanılan 1.500.000 m² SSB kaplamalı yol üzerine, yüzey düzgünlüğünü sağlamak için beton asfalt aşınma tabakası yerleştirilmiştir. Geriye kalan 10.500.000 m² SSB kaplama, ikinci sınıf yol, sanayi ve askeri alanlar gibi düşük hızlı trafiğin olduğu yerlerde kullanılmıştır (Sua, N. vd., 2001).

Ülkemizde ilk SSB gövde dolgulu baraj 2010 yılında tamamlanan, Aydın İli'nde Çine Çayı üzerindeki Çine Adnana Menderes Barajı'dır (Fotoğraf 3.2.) (Baradan vd., 2012).



Fotoğraf 3.2. Çine Adnan Menderes Barajı (Flasmedya, 2013).

3.2 Karışım Bileşim Oranlarını Saptama Yöntemleri

Kıvam testlerini içeren SSB’de karışım oranlarını belirleme yöntemleriyle; su oranı, bağlayıcı malzeme oranı veya agrega oranı gibi karışım parametreleri belirlenmektedir. Daha sonra da serme ve sıkıştırma için gerekli olan kıvamı elde edebilmek için parametrelerden biri değiştirilmektedir. Geleneksel beton ve RCC’nin bileşim oranlarını saptama işlemleri aynıdır. Karışım bileşim oranlarını saptama işlemlerindeki küçük farklar, taze RCC’nin kıvamının yüksek olmasından, geleneksel granülometri dışında granülometri kullanılmasından ve sıkıştırma işlemlerinden kaynaklanmaktadır. RCC’nin, geleneksel betondan farklı özellikleri;

- RCC, hava kabarcıklı beton değildir,
- Düşük su oranına sahiptir,
- Düşük çimento ve uçucu kül oranına sahiptir,
- RCC’de ince agrega oranı yüksektir,
- Çimento ile karıştırılmış granül malzeme için kullanılan su oranı, kuru karışımın ağırlıkça % 4.5 ile % 6’sı arasındadır.

RCC'lerde su oranını belirlemek için iki yaklaşım kullanılır. Geliştirilmiş Proktor Testi veya Kango Titreşimli Çekiç ile değişik su oranlarına sahip numuneler sıkıştırılarak hazırlanır. RCC'nin yoğunluğu ve su oranı arasındaki ilişki saptanır (Jofre, C., 1993).

En uygun su oranı, su - yoğunluk eğrisinde, maksimum yoğunluğu veren su oranıdır. Kıvam testlerinden biri olan geliştirilmiş vibrasyon testiyle (geliştirilmiş VeBe testi) en uygun işlenebilirlik bulunmaktadır. Geliştirilmiş vibrasyon testinde taze malzeme üzerine yük konularak titreşim uygulanmaktadır. Bilindiği gibi vibrasyon metodunda kıvam ölçüsü, betonun tam olarak oturması için saniye olarak geçen titreşim süresidir. Laboratuvar çalışmaları, 22.7 kg yük altında, geliştirilmiş vibrasyon sürelerinin 30 - 40 saniye olduğunu, bununda RCC kaplama karışımlarına uygun olduğunu göstermiştir. Geleneksel vibrasyon testinde malzeme üstüne yük konulmamaktadır, RCC karışımlarında su oranı düşük olduğu için üzerine yük yerleştirilmektedir. Kıvam testlerinde kullanılan cihazlardan bazıları, numune yapımında veya su oranı - yoğunluk eğrisini elde etmek için de kullanılmaktadır. Proktor testi gibi sıkıştırma testlerinde, sıkıştırma darbe ile yapıldığından malzemeler zarar görebildiği halde, kıvam testleri kullanıldığında malzemeler zarar görmemektedir (Keifer, 1988).

SSB'un sıkıştırılabilirlik özelliği; karışımın serbest su içeriği, çimento ve puzolan içeriği, kum miktarı, maksimum agrega çapı, agrega dane boyut dağılımı ve kullanılan katkıların özellikleri gibi karışım parametrelerinden etkilenir. Bunlardan sıkıştırılabilirlik derecesini en fazla etkileyen parametre karışımın serbest su içeriğidir. Karışımın su miktarı optimum seviyenin üzerine çıktığında, işlenebilirlik artar, ancak bu kez de titreşimli silindirin ağırlığının etkisine serilen beton tabakası mesnet oluşturacak kadar rijit olmaz. Bu nedenle karışım mümkün olduğunca kuru kıvamda ayarlanmalıdır. SSB karışımlarının çok kuru kıvamından dolayı, çökme deneyi ile ölçülebilen bir çökme değeri yoktur. İşlenebilirlik düzeyi VeBe Deneyi gibi kurur kıvamlı beton karışımları için uygun olan bir deney yöntemi ile belirlenebilir (ACI 309.5R-00, 2000; ACI 207.5R, 1988).

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

- Optimal hamur hacmi metodu,

- Katı askı modeli,
- Zemin sıkıştırma metodu,
- 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 325.10R, 1995; PCA, 2006).

Geleneksel beton ve SSB kaplamaların karışım örnekleri Çizelge 3.1.'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Geleneksel beton ve SSB kaplamalar için hazırlanmış karışım örneği (Edis, 2007).

Beton Cinsi	Maks. Tane Boyutu (mm)	Su/Çimento Oranı (%)	Kullanılan Malzeme (Kg/m ³)				Ağırlıkça Çimento Oranı (%)
			Su	Çimento	Kaba Agr.	İnce Agr.	
SSB	20	0.406	104	256	1,241	936	10.6
Geleneksel Beton	40	0.425	138	325	1,341	599	14.5

3.2.1 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).

3.2.2 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 yoğunluğu kullanarak, kuru bileşenlerin arasındaki boşlukları dolduracak yeterli su miktarı kolayca hesaplanabilmektedir (PCA, 2006).

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).

3.2.3 Zemin sıkıştırma metodu

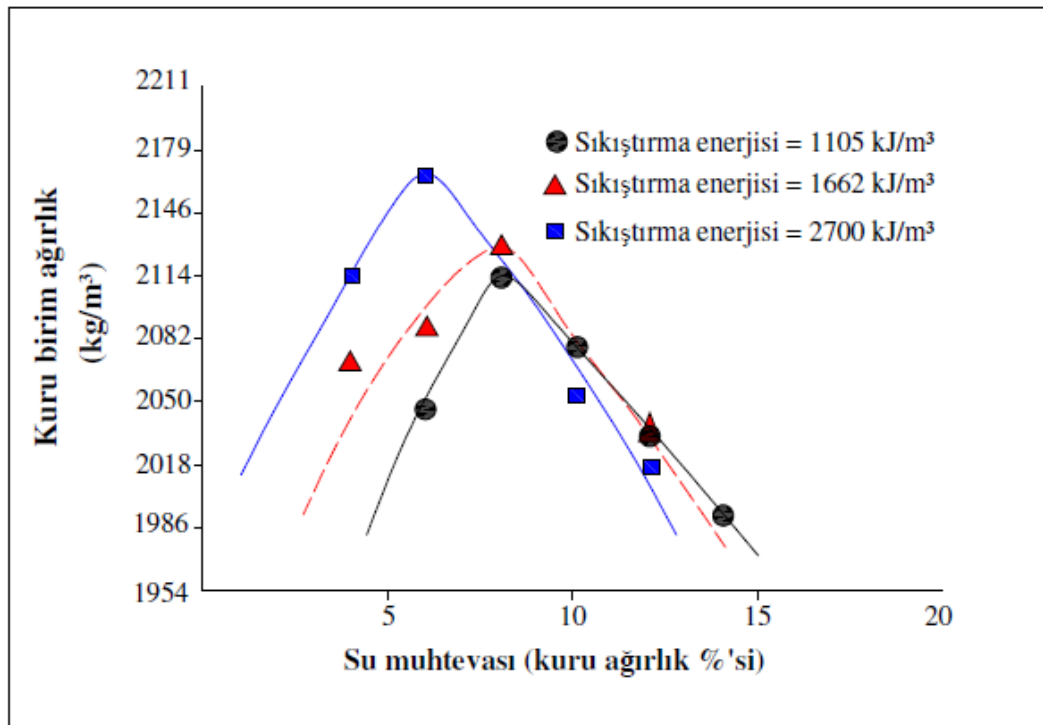
Bu metot, maksimum tane çapının daha küçük ve bağlayıcı dozajının daha yüksek olduğu SSB yol kaplamaları karışımları için daha uygundur (ACI 207.5R, 1988).

Bu oranlama metodu, SSB karışımının su muhtevası ile yoğunluğu arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu metotta Standart Proktor testi veya Modifiye Proktor testi 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).

Su, zemin taneleri arasında yağ görevi görmekte ve sıkıştırma işlemi sırasında tanelerin birbirinin üstünden kayarak daha sıkı bir şekilde yeniden düzenlenmelerine yardımcı olmaktadır. Modifiye Proktor testinden tipik sıkıştırma eğrisi (su muhtevası - maksimum kuru birim hacim ağırlık eğrisi) elde edilmektedir (PCA, 2006).

SSB'nin sıkıştırma test sonuçlarından elde edilen su muhtevası ile sıkıştırma enerjisinin sıkışmış yoğunluğa etkisi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. SSB karışımları için tipik su muhtevası – kuru birim ağırlık eğrisi (ACI 207.5R, 1988).

Şekil 3.1.'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 (ACI 207.5R, 1988).

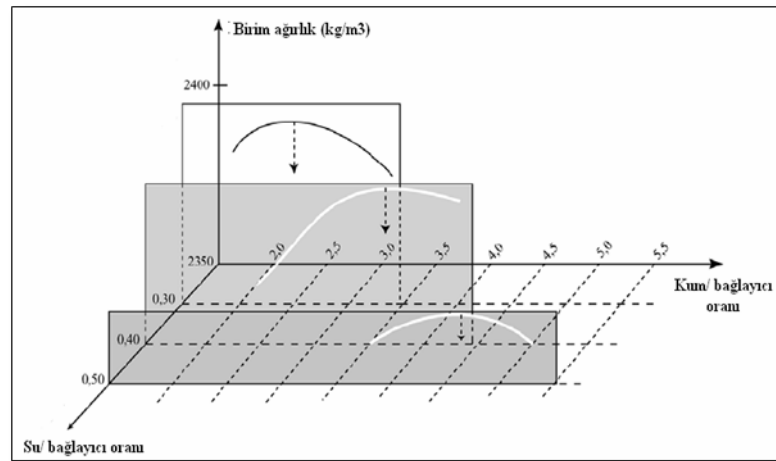
Bu metotta; ilk aşama olarak SSB karışımının hacimce %90'ını ince ve iri agregalar oluşturduğundan yoğun, iyi gradasyonlu ve Çizelge 3.4.'de belirtilen aralıklara uygun

agrega seçilmektedir. 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 ; PCA, 2006).

Geleneksel betondan farklı olarak SSB karışımlarında su / bağlayıcı malzeme oranı ana dizayn faktörü değildir. Su içeriği, SSB karışımlarının maksimum sıkışma yoğunluğuna, proje kriterlerine ve karışımda kullanılan kimyasal katkıya bağlıdır. Su muhtevası (W), genellikle karışımdaki toplam katı miktarının ağırlıkça yüzdesi cinsinden ifade edilmektedir (PCA, 2006).

3.2.4 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 3.2.'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 3.2. SSB için optimum harç parametreleri (Gauthier and Marchand, 2005).

3.3 Silindirle Sıkıştırılan Betonlarda Kullanılan Malzemeler

RCC’de geleneksel betonlarda kullanılan kaba ve ince agregalar, çimento, uçucu kül, katkı maddeleri ve su kullanılmaktadır (Topçu, 2006).

SSB’nin dayanımı esas olarak agrega kalitesi, sıkışma derecesi ile çimento, puzolan ve su miktarlarına bağlıdır (Koçak, 1998).

SSB ve geleneksel beton kaplaması üretiminde kullanılan malzemeler Çizelge 3.2.’de karşılaştırılmıştır (Luhr, 2008).

Çizelge 3.2. SSB ve geleneksel beton kaplaması üretiminde kullanılan malzemelerin karşılaştırılması (Luhr, 2008).

	Mutlak Hacim	
	SSB	Geleneksel Beton Kaplama
Bağlayıcı	% 9	% 10
Su	% 10	% 15
İnce Ağrega	% 34	% 23
İri Ağrega	% 44	% 46
Hava	% 3	% 6
Toplam	% 100	% 100
Çimento Hamuru	% 22	% 31
W/C Oranı	0.35	0.48
İnce Ağrega Oranı	0.44	0.33

US Army Corps of Engineers [USACE] (2000), tarafından pek çok SSB yol kaplamalarında kullanılmış olan karışım dizaynları Çizelge 3.3.’de gösterilmiştir (Delatte vd., 2003).

Çizelge 3.3. 1 m³ SSB yol kaplaması için karışım dizayn örnekleri, (Delatte vd., 2003)

Yer	Tip-1 çimento (kg)	Uçucu kül (kg)	Su (kg)	S/B oranı	Kaba agregası (kg)	İnce agregası (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

3.3.1 Çimento

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. Bağlayıcı malzeme tipinin hidrasyon hızı ve dayanım gelişmesi üzerinde önemli etkisi vardır (Koçak, 1998).

RCC'de Tip I (normal tip) ve Tip II (sülfata direnci arttıran) Portland Çimentosu kullanılmaktadır. Çalışma süresinin kısa olması gereken yerlerde erken priz yapan Tip III çimentolarının kullanılması önerilmektedir. Çimento oranı, kuru karışım toplam ağırlığının % 10 - % 17'si arasında olup m³'de 300±30 kg kullanılmaktadır (Malisch, 1988).

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 (PCA, 2006).

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 kg/m³ - 350 kg/m³ 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).

Koçak'a (1998) göre, çoğu SSB karışımlarının başlıca gereksinimlerinden birinin yeterli hamur hacmi sağlayarak agrega daneleri arasındaki boşlukları doldurmak olduğunu belirtmiştir. Aksi takdirde, karışımda hapsolmuş hava içeriğinin artacağını, agregaların ayrışacağını, betonun sıkışmasında zorluk çıkacağını bunun ise düşük dayanıma, katmanlar arasında aderans kaybına, dolayısıyla sızıntılara sebep olacağını belirtmiştir.

Bağlayıcı (çimento+uçucu kül) malzemelerin % 25 ile % 40'ını C veya F sınıfı uçucu küller meydana getirmektedir. Fransa ve İspanya'da birbirine karıştırılmış çimentolar (blended cement) kullanıldığı gibi, çimento ve uçucu kül karışımı kullanılmaktadır. Uçucu kül içeren çimentolar geleneksel Portland çimentosundan ucuzdur ve priz işlemini belirgin şekilde geciktirmektedir. RCC'de sülfata direnci arttıran Portland Çimentosu kullanılmaktadır (Topçu, 2006).

3.3.2 Agregas

Diğer beton türlerinde olduğu gibi, RCC'nin ekonomikliğini ve kalitesini belirlemedeki en önemli faktörlerden biri, uygun agrega kaynağının seçilmesidir. RCC kaplama karışımlarının hacminin %70 - %80'ini agregalar oluşturmaktadır (Topçu, 2006).

Kullanılan agregaların kalitesi SSB'nin sertleşmiş haldeki performansını etkiler. Fiziksel olarak kusurlu, zayıf agregalar ağır sıkıştırma yükü altında kırılıp dağılırlar. Ancak, SSB karışımları uygun gradasyona sahip olmayan agregalarda bir ölçüye kadar üretilebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, SSB agrega gradasyonuna normal betona göre daha az hassas bir beton türüdür (Baradan vd., 2012).

Kaba agrega; kırılmış veya kırılmamış çakıl, yeniden kullanılan beton, kırmataş veya karışımından oluşmaktadır. Kırmataş veya kırılmış çakıldan yapılmış RCC'lerin sıkıştırılması, yuvarlak çakıldan yapılmış RCC'lerden daha zor olmasına karşılık, taşıma ve yerleştirme sırasında daha az ayrışma ortaya çıkmaktadır. 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 dayanım azalmaktadır. Bu yüzden karışımda kullanılacak kumların su emme kabiliyeti ve özgül ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir (Edis, 2007).

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 3.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4.'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).

Çizelge 3.4. 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

RCC ve geleneksel betonda kullanılan agregalar arasındaki en önemli farklılıklardan biri agregada gradasyonudur. RCC'de maksimum tane boyutunun 25 mm veya daha az olduğu görülmektedir. Ayrışmalardan sakınmak, karıştırma işlemini kolaylaştırmak ve yüzey düzgünlüğünü sağlamak amacıyla tane boyutu yüksek seçilmemektedir. Bazı ülkelerde, ince ve kaba agregada bileşimlerinin gradasyon sınırları belirlenmiştir. Fransa ve İspanya'da kabul edilen gradasyon eğrileri bağlayıcıları da (çimento+uçucu kül) kapsamaktadır. İspanya'da kullanılan iki farklı maksimum tane boyutu için agregada granülometri sınırları Çizelge 3.5.'de görülmektedir (Topçu, 2006).

Çizelge 3.5. Agregalar ve bağlayıcıların granülometri sınırları (Malisch, 1988).

Elek boyutu	Elekten geçen, %	
25 mm	100	100
20 mm	100	85-100
16 mm	88-100	75-100
10 mm	70-87	60-83
5 mm	50-70	42-63
2 mm	35-50	30-47
400 µm	18-30	16-27
80 µm	10-20	9-19

Yeni sıkıştırılan malzemede yeterli kararlılığı sağlamak için büyük miktarda kırılmış malzeme kullanılmaktadır. Agregalar en azından iki grubun karışımından oluşmalıdır; örneğin 0 mm - 5 mm ve 5 mm - 20 mm. Kaplama düzgünlüğü fazla önemli değilse, kaba ve ince agregalar önceden harmanlanıp tek bir grup olarak depolanabilmektedir. Takviye tabakası çalışmalarında, agregalar seçimindeki en önemli faktör, karışım sıkıştırıldığı anda yüksek iç dayanıma ulaşabilme yeteneğidir. RCC, fazla gecikmeksizin trafığa açılabilir. Kararlılık anlık taşıma gücü testi ile ölçülmektedir. Test, CBR testinde kullanılan aynı ekipmanlarla, yeni sıkıştırılmış numuneler üzerinde uygulanmaktadır. Anlık taşıma gücü indeksi 65'in üzerinde çıktığında, RCC'nin yeterli kapasiteye sahip olacağı ileri sürülmüştür. Kırılmış kaba agregalar kullanıldığında, bu sınır belirgin bir şekilde aşılmaktadır (Malisch, 1988).

İnce agregalar miktarı, su miktarı kadar olmasada karışımın sıkıştırılabilirliğini etkiler. İnce agregalar miktarı geleneksel beton karışımlarına göre daha fazla olan SSB karışımlarının, döküm sırasında ayrılmaya karşı daha hassas olduğu belirtilmektedir (ACI 309.5R-00, 2000).

Murphy (1987), Avustralya'da üretilen SSB'lerin gradasyonunda 200 no.lu elekten geçen malzeme miktarının ağırlıkça %5 ile %10 arasında olduğunu belirtmiştir. Piggott (1986), Kanada'da üretilen SSB'lerin gradasyonunda maksimum tane çapı 19 mm olan iyi gradasyonlu agregaların kullanıldığını, 200 nolu elekten geçen malzeme miktarının ağırlıkça %2 ile %14 arasında olduğunu belirtmiştir. Jofre vd. (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 nolu elekten geçen malzeme miktarının ağırlıkça %10 ile %20 arasında olduğunu belirtmiştir (Ludwig vd., 1994).

Agregaların maksimum tane çapı, SBB'lerin sıkıştırılabilirliğini etkileyen parametrelerden biri olup, 300 mm kalınlığında serilmiş SSB için maksimum agrega çapının 75 mm'yi aşmaması önerilmektedir (ACI 309.5R-00, 2000).

Uygulamada, ayrışma problemini en aza indirmek için, maksimum agrega çapı 37,5 mm - 50 mm aralığında seçilir. Yol kaplaması olarak kullanılacak SSB karışımlarında daha düzgün yüzey elde edilmesi amacı ile maksimum agrega çapının 19 mm seçilmesi önerilir (ACI 325.10R, 1995).

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 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 kullanılabilen gibi standartlara uygun mineral katkılar kısmen çimento yerine de kullanılabilir. Puzolanik özelliğe sahip atık bir malzeme olan çeltik kabuğu külleri de SSB'de bir mineral katkı olarak kullanılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Atiş, 2001; Kajorncheappunngam and Steawart, 1992).

3.3.3 Karma Suyu

SBB'da karışımlarda su / çimento oranı, 0.20 ile 0.40 arasında olmaktadır (Edis, 2007). Silindirle sıkıştırılabilen betonlardaki karışım suyunun kalitesi geleneksel beton karışımlarında kullanılan su ile aynı standartları sağlamalıdır. SSB karışımlarında kullanılan su miktarı tipik olarak 90 kg/m³ 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).

3.3.4 Katkı Maddeleri

3.3.4.1 Mineral katkıları

Bağlayıcı (çimento+uçucu kül) malzemelerin % 25 - 40'ını C veya F sınıfı uçucu küller meydana getirmektedir. Fransa ve İspanya'da birbirine karıştırılmış çimentolar (blended cement) kullanıldığı gibi, çimento ve uçucu kül karışımı kullanılmaktadır. Uçucu kül içeren çimentolar geleneksel Portland Çimentosu'ndan ucuzdur ve priz işlemini belirgin şekilde geciktirmektedir (Malisch, 1988).

Uçucu kül RCC'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 azaltmaktadır. Bu yüzden, kış aylarının sert geçtiği bölgelerde uçucu kül kullanılmamalıdır. Bu gibi bölgelerde, bağlayıcı ağırlığının % 10'u üzerinde silis dumanı (silica fume) kullanılması, dayanım ve dayanıklılığı arttırmaktadır (Malisch, 1988; Gauthier and Marchand, 2005; Topçu, 2006).

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 (Üte, 2008).

Uçucu kül, su azaltıcı ve priz geciktirici katkıların kullanımı da SSB'nin sıkıştırılabilirliği açısından yararlıdır. Uçucu kül, çimento yerine ikame olarak kullanıldığında, ölçülebilen belirli bir kıvama sahip karışımın su ihtiyacını azaltabilir (ACI 207.5R, 1988).

3.3.4.2 Kimyasal katkılar

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

Priz geciktiriciler ve plastikleştiriciler (plasticizers) bazı ülkelerde, şartnamelerde belirtilen işlenebilirlik süresini elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Katkı maddesi ile sağlanan gecikme süresinde bağlayıcı prizi başlamadığı için, karışım içyapısı bozulmadan sıkıştırılabilmektedir (Topçu, 2006).

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 katkılar, çimento hamurunun karışımda üniform bir biçimde dağılmasına yardımcı olmak ve kaplama esnasında işlenebilirliği geliştirmek amacıyla SSB karışımlarında başarı ile uygulanmaktadır. Karışımın kuru olarak hazırlandığı santrallerde üretim esnasında işlenebilirliği arttırmak ve karıştırma zamanını kısaltmak amacıyla polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkılar karışıma eklenmektedir. Süperakışkanlaştırıcı katkılar üretim hızını önemli derecede arttırmaktadır. Yolun trafiğe erken açılması gereken durumlarda, SSB karışımlarında priz hızlandırıcı katkılar da kullanılabilir (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 katkılar, karışımda 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 kg - 300 kg iken katkı malzemesi dozajı yaklaşık olarak 1000 ml - 1200 ml arasında

olmaktadır. Su azaltıcı kimyasal katkıların yaklaşık %50 - 60'ı sudur. Hedef su / bağlayıcı 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).

Hava sürükleyici katkı maddeleri, RCC kaplama karışımlarında sınırlı olarak kullanılmaktadır. Laboratuvar araştırmaları homojen bir şekilde hava dağılımı sağlandığında, don nedeniyle meydana gelecek zararların azaltılabileceğini göstermiştir (Edis, 2007).

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 sürükleme işlemi zor olmaktadır. Kullanılacak olan kimyasal katkının etkisini ve uygun dozajını belirlemek için arazi ve laboratuvar testleri yapılmalıdır (PCA, 2006).

3.3.5 Kalsit

Kalsit; kimyasal formülü CaCO_3 , kristal tane boyutu 1 mm - 10 cm arasında olan kireçtaşının yapıtaşı olan bir mineraldir. Mohs sertlik çizelgesine göre sertliği 3 ve özgül ağırlığı 20 °C'da 2,7 gr/cm³ ve çözünürlüğü 25 °C'da 0,0015 gr/cm³ H₂O'tür. Kolay kırılır, cam parıltılı, doğada yarı saydam ve mat olarak bulunur (Şahin, 1978).

1 mm - 100 mm boyutunda öğütülmüş kalsitin ticari adına mikronize kalsit denir. Genelde dolgu ve kaplama sanayiinde kullanılır. Derz dolgu malzemesi olarak kullanıldığında, CaCO_3 en az % 95, tane boyutu 250 mikrondan küçük olmalıdır. Nemli kalsit beyaz çimento ile karıştırıldığında çimentonun pirizlenmesine neden olmakta ve ürün kalitesini etkilemektedir (Şahin, 2008).

3.4 Taze Silindirle Sıkıştırılan Betonların Özellikleri

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

3.4.1 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik SSB'nin segregasyona uğramadan kolayca yerleşmesini ve sıkıştırılmasını belirleyen önemli bir özelliktir. SSB'nin işlenebilirliği geleneksel betonda uygulanan slump testi ile ölçülmektedir. 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).

Sıfır çökme değerine sahip olan karışım için ölçülen 5 sn'lik VeBe süresine karşılık elde edilen kıvama sahip bir karışımda, sıkıştırma silindirini titreşim olmadan kullanmak çok zor olabilir. Baraj inşaatları için, VeBe süresi 15 saniye civarında olan karışımlarda, 10 tonluk titreşimli silindirin tabaka üzerinden 4 - 6 geçişinin uygun sıkışmanın sağlanması için yeterli olduğu ve genel olarak 15 sn - 20 sn'lik VeBe süresine sahip karışımların uygun olduğu belirtilmektedir (ACI 309.5R-00, 2000).

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

RCC karışımlarının işlenebilirlik süresini belirlemek için bazı test yöntemleri ileri sürülmüştür. Bu yöntemlerde genellikle ultrasonik cihazlar kullanılmaktadır. Priz işlemi süresince bir numune içinden geçen ultrasonik atış yayılım süresindeki değişim, sürekli

olarak gözlenmektedir. Yayılım süresi, % 60 azaldığında, işlenebilirliğin bittiği anlaşılmaktadır. Bu işlemler genellikle Fransa'da uygulanmaktadır. İspanya'da geliştirilen diğer bir yöntem, atışların ultrasonik enerjisini ölçmekte olup daha kesin sonuçlar vermektedir. İşlenebilirlik sıcaklık koşullarına bağlı olduğu için, testler sıcaklık kabini içinde yapılmalıdır (DOA, 1995 ; Ragan, 1988).

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. Su / bağlayıcı 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 L/m^3 - 2 L/m^3 gibi ufak değişimler karışımın işlenebilirliğini ve yerleştirme işlemlerini fark edilir şekilde etkilemektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

Uçucu kül, düşük hamur hacmine sahip karışımlarda işlenebilirliği ve SSB'nin yoğunluğunu arttırmak için mineral fiber olarak kullanılabilir. Uçucu kül içeren SSB'lerin daha az boşluk hacmine sahip olduğunu belirtmiştir (Cheng vd., 2000).

3.4.2 Su / çimento oranı

Su / çimento oranı geleneksel betonlarda 0,50 dolaylarda olmasına karşılık RCC’de 0,30 mertebesine düşürülmesi dirençler en az iki katına çıkartılabilmektedir. Su / çimento oranının azaltılması, betonda terleme olayını engellemekte, ayrıca büzülme(rötre) özelliğini iyileştirmektedir. Su / çimento oranının daha alt düzeylere çekilmesi, su buharlaşmasının oluşturacağı olumsuz sonuçlar nedeniyle mümkün görülmemektedir (Ağar vd., 1998).

SSB karışımlarında genellikle 0.20 ile 0.40 arasında değişen düşük su / bağlayıcı malzeme 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 vd, 2001).

3.4.3 Birim Ağırlık

Taze SSB karışımının ıslak birim ağırlığın ölçülmesi ile üretimin üniform 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. SSB’nin ıslak birim ağırlığı laboratuvar ortamında Modifiye Proktor Test Prosedürü’ne 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).

Yüksek su muhtevalarında, karışımın hava içeriği ve plastisitesi (şekillenebilirliği) daha fazla, birim ağırlığı daha az olmaktadır. (PCA, 2004).

Sıkıştırılmış SSB’nin arazideki ıslak birim ağırlığın ölçümü nükleer yoğunluk test aleti ile yapılmaktadır. 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 (Üte, 2008).

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).

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).

3.4.4 Hava İçeriği

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 kanaat varılabilir (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).

3.4.5 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 (<0,5 mm) ile düzeltilebilmektedir (Gauthier and Marchand, 2005).

3.5 Sertleşmiş Silindirle Sıkıştırılan Betonların Özellikleri

Uygun bir şekilde oranlanmış SSB'nin bağlayıcı içeriği ve su / bağlayıcı malzeme 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, su / bağlayıcı malzeme oranına ve agrega karakteristiklerine bağlıdır (Üte, 2008).

Sertleşmiş beton üzerinde, mekaniksel dayanımların belirlenmesinin yanı sıra, kışları sert geçen ülkelerde, dona ve aşınmaya karşı direnç testleri de uygulanmaktadır. Mekaniksel dayanımlarla ilgili; basınç, eğilme ve yarmada çekme testlerinin kullanılabilmesi belirtilmiştir (DOA, 1995; Ragan, 1988).

3.5.1 Basınç dayanımı

Almanya'da RCC kaplamalar için önerilen basınç dayanımı 40 MPa olup, RCC ile yapılmış temeller için basınç dayanımı 30 MPa'dır (DOA, 1995; Ragan, 1988).

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

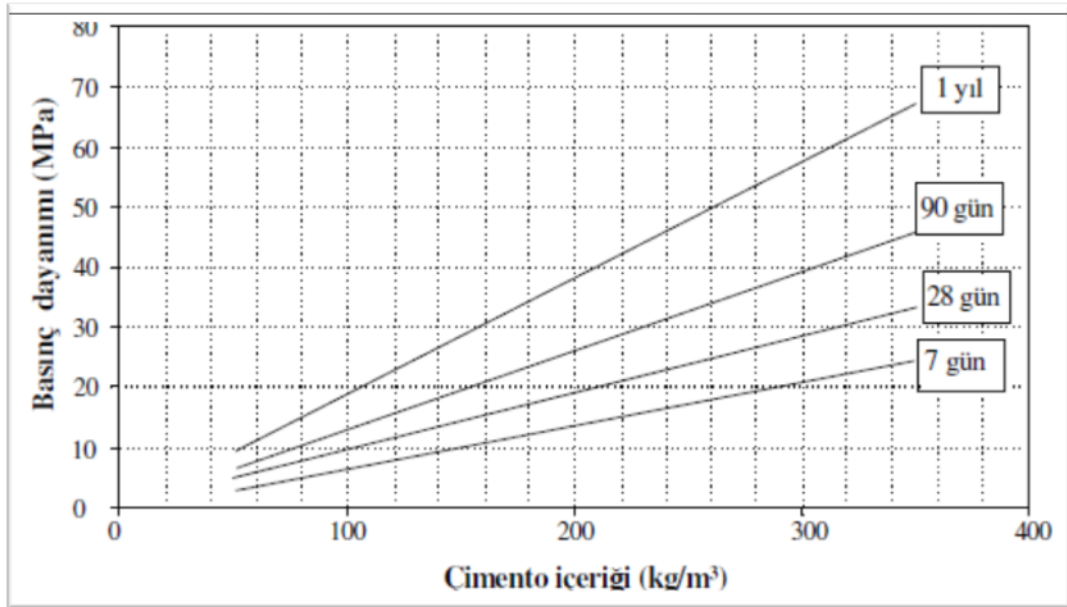
İsveç'te RCC içine uçucu kül gibi aktif maddeler katılmadığı için, geleneksel betonlarda olduğu gibi sağlanması gerekli olan 28. gün basınç dayanımı 40 MPa'dır (Topçu, 2006).

Çizelge 3.6.'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).

Çizelge 3.6. SSB ve geleneksel beton karışımlarının kıyaslanması(Gauthier and Marchand, 2005).

	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

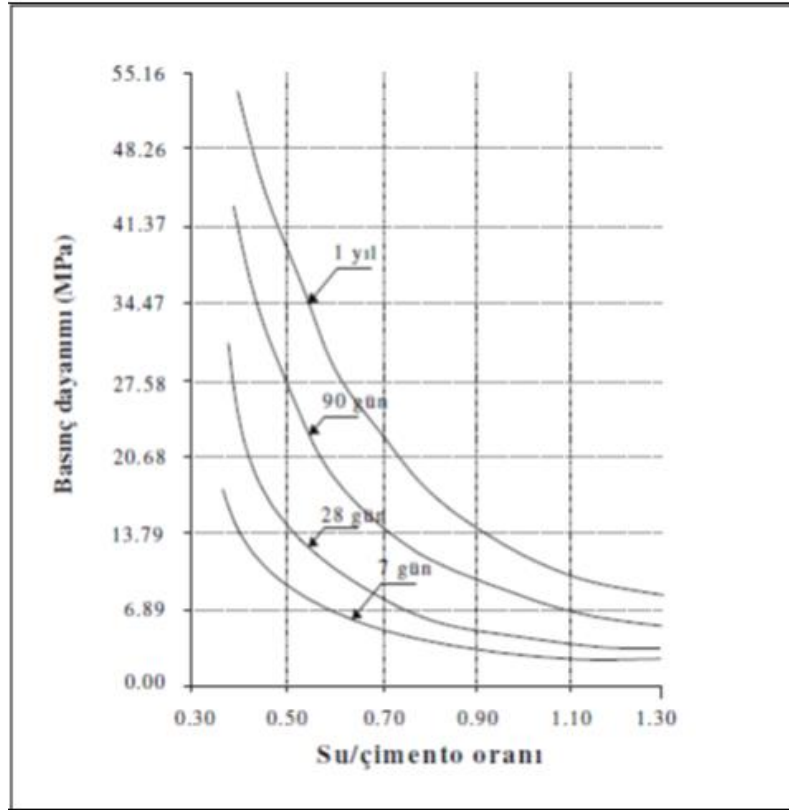
Geçmiş çalışmalardan elde edilen verilerle, maksimum tane çapı 19 mm ile 75 mm arasında olan ve puzolan içermeyen SSB karışımlarının ortalama basınç dayanımı ile çimento dozajı arasındaki ilişki Şekil 3.3.'te gösterilmiştir (USACE, 2000).



Şekil 3.3. Çimento içeriği ile basınç dayanımı ilişkisi (USACE, 2000).

Dayanım testlerin uygulanma zamanı genellikle 28. gündür. İspanya'da çimentolara büyük oranda uçucu kül gibi aktif madde katıldığı için 90. gün sonunda testler yapılmaktadır (Keifer, O., 1988; DOA, 1995; Ragan, 1988).

Geçmiş çalışmalardan elde edilen verilerle, SSB karışımlarının basınç dayanımı ile su / bağlayıcı oranı arasındaki ilişki Şekil 3.4.'te gösterilmiştir (Koçak, 1998).

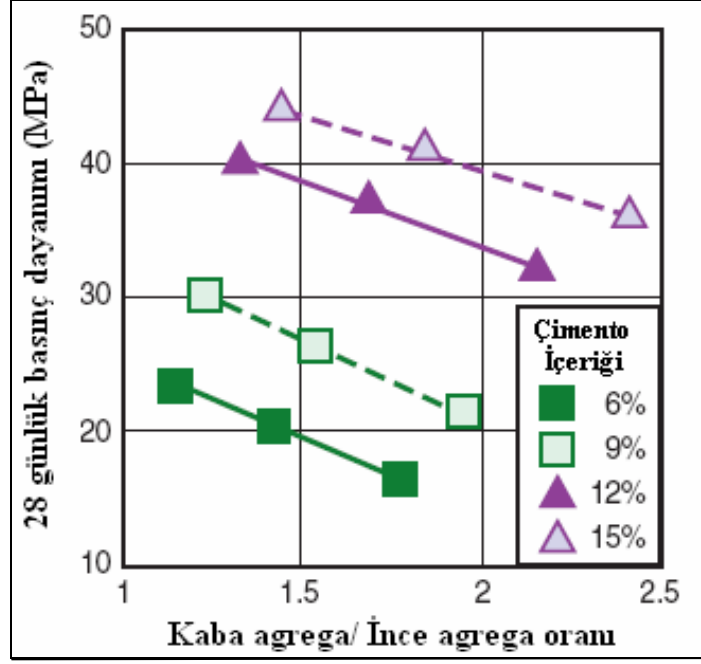


Şekil 3.4. Basınç dayanımı ile su / bağlayıcı oranı ilişkisi (Koçak, 1998).

SSB'nin dayanımı, serim kalınlığına bağlı olarak, sıkıştırma derecesinden önemli ölçüde etkilenir. SSB taze halde iken çok fazla kalın tabakalar halinde serilip sıkıştırmaya çalışılırsa yeterli sıkıştırma elde edilmeyebilir. Etkili bir sıkıştırma ile uzaklaştırılabileceği halde yetersiz sıkıştırma ile SSB içerisinde hapsolan her % 1'lik hava, dayanımda yaklaşık olarak % 5'lik azalmaya neden olmaktadır (ACI 309.5R-00, 2000).

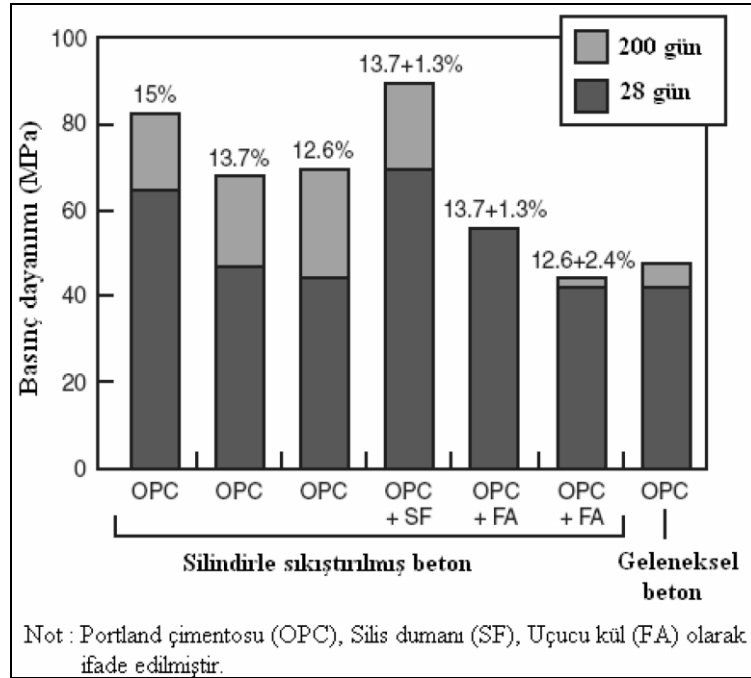
Sıkışma derecesi de ayrıca önemlidir. Farklı sıkışma derecelerine sahip SSB numuneleri üzerinde yapılan bir çalışmada, (referans ıslak yoğunluğa oranı %90, %95 ve %98 olan) sıkışma derecesinde %3 oranında bir düşüşün SSB'nin basınç dayanımında yaklaşık %30'lara varan bir azalmaya sebep olduğu gösterilmiştir (Gauthier and Marchand, 2005).

SSB yol kaplamalarında kaba agreganın ince agregaya oranı basınç dayanımında önemli rol oynamaktadır. Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi bağlayıcı dozajına bağlı kalmaksızın, karışımdaki ince malzeme miktarı arttıkça SSB'nin basınç dayanımı da artış göstermektedir (PCA, 2004).



Şekil 3.5. İnce malzeme içeriğinin betonun basınç dayanımına etkisi (PCA, 2004).

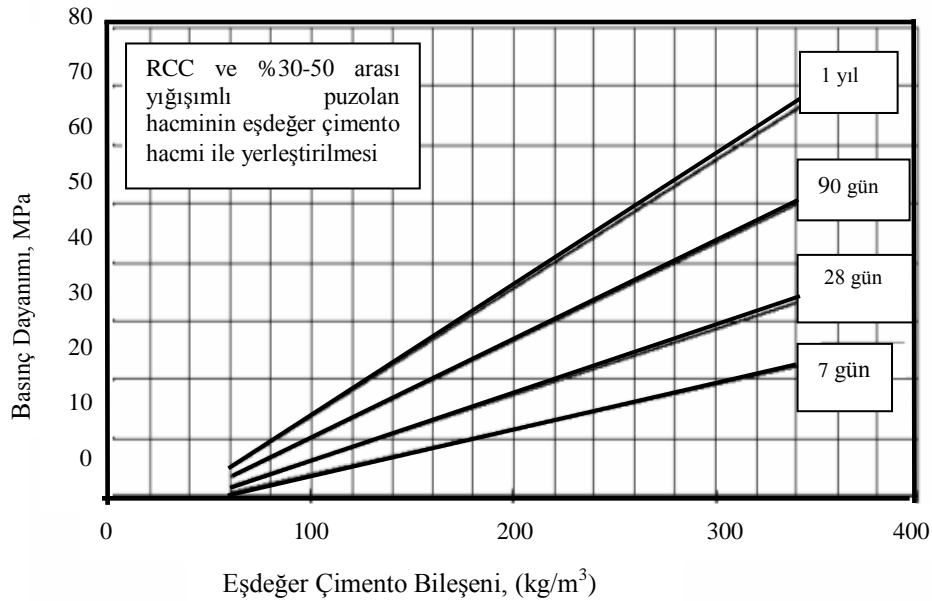
Değişik tip ve miktarlardaki (karışıma giren kuru malzemelerin ağırlıkça %10 ile %15'i arasında) bağlayıcı malzeme ile hazırlanan karışımlara ait 28 ve 200 günlük basınç dayanımları Şekil 3.6.'da gösterilmiştir (PCA, 2004).



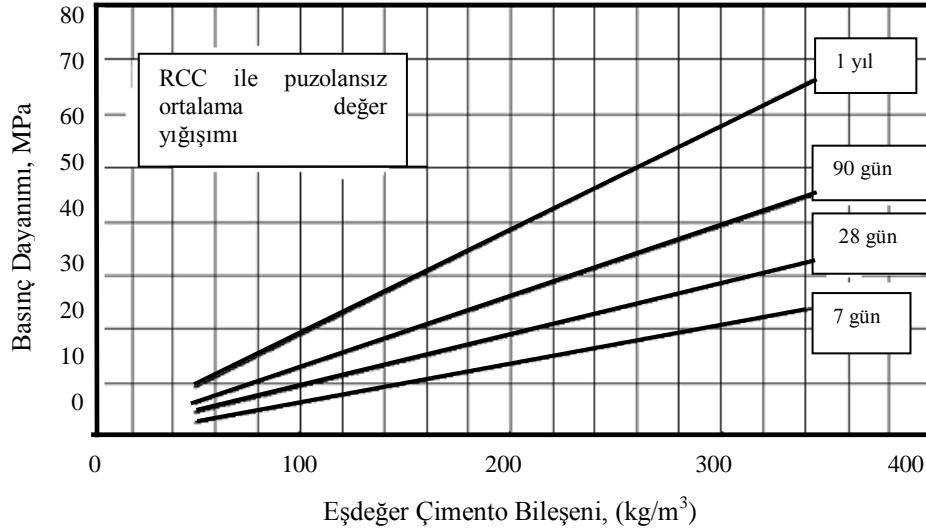
Şekil 3.6. Bağlayıcı tip ve miktarının SSB'nin basınç dayanımına etkisi (PCA, 2004).

Ayrıca çimentoya ikame olarak %15 standart dışı uçucu kül kullanılan SSB karışımlarının 28 günlük dayanım özelliklerinin uçucu kül içermeyen karışımlara eşit veya daha iyi olduğu gösterilmiştir (Atış vd, 2004)

Beton malzemelerinin herhangi bir bileşiminde dayanımı büyük ölçüde çimento bileşenlerine bağlıdır. Karışımın nemli bileşenleri, bir agrega işlevi ve istenilen RCC işlenebilirlik seviyesidir. Çimento ve puzolan içeren malzemelerin gerekli oranları laboratuvar değerlendirilmesi ile karar verilir. Şekil 3.7. ve Şekil 3.8. çimento bileşenleri ve su bileşenleri ile ilişki kurarak başlama noktası verir. Puzolanın RCC dayanımını geliştirme etkisi tahmin edilemez, buna laboratuvarla karar verilmelidir. Şekil 3.7. ve 3.8. puzolanlı ve puzolansız çeşitli eşdeğer sıkıştırılmış dayanımları ve çimento bileşenleri arasındaki ilişkiyi sağlar. Bu eğriler 19 mm - 75 mm arasında değişen ve F sınıfı uçucu küller ile yada onlar katılmadan yığılmış RCC karışımlarının ortalama verilerini ifade eder (RCC Newsletter, 2000).



Şekil 3.7. RCC ve % 30 - % 50 arası yığılımlı puzolan hacminin eşdeğer çimento hacmi ile yerleştirilmesi (RCC Newsletter, 2000).

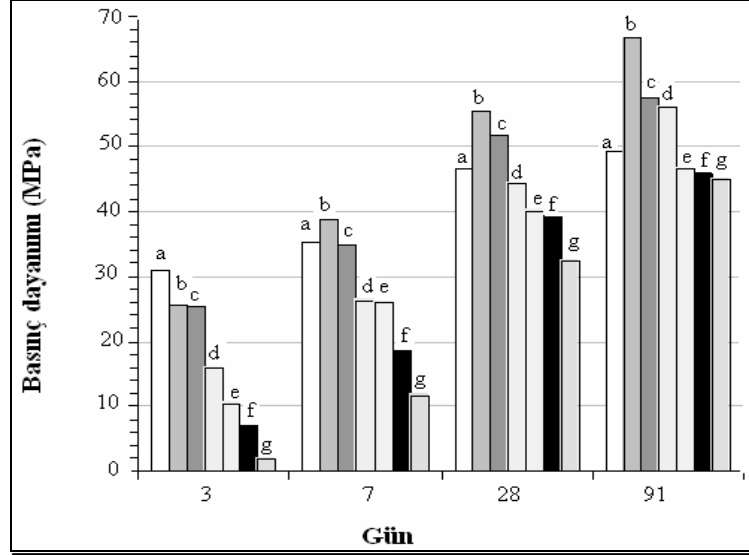


Şekil 3.8. RCC ile puzolansız ortalama değer yığılımı (RCC Newsletter, 2000).

Yüksek miktarda uçucu kül içeren (çimento yerine %40'ı aşan mertebelerde kullanılması) SSB karışımlarına ait bağlayıcı dozajları ise Çizelge 3.7.'de, karışımlara ait basınç dayanımları Şekil 3.9.'da gösterilmiştir. Erken yaşlarda uçucu küllü karışımların SSB'nin basınç dayanımını düşürdüğü ancak ileriki yaşlarda hidrasyon 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).

Çizelge 3.7. Şekil 3.9.'de gösterilen karışımların bağlayıcı dozajları (Gauthier and Marchand, 2005).

Karışım Adı	Tip 10 Çimento (kg / m³)	Uçucu Kül (kg / m³)	Toplam Bağlayıcı (kg / m³)	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



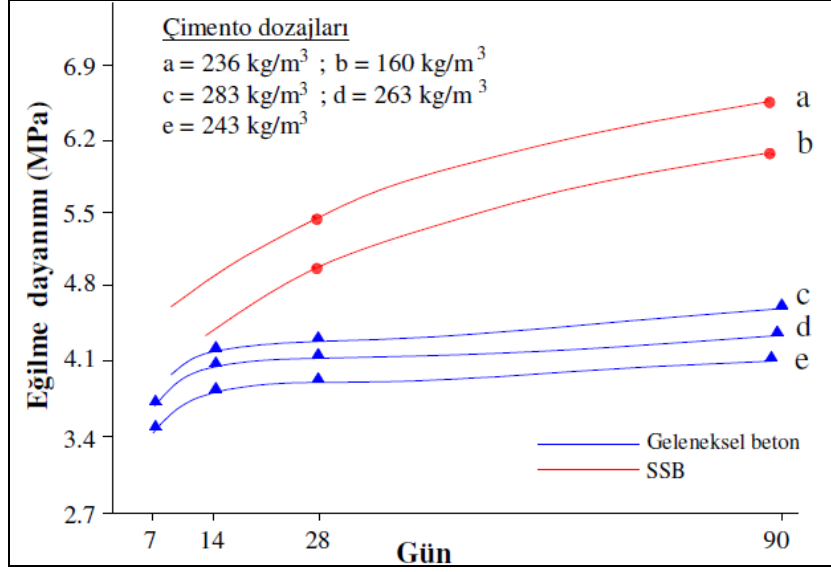
Şekil 3.9. Uçucu kül içeriğinin SSB'nin basınç dayanımına etkisi (Gauthier and Marchand, 2005).

3.5.2 Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımı geleneksel beton kaplama dizaynında ve silindire 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).

SSB'nin mekanik direnci; eğilme deneyinde dikdörtgen kesitli prizmatik numuneler üzerinde en az 4,5 Mpa olmalıdır (Ağar vd., 1998).

Şekil 3.10.'da farklı çimento dozajlarına sahip geleneksel beton ve silindire sıkıştırılmış beton karışımlarına ait eğilme dayanımları gösterilmiştir. SSB'nin 28 günlük eğilme dayanımı 3.4 MPa ile 6.9 MPa arasında değişmektedir (Halsted, 2005).



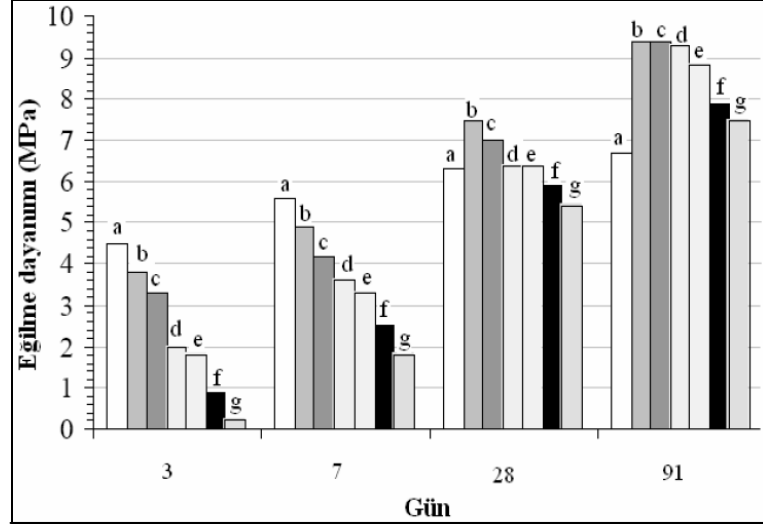
Şekil 3.10. SSB ve geleneksel beton karışımlarına ait eğilme dayanımları (Halsted, 2005)

SSB'nin kullanıldığı birçok ülkede, SSB ile yapılan kaplamaların tasarımı, geleneksel betonlar için kullanılan yöntemlerle yapılmaktadır. ABD'de, Portland Çimento Birliği ve Mühendisler Kurulunun her ikisi de SSB kaplamaların tasarımı için, geleneksel beton kaplamaların tasarımında kullanılan yöntemleri yeniden düzenleyerek geliştirmişlerdir. Mühendisler Kurulu Yönteminde tasarım eğilme gerilmesi, boyuna yapım derzlerini ve çatlaklardaki yük transferini azaltmak için, geleneksel beton kaplamalarının tasarım eğilme gerilmesinden %25 büyük alınmıştır (Edis, 2007).

RCC, yol kaplaması olarak kullanıldığında, sert ve iyi sıkıştırılmış bir alt temel üstüne uygulanmalıdır. Aksi halde eğilme dayanımında azalma meydana gelir (Eres Consultant, 1998).

SSB'li yol kaplamalarının performansı, en alt serilme tabakasında eş değer sıkıştırmanın başarılmasından olumsuz etkilenmektedir. Yol kaplamasının en alt tabakasında, en üst tabakaya göre % 25 daha az eğilme dayanımı elde edilebilmektedir (Rollings, R.S., 1988).

Farklı miktarlarda uçucu kül içeren karışımların eğilme dayanımları Şekil 3.11.'de, karışımlara ait bağlayıcı dozajları ise Çizelge 3.6.'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 (Gauthier and Marchand, 2005).

3.5.3 Yarmada çekme dayanımı

Sertleşmiş beton üzerinde, mekanik dayanımların belirlenmesinin yanı sıra, kışları sert geçen ülkelerde, dona ve aşınmaya karşı direnç testleri de uygulanmaktadır. Fransa ve İspanya'da yarmada çekme dayanımının 3.3 MPa olması gerektiği, düşük hacimli yollar için ise 2.8 MPa'ın yeterli olacağı açıklanmıştır. Almanya'da RCC kaplamalar için önerilen yarmada çekme dayanımı 3.0 MPa, RCC ile yapılmış temeller için yarmada çekme dayanımı 2.7 MPa'dır (DOA, 1995; Ragan, 1988).

SSB'nin mekanik direnci; silindir numunelerde çekmede yarma deneyinde en az 2,8 Mpa olmalıdır (Ağar vd., 1998).

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

SSB tekniği ile üretilmiş bir dizi numunede ölçülen çekme direnci değerleri aşağıdaki Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. SSB'li betonlarda çekme direnci değişim (Mpa) (Ağar vd., 1998).

Çekme Direnci	7 gün	14 gün	28 gün	60 gün	90 gün
SSB Betonu	5,4	5,85	6,13	6,25	6,35

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).

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).

3.5.4 Büzülme

RCC yol kaplamalarının, büzülme etkisiyle çatlaması, diğer yol betonu kaplamalarında da olduğu gibi önemle izlenmesi gereken bir süreçtir. Rötire gerilmelerinin, çekme direnç değerlerinin üzerine çıkması durumunda, ince çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar zamanla ve trafiğin zorlamalarıyla genişleme eğilimi gösterir. RCC betonla yapılan rötire deneylerinde(16x32 cm) boyutlarında hazırlanmış ve 20°C - %50 bağıl nem koşullarında saklanmış silindirik RCC numunelerinin rötire miktarlarının, aynı koşullarda saklanmış olan plastik kıvamlı(klasik) yol betonu numunelerinin rötire miktarlarına kıyasla daha düşük olduğu gözlenmektedir. Ortalama sonuçlar Çizelge 3.9.'da sergilenmektedir (Ağar vd., 1998).

Çizelge 3.9. Büzülme miktarları kıyaslanması($\mu\text{m}/\text{m}$) (Ağar vd., 1998).

Beton Cinsi	2 gün	7 gün	14 gün	28 gün	60 gün	90 gün
RCC	4	30	46	62	78	87
Plastik beton	7	75	115	156	198	219

Prizmatik numunelerde de benzer davranışlar gözlenmektedir. RCC'de su / çimento oranının düşük olması nedeniyle hidrasyon sırasında kimyasal bileşiminde büzülme etkisini ortaya koyan hidratların daha az miktarda oluşması söz konusudur. Bu özellik RCC'de meydana gelecek büzülme miktarlarının klasik betona kıyasla daha düşük mertebede kalmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan düşük rötire düzeyleri RCC mekanik dirençlerinin

hızla yükselmesine yardımcı olmaktadır. Dökümden sonra ilk çatlakların belirme süresi klasik betona göre daha uzundur. Ancak mevsimden mevsime ısı farklılaşması nedeniyle ortaya çıkacak olan rötre çatlakların tümüyle önlenmesi, klasik betonda da olduğu gibi, mümkün değildir (Ağar vd., 1998).

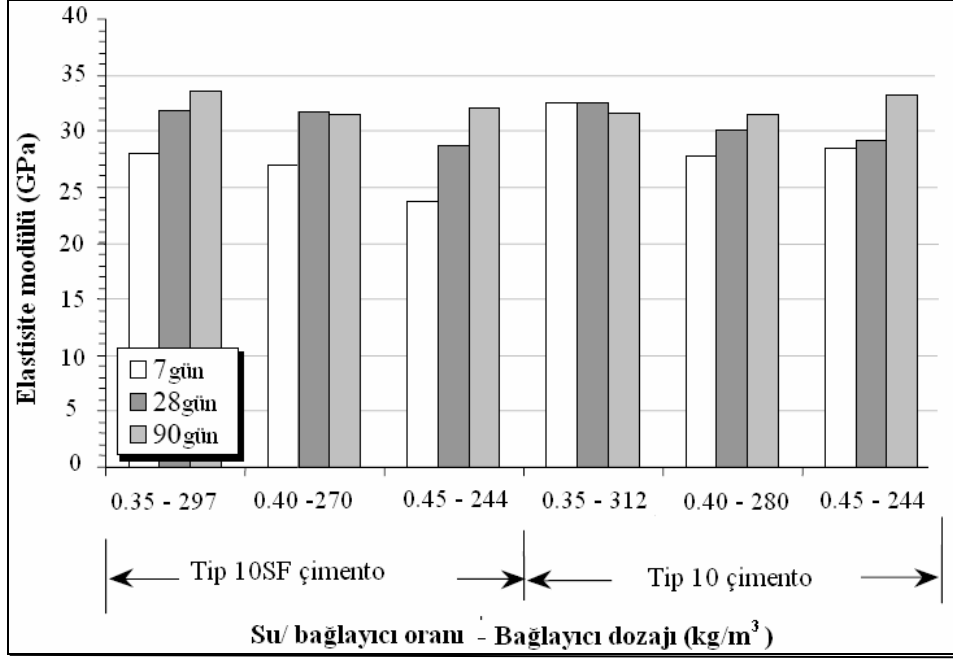
Kuruma büzülmesine neden olan esas etken su / bağlayıcı oranı ile agrega miktarıdır. Su / bağlayıcı oranı arttıkça kuruma büzülmesi de artmaktadır. Agregalar, hamurda oluşan büzülme ve deformasyonları engellemektedir. Bu engellenme miktarı agreganın elastik özelliklerine bağlıdır. SSB'de agrega miktarı 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 $\mu\text{m}/\text{m}$ ve üzeri bir değerde iken, tipik bir SSB karışımında maksimum kuruma büzülmesi 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ ile 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ değerleri arasında değişmektedir. Ayrıca çimento dozajının düşük olması da kuruma büzülmesini azaltmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005).

3.5.5 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 su / bağlayıcı malzeme oranlarındaki SSB karışımlarına ait elastisite modülleri (Gauthier and Marchand, 2005).

3.5.6 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 dağılımındaki 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 oluturması 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 testlerin donma direncini laboratuvarında doğru olarak belirleyemediğini düşünen araştırmacılar yeni test yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini belirtmişlerse de ABD’nin kuzeyi, Kanada, İsveç ve Norveç gibi soğuk bölgelerdeki kaplamaların iyi performans gösterdiği görülmüştür. Kış mevsimlerinde çivili lastik kullanılan ülkeler için aşınma direnci çok önemlidir. Norveç’te yapılan bir çalışma RCC kaplamaların aşınmaya karşı, beton asfalt kaplamalardan daha dirençli olduğunu göstermiştir (Topçu, 2006).

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 su / bağlayıcı malzeme oranlarında, silis dumanı içeriklerinde, kür tekniklerinde ve çimento inceliklerinde SSB’nin permeabilitesini ölçmü, SSB’nin geleneksel kütle betonlarına kıyasla daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğunu göstermiştir. Silis dumanı ve daha ince çimento kullanıldığında permeabilite katsayısının düştüğü gözlemlenmiştir (Tarun vd., 2001).

Ghafoori ve Zhang (1995)’in 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 vd., 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 vd., 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 vd., 2001).

3.6 Silindirle Sıkıştırılan Betonların Uygulama Aşamaları

3.6.1 Karıştırma ve taşıma

RCC karışımlar, hem kesikli hem de sürekli karıştırma tesislerinde üretilebilmektedir. Kesikli karışım tesislerinde daha iyi kontrol yapılabilmesine karşın, büyük projeler için yeterli üretimi sağlayamamaktadır. Karışıma bağlayıcı ilave edilmesini doğru şekilde kontrol edebilecek, yüksek üretim kapasitesine sahip olan sürekli karıştırma tesislerinin kullanımı tercih edilmektedir. Sürekli karışım tesisleri, kolayca taşınabilmekte ve kurulabilmekte olup kesikli karışım tesislerine göre birim zamanda daha fazla üretim sağlayabilmektedir. En çok kullanılan ve önerilen tesis, malzemeler için ağırlık kontrolüne sahip olan sürekli karışım tesisleridir. Tesisin üretimi hızlı ve kesintisiz olduğunda, serme işleminin sürekliliği de sağlanmış olacaktır. Özellikle İsveç gibi gelişmiş ülkelerde, serme işlemindeki sürekliliği sağlamak için, RCC hazır beton üreticileri tarafından üretilmektedir. Karıştırma tesisindeki işlemler sırasında, karışımın nem oranı kontrol edilmelidir. Karışımın düzenli olarak serilmesi ve sıkıştırılması bakımından nem oranının kontrolü çok önemlidir. Nem oranının kontrol altında tutulmasıyla istenilen yoğunluk sağlanabilecektir. Düzenlemelerin derhal yapılabilmesi için, uygulama alanı ile tesis arasında telsizle bağlantı kurulması gerekmektedir. Karışımın görünümüne bakılarak, düzeltmeler operatör tarafından yapılmaktadır (CAC, 2002b).

Değişen koşullar nedeniyle su katılmasında düzenlemeler gerekebilmektedir (örneğin gün boyunca hava koşulları değişmişse ve depolardaki agregaların nem oranı değişirse). Nem oranında oluşabilecek % 0.1 veya % 0.2'lik değişim, karışım üzerinde önemli bir

etkiye sahiptir. Tesisin üretimi, sericinin yerleştirme ve sıkıştırıcının sıkıştırma hızıyla uygunluk göstermelidir. Tesis mümkün olduğunca uygulama alanına yakın yerleştirilmeli, hiçbir durumda tesisle ile serici arasındaki taşıma süresi 15 dakikayı aşmamalıdır. RCC, tesisten uygulama alanına damperli kamyon ile taşınmaktadır. Kamyon, RCC'nin yağmur, aşırı soğuk veya sıcak gibi çevresel koşullardan etkilenmemesi için su geçirmez branda ile kaplanmalıdır. Beton, kamyonun sericiye doğrudan dökülmektedir. Tesisin durmamasını sağlamak için, tesislerde karışımın kamyonun aktarıldığı kısım ile kamyonun arasına silo yerleştirilmelidir. Silo yerleştirilmediğinde, kamyonun gelmeyecek olursa tesis durdurulacaktır. Tesisin her bir duruşunda, üretime tekrar başlarken üretilen karışım özellikleri farklı olacaktır (Fotoğraf 3.3.) (Watanabe-gumi Company, 2002).



Fotoğraf 3.3. SSB'nin taşınması ve yerleştirilmesi

RCC karışımlar, hem kesikli hem de sürekli karıştırma tesislerinde üretilmektedir. Kesikli karışım tesislerinde daha iyi kontrol yapılabilmesine karşın, büyük projeler için yeterli üretimi sağlayamamaktadır. Karışıma bağlayıcı ilave edilmesini doğru şekilde kontrol edebilecek, yüksek üretim kapasitesine sahip olan sürekli karıştırma tesislerinin kullanımı tercih edilmektedir. Sürekli karışım tesisleri, kolayca taşınabilmekte ve kurulabilmekte olup kesikli karışım tesislerine göre birim zamanda daha fazla üretim sağlayabilmektedir. En çok kullanılan ve önerilen tesis, malzemeler için ağırlık kontrolüne sahip olan sürekli karışım tesisleridir. Tesisin üretimi hızlı ve kesintisiz olduğunda, serme işleminin sürekliliği de sağlanmış olacaktır. Özellikle İsveç gibi

gelişmiş ülkelerde, serme işlemindeki sürekliliği sağlamak için, karışım hazır beton üreticileri tarafından üretilmektedir. Karıştırma tesisindeki işlemler sırasında, karışımın nem oranı kontrol edilmelidir (CAC, 2002b; Eres Consultant, 1998).

3.6.2 Serme ve sıkıştırma

RCC karışımları, kaplama makineleri ile serilmelidir. Serici, istenilen kotta serim yapabilecek şekilde hassas cihazlarla donatılmış olmalıdır. 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. Betonun serilme işlemi başlamadan önce, RCC tabakasının altında oluşabilecek nem oranının azalmasını önlemek için temel veya alt temel tabakası su ile ıslatılmalıdır. Serme işleminde tabaka kalınlığının kontrolü doğru şekilde yapılabilmesi için, otomatik master kullanılmaktadır. Su agregaya içine katıldıktan sonra 45 dakika içinde beton yerleştirilmeli ve sıkıştırılmalıdır. Yan yana yapılan şeritlerde birleşimi sağlayabilmek için kaplanmış şeritten en fazla 60 dakika sonra yandaki şeride beton yerleştirilmiş olmalıdır. Bu süreler hava koşullarına göre azalabilmektedir. Eğer bu süre sınırlamalarına uyulmazsa yapım derzleri ortaya çıkmaktadır. RCC, genellikle kaplama kalınlığı 250 mm olacak şekilde serilmekte, kaplama kalınlığı 250 mm'den fazla ise iki tabaka halinde serilmektedir (Fotoğraf 3.4.) (Watamabe-gumi Company, 2002).



Fotoğraf 3.4. Rolkrit uygulaması (Topçu, 2006).

İlk sıkıştırma titreşimli çelik bandajlı silindir ile yapılmaktadır. 10 ton ağırlığa sahip çift tamburlu titreşimli silindir ile en az dört geçiş yapılmaktadır. Titreşimli silindirlerde

manevra sırasında kesinlikle titreşim yapılmamalıdır. 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. Titreşimli ve lastik tekerlekli silindirler sonrasında yolda silindir izleri varsa statik çift tamburlu silindirle bir geçiş yapılmaktadır. Kaplama yüzeyine zarar vermemek amacıyla daha fazla sıkıştırma yapılmamalıdır (DOA, 1995).

Sıkıştırma, serme işleminden sonra 10 dakika içinde başlamalı ve tesiste karıştırma yapıldığı andan itibaren 45 dakika geçmeden tamamlanmalıdır. Sıcak havalarda ise, karıştırmanın bitişi ile sıkıştırmanın bitişi arasında geçen süre 35 dakikayı aşmamalıdır. SSB'de belirlenen yoğunluğu elde edecek kadar yeterli sıkıştırma yapılmadığında, kaplamanın dayanımı düşük olacaktır (Edis,2007).

RCC karışımları, kaplama makineleri ile serilmelidir (Fotoğraf 3.5.). Serici, istenilen kotta serim yapabilecek şekilde hassas cihazlarla donatılmış olmalıdır. 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. Betonun serilme işlemi başlamadan önce, RCC tabakasının altında oluşabilecek nem oranının azalmasını önlemek için temel veya alt temel tabakası su ile ıslatılmalıdır. Serme işleminde tabaka kalınlığının kontrolü doğru şekilde yapılabilmesi için, otomatik master kullanılmaktadır. Su agrega içine katıldıktan sonra 45 dakika içinde beton yerleştirilmeli ve sıkıştırılmalıdır. Yan yana yapılan şeritlerde birleşimi sağlayabilmek için kaplanmış şeritten en fazla 60 dakika sonra yandaki şeride beton yerleştirilmiş olmalıdır. Bu süreler hava koşullarına göre azalabilmektedir. Eğer bu süre sınırlamalarına uyulmazsa yapım derzleri ortaya çıkmaktadır. RCC, genellikle kaplama kalınlığı 250 mm olacak şekilde serilmektedir. Kaplama kalınlığı 250 mm'den fazla tasarlanmışsa iki tabaka halinde serilmektedir (Topçu, 2006).



Fotoğraf 3.5. Rolkritin finişerle zemine serilmesi (Topçu, 2006).

SSB tabakalar halinde serilip sıkıştırılır. Ancak çok kuru kıvamından dolayı yeterli ve etkili bir sıkışmanın sağlanabilmesi için normal betona göre çok daha yüksek bir sıkıştırma enerjisi gerektirir. Çok kuru kıvamdaki betonun inşaat sahasına çoğunlukla damperli kamyonlarla taşınıp serilmesinden sonra, tabakaların ağır silindirlerle sıkıştırılmasıyla imal edilir. (Baradan vd., 2012)

Özellikle SBB yol kaplamalarında eşdeğer olmayan serilme kalınlıkları ve tabakalar arasında iyi yapışmanın sağlanamaması tüm kaplamanın mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. SSB'nin sıkıştırma yönteminde dikkat edilmesi gereken nokta, tek bir sıkıştırma hattının üzerinde diğeri hatta geçilmeden üst üste sıkıştırma yapılmamasıdır. Yeni serilen tabakalar sıkıştırılırken yan hatta bulunan ve sıkıştırma işlemi tamamlanmış kısımlara zarar verilmemelidir. Ayrıca eğimli yüzeylerde (örneğin baraj gövdesinde mansap yüzü v.b.) serilen malzemenin ağır silindirle sıkıştırılması zordur. Bu nedenle bu kısımlarda el kompaktörleri ile sıkıştırma işlemi uygulanır (ACI 309.5R-00,2000).

SSB karışımlar, hem kesikli hem de sürekli karıştırma tesislerinde üretilebilmektedir. Kesikli karışım tesislerinde daha iyi kontrol yapılabilmesine karşın, büyük projeler için yeteli üretimi sağlayamamaktadır. Karışıma bağlayıcı ilave edilmesini doğru şekilde kontrol edebilecek, yüksek üretim kapasitesine sahip olan sürekli karıştırma tesislerinin kullanımı tercih edilmektedir. Sürekli karışım tesisleri, kolayca taşınabilmekte ve kurulabilmekte olup kesikli karışım tesislerine göre birim zamanda daha fazla üretim sağlayabilmektedir. En çok kullanılan ve önerilen tesis, malzemeler için ağırlık kontrolüne sahip olan sürekli karışım tesisleridir. Tesisin üretimi hızlı ve kesintisiz olduğunda, serme işleminin sürekliliği de sağlanmış olacaktır. Özellikle İsveç gibi

gelişmiş ülkelerde, serme işlemindeki sürekliliği sağlamak için, karışım hazır beton üreticileri tarafından üretilmektedir (Edis,2007).

3.6.3 Derzler

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 (Edis,2007).

ABD'de, Portland Çimento Birliği ve Mühendisler Kurulunun her ikisi de SSB kaplamaların tasarımı için, geleneksel beton kaplamaların tasarımında kullanılan yöntemleri yeniden düzenleyerek geliştirmişlerdir. Mühendisler Kurulu enine derzlerin daha uzun aralıklarda (15 ile 23 metre) 24 saati aşmadan yapılması gerektiğini de vurgulamıştır. Buna uyulmazsa SSB kaplamalarda düzensiz çatlaklar oluşacaktır (Edis,2007).

3.6.4 Kür işlemi

Kür işleminde, hidrasyon işlemi için gerekli nem sağlanmaktadır ve her beton türü gibi RCC kaplamanın performansı için de çok önemlidir. Hidrasyon, betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlayan kimyasal bir reaksiyondur. Bu yüzden kür işlemi oldukça önemli bir basamaktır. Yüzeyi her zaman nemli tutmak gerekmektedir. Çok sıcak ve rüzgarlı havalarda, sıkıştırma tamamlamadan toz halinde su püskürtülmelidir. Normal kür işlemine sıkıştırma sonrasında hemen başlamalı ve 7 gün boyunca devam etmelidir. Kür işlemi su püskürtülerek veya ıslak bezle yapılabilmekte olup genellikle sulama boruları ve su püskürtme başlıkları ile yapılmaktadır. Kür işlemi, RCC'ler için geleneksel betonlara göre daha önemlidir. Yetersiz kür işlemi sonunda, zayıf aşınma tabakaları elde edilmektedir (Malisch, 1988).

Kür işleminde, hidrasyon işlemi için gerekli nem sağlanmaktadır ve her beton türü gibi SSB kaplamanın performansı için de çok önemlidir. Hidrasyon, betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlayan kimyasal bir reaksiyondur. Bu yüzden kür işlemi oldukça önemli bir basamaktır. Yüzeyi her zaman nemli tutmak gerekmektedir. Çok sıcak ve rüzgarlı havalarda, sıkıştırma tamamlamadan toz halinde

su püskürtülmelidir. Normal kür işlemine sıkıştırma sonrasında hemen başlamalı ve 7 gün boyunca devam etmelidir. Kür işlemi su püskürtülerek veya ıslak bezle yapılabilmekte olup genellikle sulama boruları ve su püskürtme başlıkları ile yapılmaktadır. Kür işlemi, SSB'ler için geleneksel betonlara göre daha önemlidir. Yetersiz kür işlemi sonunda, zayıf aşınma tabakaları elde edilmektedir (Edis,2007).

RCC' nin gerekli dayanımı kazanması için yapılan bakıma özen gösterilmelidir. Bunun nedeni, RCC karışımında kullanılan suyun az miktarda olmasıdır. Terleme olmadığı için erken kuruma RCC' nin kalitesini düşürür. Suyla kür etmek de çok uygun bir çözüm değildir. Çünkü taze betondan sızan su alt temelin zayıflamasına neden olur. Bunun yerine bir kür karışımını yüzeye püskürtmek ve buharlaşmayı önleyecek bir membran kullanmak daha uygundur (Eres Consultant, 1998).

Yapımından sonra ilk işlem olarak SSB kaplama üzerine koruma(kür) tabakası serilmelidir. Koruma işlemi, özel kimyasal sıvılarla sağlanabileceği gibi, prizden sonra serilecek ıslak kumlada yapılabilir (Ağar vd., 1998).

3.7 SSB'nin Avantaj ve Dezavantajları

3.7.1 SSB'nin avantajları

SSB kaplamalar, geleneksel beton kaplamaların beton asfalta kaplamalar üzerinde sahip olduğu üstünlüklere sahip olduğu gibi, geleneksel beton kaplamaların bazı sakıncalarını da yok etmektedir (Edis,2007).

SSB kaplamalar, beton asfalt kaplamalara göre daha çabuk trafiğe açılırlar. Ancak geleneksel betonla karşılaştığımızda daha kısa süre gerektirdiğini vurgulamak gerekir. (Edis,2007).

Beton asfalt ile karşılaştırıldığında bir çok üstünlüğe sahiptir. Düzensizlik standardının sağlanması için üzerine çok ince beton asfalt yapılması gerekmesine rağmen, otoyollar ve birinci sınıf yolların yapımı için ekonomik bir seçenektir. Ön sıkıştırma işlemini daha iyi yapabilecek sericilerin geliştirilmesiyle, silindir geçiş sayısı azaltılacak, sürüş konforu artırılabilecektir. Türkiye petrolde dışa bağımlı bir ülke olmasına karşılık çimento

sanayii 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 (Edis,2007).

RCC, özel bir yapım ekipmanı gerektirmediği ve geleneksel beton kaplamaya göre maliyeti az olduğu için düşük hızlı trafiğe hizmet verecek kaplamalar için uygun bir teknik olmaktadır. Geleneksel betonda kullanılan malzemelerle daha iyi mühendislik özelliklerine sahip kaplama yapılabilmektedir. Beton asfalt ile karşılaştırıldığında birçok üstünlüğe sahiptir. Düzgünlük standardının sağlanması için üzerine çok ince beton asfalt yapılması gerekmesine rağmen, otoyollar ve birinci sınıf yolların yapımı için ekonomik bir seçenektir. Ön sıkıştırma işlemini daha iyi yapabilecek sericilerin geliştirilmesiyle, silindir geçiş sayısı azaltılacak, sürüş konforu artırılabilecektir (Topçu, 2006).

Türkiye petrolde dışa bağımlı bir ülke olmasına karşılık çimento sanayi çok gelişmiştir. Bir petrol ürünü olan asfalt çimentosu kullanılarak yapılan kaplamalar yerine RCC kaplama kullanımına başlanması ile daha ekonomik ve uzun ömürlü yollar inşa edilmeye başlanabilecektir. RCC karışımının gelişmiş ülkelerde olduğu gibi hazır beton üreticilerinden alınmasıyla, kaliteli bir kaplama elde edilebilecektir. Rolkritler, geçirimsizlikleri ile dona karşı dayanıklı olurlar ve özellikle kemer barajları, istinat duvarları ve köprü ayağı gibi hidrolik yapıların yapımında rahatlıkla kullanılabilirler. Bundan başka, yol kaldırımları, sahanlık bantları ve yollar da yapılabilir. Düşük çimentolu rolkritler daha ucuza mal olurlar. Ancak, RCC' nin kalınlığının ve karışım oranlarının belirlenmesi için standartlaştırılmış bir yöntem ihtiyacı vardır. Amerikan Beton Enstitüsünün RCC ile ilgili bilgi veren bir raporu bulunmaktadır fakat dayanıklılığına bağlı olarak tasarım ile ilgili bilgi yapılan deneysel çalışmalardan elde edilebilmektedir. Ayrıca, RCC' nin gelişmekte olan ülkelerde kullanımının ekonomik ve çevre korunumu açılarından önemli etkileri olduğu bilinmektedir (Topçu, 2006).

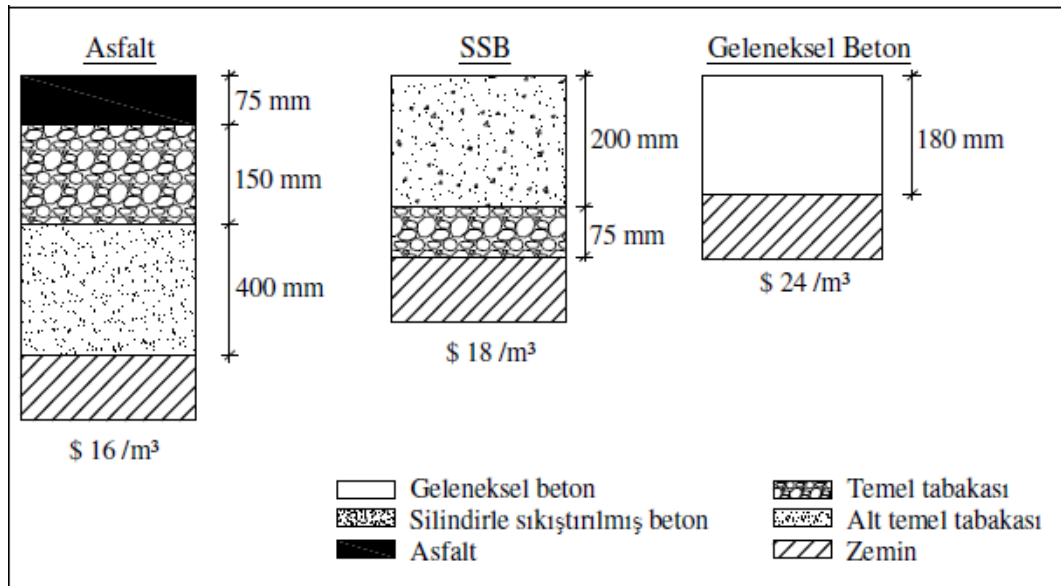
3.7.2 SSB'nin dezavantajları

Mevcut ekipmanlarla uygun yüzey düzgünlüğüne erişmek güç olduğundan, RCC kaplamaların yüksek hızlı trafik altında kullanılabilmesi için, birkaç santimetre beton

asfalt ile kaplanması gerekmektedir. Ayrıca, RCC kaplamalar, hazırlanırken sahip olduğu nem değişimine ve yetersiz sıkıştırmaya, beton asfalt kaplamalardan daha hassastır. RCC kaplamalar, beton asfalt kaplamalara göre daha çabuk trafiğe açılırlar. Ancak geleneksel betonla karşılaştırdığımızda daha kısa süre gerektirdiğini vurgulamak gerekir. RCC, özel bir yapım ekipmanı gerektirmediği ve geleneksel beton kaplamaya göre maliyeti az olduğu için düşük hızlı trafiğe hizmet verecek kaplamalar için uygun bir teknik olmaktadır. Geleneksel betonda kullanılan malzemelerle daha iyi mühendislik özelliklerine sahip kaplama yapılabilmektedir. Beton asfalt ile karşılaştırıldığında bir çok üstünlüğe sahiptir. Düzgünlük standardının sağlanması için üzerine çok ince beton asfalt yapılması gerekmesine rağmen, otoyollar ve birinci sınıf yolların yapımı için ekonomik bir seçenektir. Ön sıkıştırma işlemini daha iyi yapabilecek sericilerin geliştirilmesiyle, silindir geçiş sayısı azaltılacak, sürüş konforu artırılacaktır. (CAC, 2002; Watamabe-gumi Company, 2002).

3.8 SSB'nin Maliyeti

Beton asfalt kaplama, geleneksel beton kaplama ve SSB kaplamalarının ilk yapım maliyetleri Şekil 3.13.'te karşılaştırılmıştır. Beton asfalt kaplamanın ilk maliyeti düşük görünmesine rağmen beton kaplamaya göre daha sık bakım gerektirmesi toplam maliyetini artıracaktır (Edis,2007).



Şekil 3.13. Kaplama maliyetlerinin karşılaştırılması (Edis,2007).

BÖLÜM IV

MALZEME ÖZELLİKLERİ ve DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ile beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları, numune boyutları ve bu numuneler üzerinde yürütülen deneyler hakkında bilgi verilmektedir.

Bu tez çalışmasında, 63 µ elek altı ince malzeme miktarının silindirle sıkıştırılan yol betonlarının (SSB) özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda TS 706 EN 12620 (2009)'daki standart eğriler arasında kalan granülometriye sahip bir agrega seçilerek şahit karışım oluşturulmuştur. Daha sonra bu agrega grubunun 0 - 5 mm ince kısmından eksiltiilerek, yerine ince malzeme olarak toplam agreganın ağırlıkça %2, %4, %6, %10 ve %14'ü oranlarında 63 µ elek altı kalsit eklenerek toplam 6 farklı karışım hazırlanmıştır. Her bir karışımın optimum su muhtevası zemin sıkıştırma metoduna göre tespit edilmiştir. Tespit edilen optimum su muhtevalarına bağlı olarak her bir karışımın malzeme miktarları belirlenmiş ve üretilen SSB'lerin bazı mekanik özellikleri test edilmiştir.

4.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri

4.1.1 Çimento

Bu çalışmada, Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası tarafından üretilen, TS EN 197-1 (2012) ile uyumlu CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilmiş ve çimento nem almayacak şekilde koruyucu kaplarda korunmuştur. Kullanılan çimentoya ait kimyasal özellikler Çizelge 4.1.'de, fiziksel özellikler ise Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Bu değerler ÇİMSA Niğde Çimento Fabrikası'ndan alınmıştır.

Çizelge 4.1. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal analiz	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cl	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	K.K
Analiz sonuçları (%)	20.33	5.35	3.15	62.11	1.50	0.02	3.30	0.65	0.95	2.01

Çizelge 4.2. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

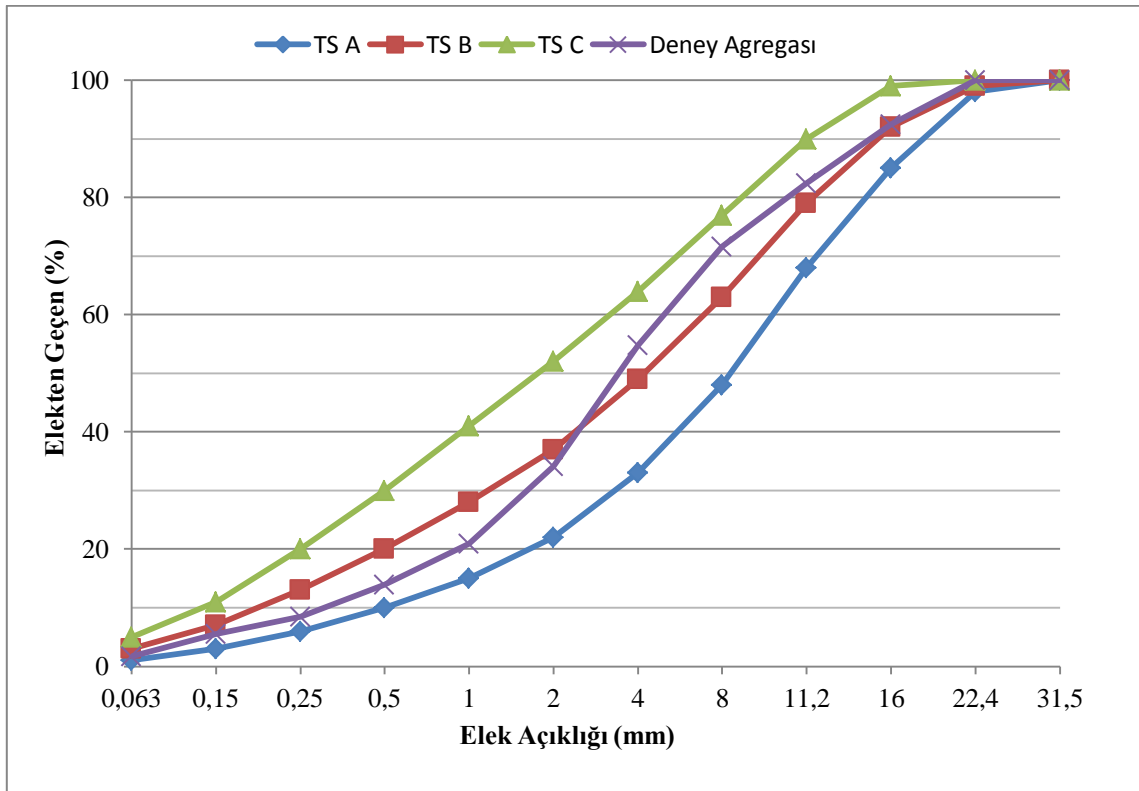
Çimentonun Fiziksel Özellikleri		
Özgül Ağırlık (gr/cm³)		3.11
Priz süresi	İlk (Dakika)	155
	Son (Dakika)	220
İncelik	Özgül Yüzey(cm ² /gr)	3450
	0.040 mm elek kalıntısı(%)	12.15
	0.090 mm elek kalıntısı(%)	0.85
Basınç Dayanımı (N/mm²) 7 günlük		39.02
Basınç Dayanımı (N/mm²) 28 günlük		46.21

4.1.2 Agregata

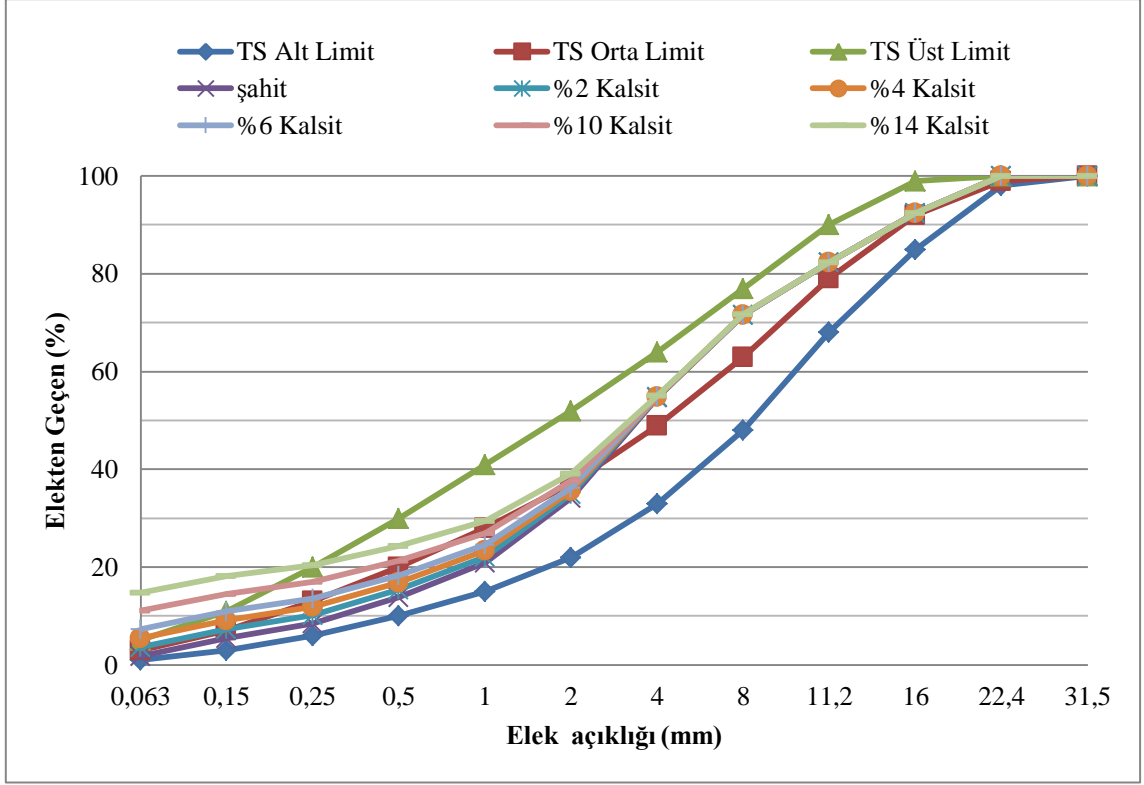
Deneysel çalışmalarda, Niğde Başmakçı Bölgesi'nden elde edilen kalker esaslı kırma taş agregata kullanılmıştır. Beton karışımında kullanılan agreganın maksimum tane çapı 16 mm'dir. Agreganın su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı TS EN 1097-6 (2002)'ya göre bulunmuş olup, ince ve iri agreganın özgül ağırlıkları sırasıyla 2,54 gr/cm³ ve 2,71 gr/cm³'dür. İnce ve iri agreganın su emme kapasiteleri % 1,4 ve % 0,8'dir. Karışımlarda şahit betonun hazırlanması için TS 706 EN 12620 (2009)'da belirtilen sınır değerlere uygun bir agregata gronulometrisi belirlenmiş ve bu agregata %2, %4, %6, %10 ve %14 oranlarında 63 µ elek altı ince malzeme olarak kalsit eklenmiştir. Eklenen ince malzeme oranında karışımdan ince agregata eksiltiştir. Karışımda kullanılan şahit betona ait agreganın elekten geçen miktarları ve TS 706 EN 12620 (2009)'da belirtilen en büyük tane çapı 16 mm olan agreganın sınır değerleri Çizelge 4.3.'te, bunlara ait granulometri eğrileri Şekil 4.1.'de ve tüm beton karışımlarını oluşturan agregaların granulometri eğrileri ise Şekil 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Şahit beton karışımında kullanılan agreganın eleklerden geçen miktarları

Elek açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)			Kullanılan agrega
	TS 706 EN 12620+A1 alt limit	TS 706 EN 12620+A1 orta limit	TS 706 EN 12620+A1 üst limit	
31.5	100	100	100	100
22.4	98	99	100	100
16	85	92	99	92.5
11.2	68	79	90	82.4
8	48	63	77	71.6
4	33	49	64	54.7
2	22	37	52	34.2
1	15	28	41	20.9
0.5	10	20	30	13.9
0.25	6	13	20	8.5
0.15	3	7	11	5.5
0.063	1	3	5	1.7



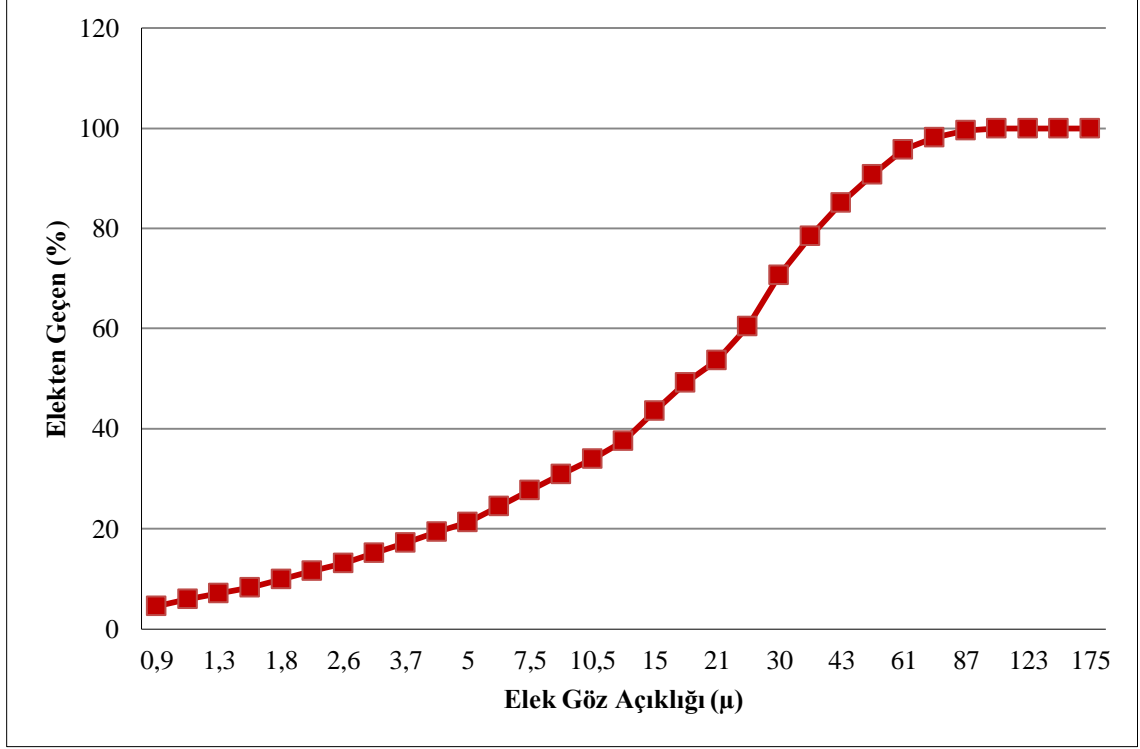
Şekil 4.1. Şahit betona ait agreganın granülometri eğrisi



Şekil 4.2. Kullanılan tüm karışımlara ait agregaların granülometri eğrisi

4.1.3 Kalsit

Çalışma kapsamında, 63µm elek altı malzeme olarak Niğde ilinde faaliyet gösteren NİĞTAŞ Mikronize Kalsit San. Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen kalsit kullanılmıştır. Kullanılan kalsitin granülometri eğrisi Şekil 4.3.'te verilmiştir. Kullanılan kalsitin özgül ağırlığı 2.60 gr/cm^3 'tür.



Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan kalsitin granülometri eğrisi

4.1.4 Karışım ve bakım suyu

Su betonun içerisinde iki önemli görev üstlenmektedir. Bunlardan birincisi; çimento ile birleşerek hidrasyonun (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların) yer almasını sağlamak, ikincisi ise, betonun karılma işleminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi sağlamaktır. Ayrıca kür suyu olarak, yerine yerleştirilmiş olan betonun yüzeyini ıslak tutup içerisindeki suyun buharlaşmasını önlemek, böylece betonun içerisinde kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli miktarda suyun bulunmasını sağlamak gibi bir görevi daha vardır. Beton üretiminde kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kür suyunun kalitesi, beton karışımında yer alacak suyun kalitesi kadar önemli olmasa da, kür suyu olarak kullanılacak suyun içinde de betonda zararlı kimyasal olaylara yol açacak veya betonun yüzeyinin lekelenmesine neden olabilecek yabancı maddelerin yer almaması gerekmektedir.

Deneylerde kullanılan karışım ve bakım suyu şehir şebekesinden alınan içme suyudur. Beton karışım ve bakım suyunun kalitesi ile ilgili özel bir Türk Standardı yoktur. Kaynaklarda karma suyu genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir (Erdoğan, 2007).

4.2 Optimum Su Miktarının Bulunması

SSB'un sıkıştırılabilirlik özelliği; karışımın serbest su içeriği, çimento ve puzolan içeriği, kum miktarı, maksimum agrega çapı, agrega dane boyut dağılımı ve kullanılan katkıların özellikleri gibi karışım parametrelerinden etkilenir. Bunlardan sıkıştırılabilirlik derecesini en fazla etkileyen parametre karışımın serbest su içeriğidir. Malzemenin bünyesinde bulunan su içeriği ancak optimum seviyeye ulaştığında, bu malzemeye uygulanacak bir enerjiyle elde edilebilecek maksimum sıkışılabilirliğe (maksimum kuru birim hacim ağırlık) ulaşılabilir. Çalışma kapsamında, bu nedenle kullanılan bütün agregalar, 100 ± 10 °C'lik fırında 24 saat bekletilerek, tamamen kuru(fırın kuru) haline getirilmiştir. Böylelikle her parti üretim de karışım su muhtevası hassasiyetle ayarlanabilmiştir. SSB yol kaplama karışımlarında karışım dizaynı için zemin sıkıştırma metodu kullanılmakta olup, bu çalışmada karışımların optimum su muhtevalarını belirlemek için TS 1900-1/T1 (2007)'e uygun olarak modifiye proktor test yöntemi kullanılmıştır

Karışımların optimum su muhtevası belirlenirken, Fotoğraf 4.1.'de görülen otomatik modifiye proktor deney aleti kullanılmıştır. 15.25 cm çapında, 12.80 cm yüksekliğinde, 5.842 kg ağırlığında ve ayrıca 5 cm yüksekliğinde bir yakaya sahip silindir biçimli modifiye proktor kabı kullanılmıştır. Yakası takıldıktan sonra beton 5 tabakada yerleştirilmiş ve her bir tabakaya 45 cm'lik düşüş yüksekliğinden, 4,5 kg ağırlığındaki tokmak 25 kez düşürülerek sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Otomatik modifiye proktor deney aleti kullanılarak darbelerin her tabaka yüzeyine eşit şekilde dağılması sağlanmıştır. 5. tabakanın sonunda yakanın aşılmasına dikkat edilmiştir. İçerisinde sıkıştırılmış malzeme bulunduran proktor kabının yakası çıkarılmış, sıkıştırılmış beton kabın üst seviyesinde düzeltilerek tartılmıştır. Su muhtevasını belirlemek için, kaptaki sıkışmış malzemenin alt ve üst kısmından numune alınarak etüve konulmuş ve tamamen kuruması için 100 ± 5 °C'de 24 saat bekletilmiştir. Deneye tahmini bir su içeriğine sahip beton karışımı ile başlanmış ve su içerikleri artırılarak deneye devam edilmiştir. Her bir

farklı su içeriklerine ait su muhtevası (%) değerleri (4.1) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\omega = \frac{W_{su}}{W_k} \quad (4.1)$$

ω : Su muhtevası (%),

W_w : Malzeme bünyesindeki su ağırlığı (gr),

W_k : Malzeme dane ağırlığı (gr).



Fotograf 4.1. Otomatik modifiye proktor deney aleti

Ardından betonun doğal birim hacim ağırlık (gr/cm^3) değerleri (4.2) eşitliği yardımıyla ve betonun kuru birim hacim ağırlık (gr/cm^3) değerleri (4.3) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\gamma_n = \frac{W_2 - W_1}{V} \quad (4.2)$$

γ_n : Sıkıştırılmış malzemenin yaş (doğal) birim hacim ağırlığı (gr/cm^3),

- W_1 : Kalıp ve tabanın ağırlığı (gr),
 W_2 : Kalıp, taban ve sıkıştırılmış malzeme ağırlığı (gr),
 V : Kalıbın iç hacmi (cm³).

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1+w} \quad (4.3)$$

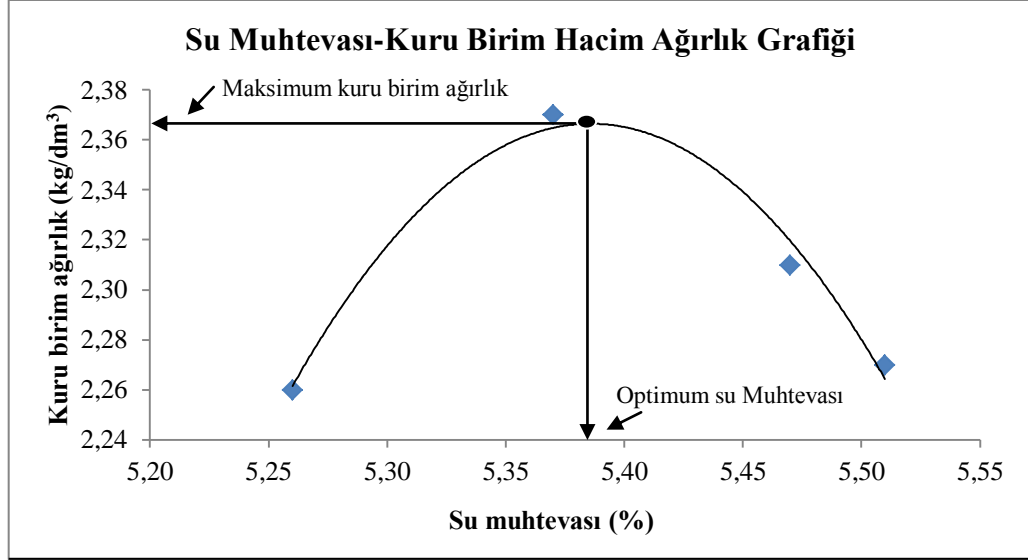
- γ_k : Malzemenin kuru birim hacim ağırlığı (gr/cm³),
 γ_n : Sıkıştırılmış malzemenin yaş (doğal) birim hacim ağırlığı (gr/cm³),
 w : Su muhtevası (%).

Optimum su muhtevası aşıldıktan sonra maksimum kuru birim ağırlığındaki düşüş, aynı enerjiyle sabit bir kap hacmindeki sıkışmış malzemenin ağırlığında düşüğe neden olacağından, bu durum gözlenene kadar malzemenin su muhtevası artırılarak deneye devam edilmiştir (Fotoğraf 4.2.).



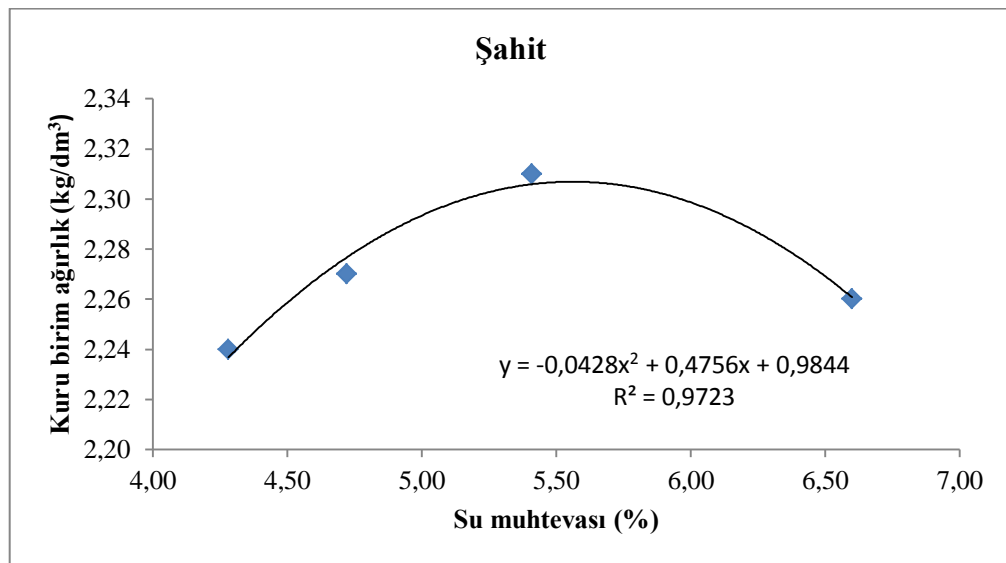
Fotoğraf 4.2. SSB'ların modifiye proktor deneyi yapılarak maksimum kuru birim ağırlığının belirlenmesi

Şekil 4.4.'te görülene benzer kuru birim ağırlık - su muhtevası grafiği elde edilmiş ve 2. mertebeden bir denklem oluşturulmuştur. Elde edilen denklem kullanılarak karışımların optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim ağırlıkları belirlenmiştir.

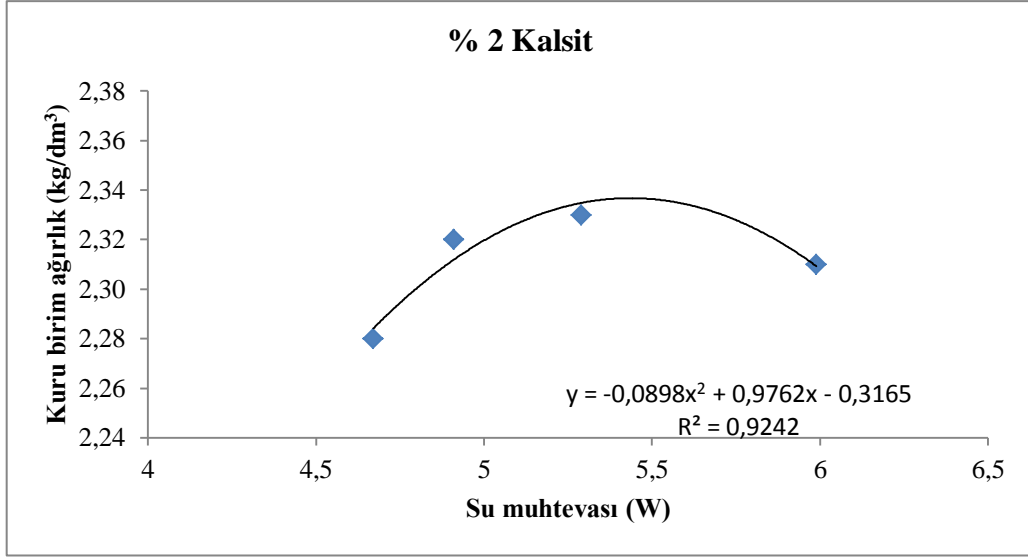


Şekil 4.4. Su muhtevası ile kuru birim ağırlık ilişkisi

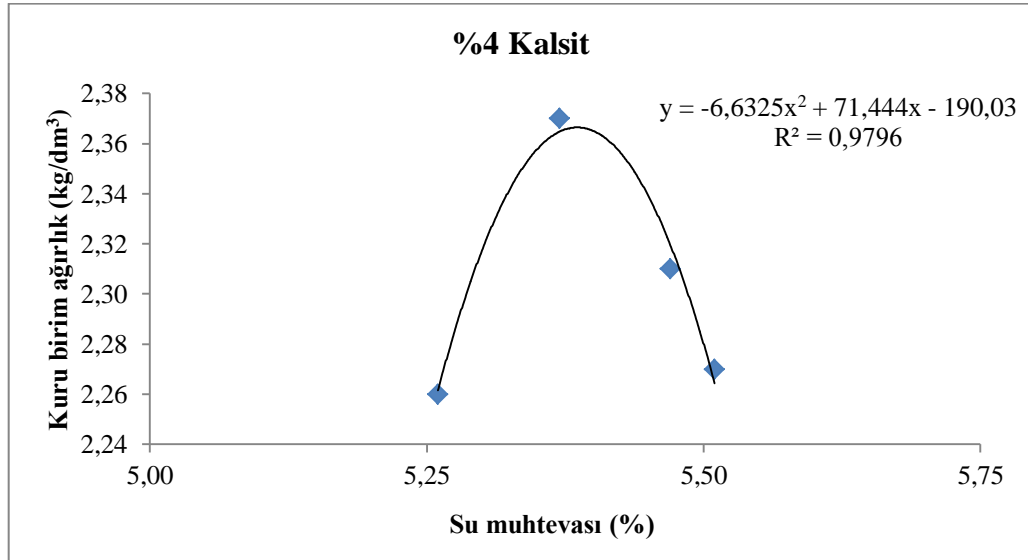
Bu çalışmada, aynı bağlayıcı miktarına sahip, şahit beton karışımına %2, %4, %6, %10 ve %14 oranlarında kalsit eklenerek, şahit dahil hazırlanmış altı ayrı beton karışımı için optimum su muhtevaları bulunmuştur. Bu karışımlara ait su muhtevası - kuru birim hacim ağırlık ilişkisi Şekil 4.5. – 4.10.'da verilmiştir.



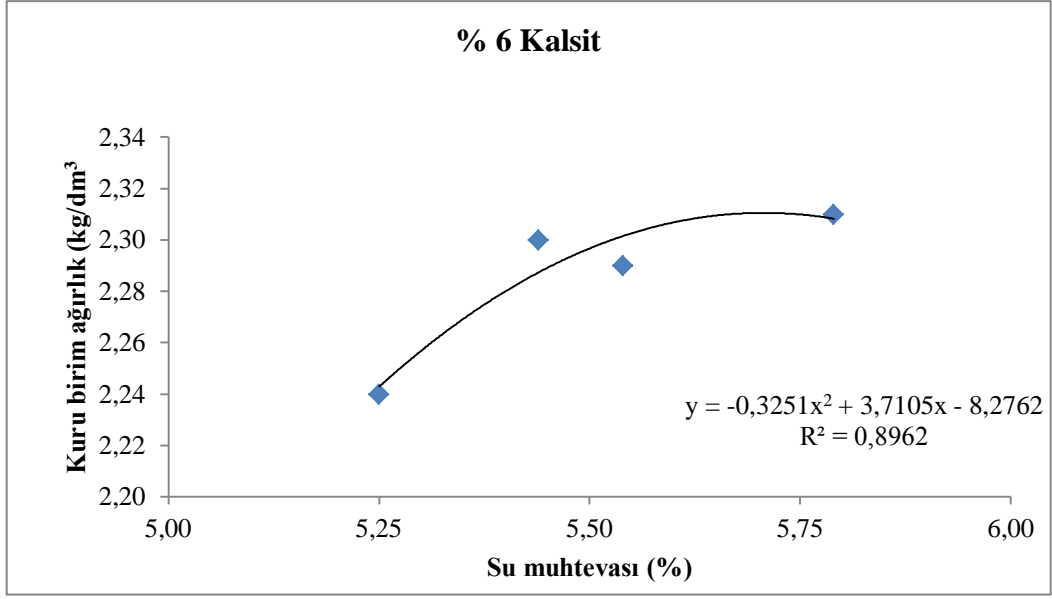
Şekil 4.5. Şahit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi



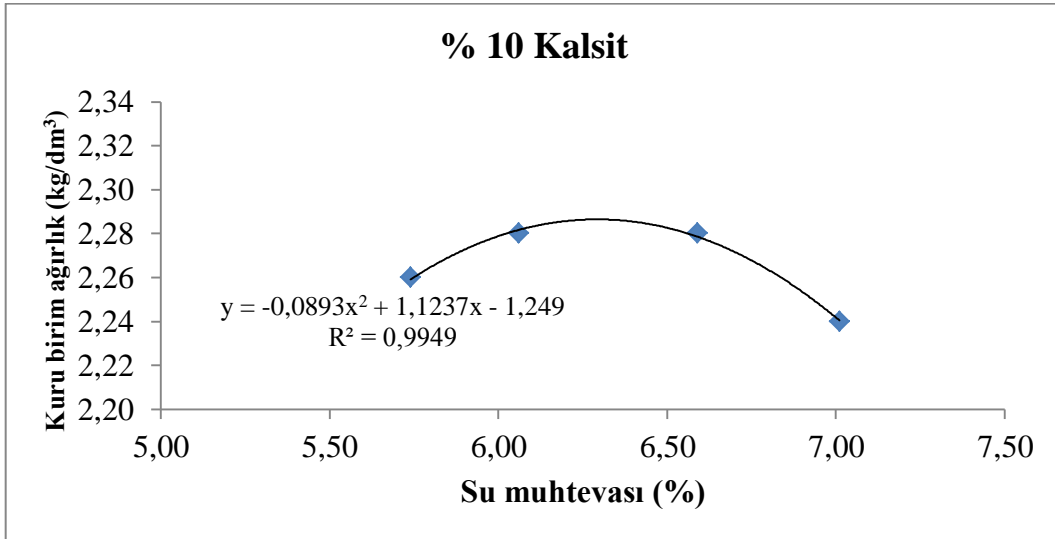
Şekil 4.6. %2 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi



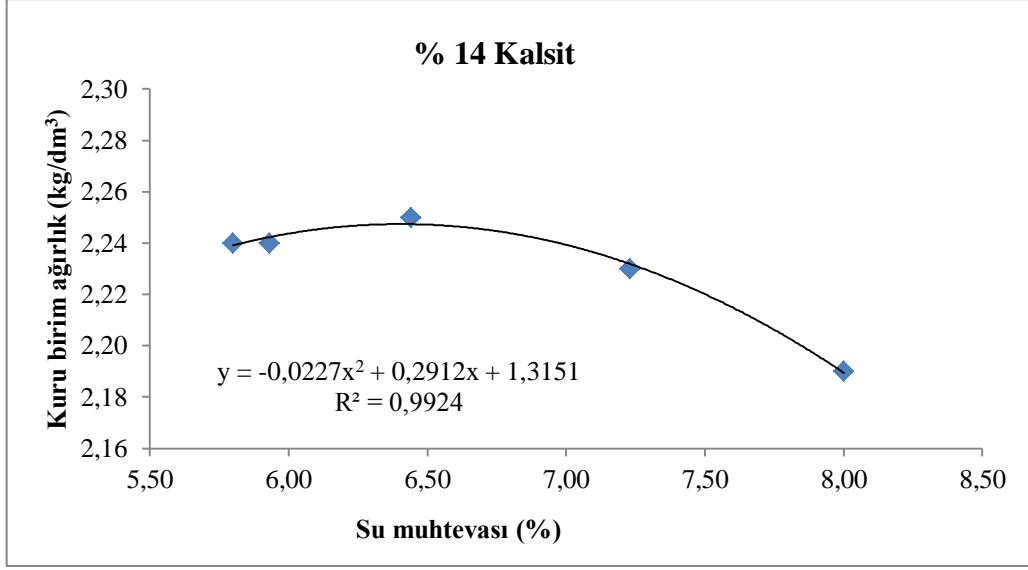
Şekil 4.7. %4 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 4.8. %6 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 4.9. %10 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 4.10. %14 Kalsit numune su muhtevası - kuru birim ağırlık ilişkisi

Şekil 4.5. – 4.10.’da ki su muhtevası - kuru birim hacim ağırlık ilişkileri verilen karışımların her biri için maksimum kuru birim hacim ağırlıklarındaki optimum su muhtevaları belirlenmiştir. Çizelge 4.4.’te her bir karışıma ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları verilmiştir.

Çizelge 4.4. Karışımlara ait optimum su muhtevası maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri

	Optimum su muhtevası (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kg/dm ³)
Şahit	5,56	2,31
%2 Kalsit	5,44	2,34
%4 Kalsit	5,39	2,36
%6 Kalsit	5,71	2,31
%10 Kalsit	6,29	2,29
%14 Kalsit	6,41	2,25

4.3 Beton Karışım Oranları

Çizelge 4.4.’te verilen optimum su muhtevaları kullanılarak her bir karışımın su / çimento malzeme oranları tespit edilmiştir. Şahit beton karışımı, %2, %4, %6, %10 ve %14 kalsit içeren beton karışımları sırasıyla SSB1, SSB2, SSB3, SSB4, SSB5 ve SSB6 olarak adlandırılmıştır. Hazırlanan beton karışımlarının 1 m³’ünü oluşturan malzeme

miktarları Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan agregalar 24 saat 100 ± 5 °C'de etüvde kurutulmuştur.

Çizelge 4.5. 1m^3 betonu oluşturan malzemelerin miktarları

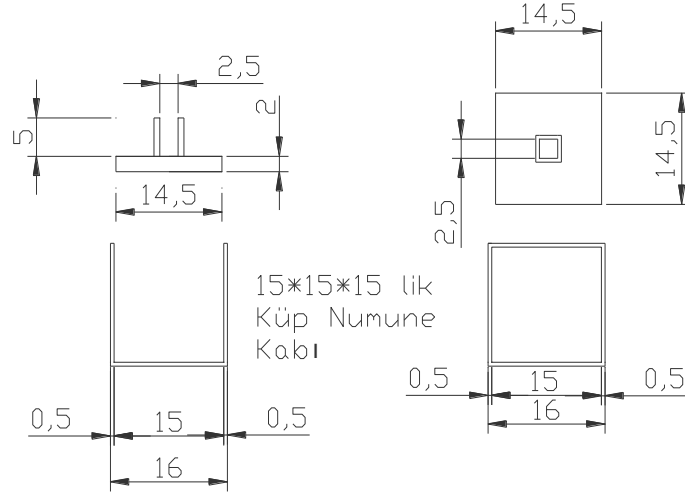
Karışım adı	Çimento (kg/m^3)	İnce agrega (kg/m^3)	İri agrega (kg/m^3)	Kalsit (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	S/Ç
SSB1	340	1082	894	0	129	0,38
SSB2	340	1045	898	40	126	0,37
SSB3	340	1008	898	79	126	0,37
SSB4	340	961	892	118	133	0,39
SSB5	335	871	882	195	144	0,43
SSB6	335	792	880	272	147	0,44

4.4 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Beton üretiminde, 50 dm^3 kapasiteli, düşey eksenli pan tipi beton mikseri kullanılmıştır. Beton mikserinin içerisine önce kaba, ince agregalar ve kalsit konularak karışım homojen hale gelinceye kadar mikser çalıştırılmıştır. Daha sonra çimento ilave edilmiş ve homojenlik sağlanıncaya kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak ta karma suyu karışıma mikser çalışır haldeyken yavaş yavaş ilave edilmiştir. Karışım yeterli kıvama ulaştıktan sonra, daha önceden hazırlanmış ve kalıp yağıyla yüzeyleri yağlanmış kalıplara yerleştirilmiştir. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımının tespiti için $150\times 150\times 150$ mm ebatlarında küp numuneler, eğilmede çekme dayanımının tespiti için $100\times 100\times 400$ mm ebatlarında kiriş numuneler, elastisite modüllerinin tespiti için 150×300 mm ebatlarında silindir numuneler ve aşınma dayanımının tespiti için ise $71\times 71\times 71$ mm ebatlarında küp numuneler hazırlanmıştır.

SSB'larda, kuru kıvamları nedeniyle yeterli yerleştirmenin sağlanabilmesi için normal betonlardan farklı olarak bir sıkıştırma enerjisi uygulanması gereklidir. Bu nedenle SSB'lar tabakalar halinde serildikten sonra, tabakaların sıkıştırılmasıyla imal edilirler. Bu çalışmada da SSB numuneleri hazırlanırken 11 kg ağırlığındaki Bosch GBH 11 DE tipi hilti ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında hilti ucuna uygun numune ebatlarına göre hazırlanmış bastırma plakası aparatlarından yararlanılmıştır. Numuneler tabakalar halinde sıkıştırılırken, her birinin en üst tabakasının sıkıştırılması esnasında, sıkıştırılmış üst tabaka ile numune yüksekliğini oluşturan kalıbının üst yüzeyi arasında kot farkı oluşmaması için ilave aparatlar kullanılmıştır.

150x150x150 mm ebatlarındaki küp numuneleri hazırlanırken, betonun kalıba yerleştirilmesi sırasında Şekil 4.11.'deki gibi bir aparat kullanılmıştır. Sıkıştırma işlemi 6 tabaka halinde ve her tabakada yaklaşık 20 sn titreşim uygulanmak suretiyle yapılmış olup Fotoğraf 4.3.'te görülmektedir.

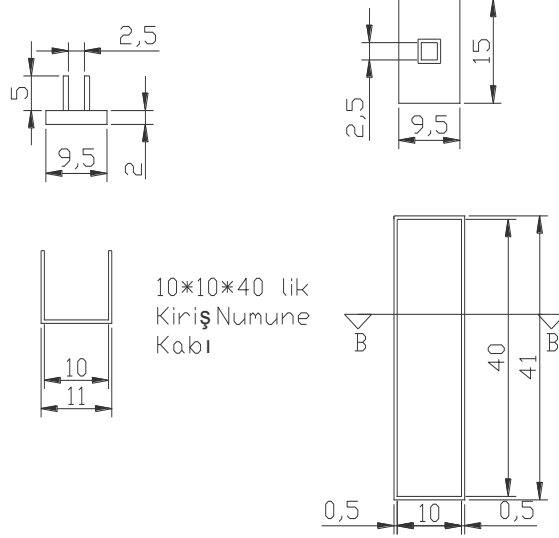


Şekil 4.11. 15 cm ebatlı küp numunenin sıkıştırma aparatı



Fotoğraf 4.3. 15 cm ebatlı küp numunenin sıkıştırma işlemi

100x100x400 mm ebatlarındaki kiriş numuneleri hazırlanırken, betonun kalıba yerleştirilmesi sırasında Şekil 4.12.'de görülen bir aparat kullanılmıştır. Sıkıştırma işlemi 3 tabaka halinde ve her tabakada yaklaşık 20 sn titreşim uygulanmak suretiyle yapılmış olup Fotoğraf 4.4.'de görülmektedir.

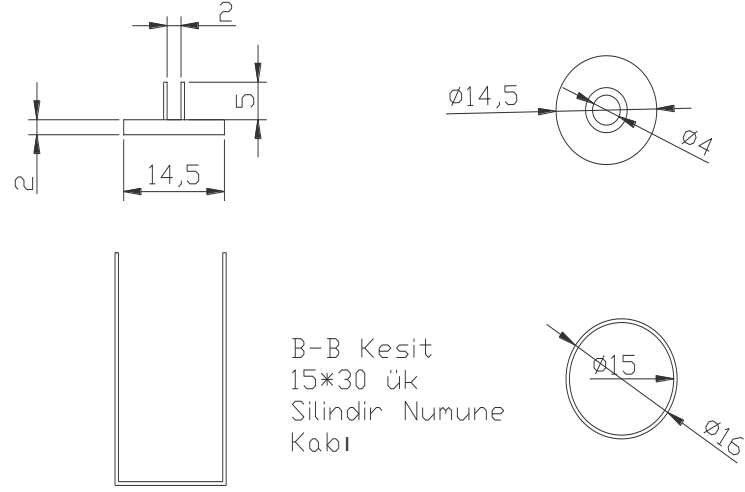


Şekil 4.12. Kiriş numune sıkıştırma aparatı



Fotoğraf 4.4. Kiriş numunenin sıkıştırma işlemi

150x300 mm ebatlarındaki silindir numuneleri hazırlanırken, betonun kalıba yerleştirilmesi sırasında Şekil 4.13.'de görüleni bir aparat kullanılmıştır. Sıkıştırma işlemi 8 tabaka halinde ve her tabakada yaklaşık 20 sn titreşim uygulanmak suretiyle yapılmış olup Fotoğraf 4.5.'te görülmektedir.

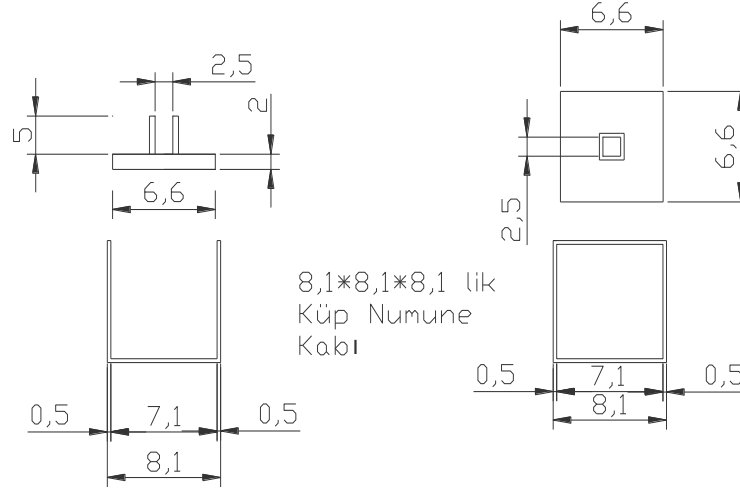


Şekil 4.13. Silindir numune sıkıştırma aparatı



Fotoğraf 4.5. Silindir numunenin sıkıştırma işlemi

71x71x71 mm ebatlarındaki küp numuneleri hazırlanırken, betonun kalıba yerleştirilmesi sırasında Şekil 4.14.'de görüleni bir aparat kullanılmıştır. Sıkıştırma işlemi 2 tabaka halinde ve her tabakada yaklaşık 20 sn titreşim uygulanmak suretiyle yapılmıştır.



Şekil 4.14. 7.1'lik küp numune sıkıştırma aparatı

SSB numuneleri sıkıştırıldıktan sonra nemini koruması sağlanarak, 24 saat süreyle kalıplarda bekletilmiş, kalıptan çıkarılan numuneler deney zamanına kadar 20 ± 2 °C'deki kür havuzunda korunmuştur.

4.5 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar

4.5.1 Taze beton birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Beton karışımlar taze haldeyken, sıkıştırılmış tüm numunelerin kalıplarıyla birlikte ağırlıkları ölçülmüştür. Böylelikle beton karışımlarının taze haldeyken, sıkıştırılmış malzeme ağırlıkları tespit edilmiştir.

4.5.2 Basınç dayanımının belirlenmesi

150x150x150 mm boyutlu beton küp numuneler, TS EN 12390-3'e (2010) uygun olarak 3., 7., 28., 90. ve 180. günlerde tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Basınç dayanım deneyinde her bir beton yaşı için 3 adet olmak üzere her bir karışım için toplam 15 adet küp numune üretilmiştir. Numuneler deney zamanına kadar 20 ± 2 °C kür havuzunda korunmuştur. Toplam olarak 90 adet küp numune üzerinde basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Deneyler, Fotoğraf 4.6.'da görülen 3000 KN kapasiteli basınç aletinde 0.5 MPa/sn yükleme hızı ile gerçekleştirilmiş ve basınç dayanım değerleri (4.4) eşitliği yardımıyla bulunmuştur.

$$f_{cc} = \frac{P}{A_c} \quad (4.4)$$

Burada:

f_{cc} :Basınç dayanımı

P :Preste kırılma anında okunan en büyük yük

A_c :Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı



Fotoğraf 4.6. Numunelerin basınç dayanımı test aleti

4.5.3 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi

Basınç dayanımları belirlenecek beton numunelerinin üzerinde, ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi amacıyla ASTM C 597-09'a (2009) uygun 0,1 μ s duyarlıklı ultrases aleti ile ses geçiş süreleri (t, μ s) ölçülmüştür. Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde mala yüzeyindeki pürüzlerin oluşturduğu boşlukları doldurmak amacı ile numunelerin alt ve üst yüzeylerine ultrason jeli sürülmüş 55 kHz'lik ses dalgaları gönderen ve alan iki transduser Şekil 4.15. ve Fotoğraf 4.6'de görüldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş, direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş süresi (t, μ s) okunmuştur. Problar numunenin düzgün diğer yüzeylerine de yerleştirilerek ikinci okuma alınmış,

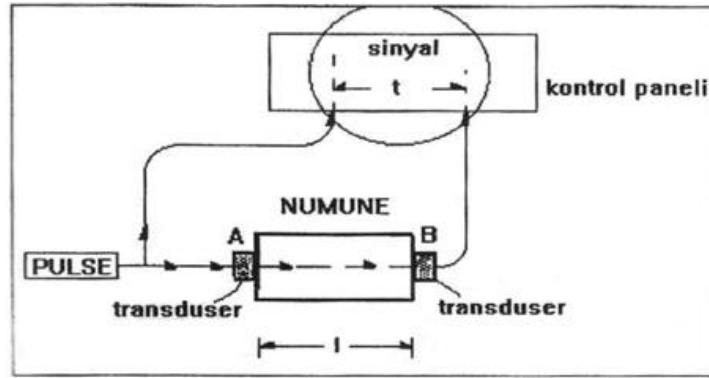
her numune için bu iki okumanın ortalaması alınıp (4.5) eşitliği kullanılarak ses geçiş hızı (V_s , km/saat) hesaplanmıştır.

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (4.5)$$

V_s : Ses geçiş hızı (km/saat)

L : Problar arası mesafe (mm)

t : Ses geçiş süresi (μ s)



Şekil 4.15. Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi



Fotoğraf 4.7. Numunelerin ultrases geçiş hızının belirlenmesi

4.5.4 Eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi

Eğilmede çekme dayanımı deneyleri, TS EN 12390-5 (2010) standardına uygun olarak 100x100x400 mm ebatlarında kiriş numuneler üzerinde 7. ve 28. günlerde yapılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı deneyinde her bir beton yaşı için 3 adet olmak üzere her bir karışımı için toplam 6 adet kiriş numune üretilmiştir. Numuneler deney zamanına kadar 20 ± 2 °C kür havuzunda korunmuştur. Toplam 36 adet kiriş numune üzerinde eğilmede çekme dayanım deneyi yapılmıştır. Eğilmede çekme dayanım deneyinde SSB örnekleri iki mesnet arasına yerleştirilmiş, makineye tam merkezlenerek, açıklık ortasından tekil yük uygulanarak eğilme momentine maruz bırakılmıştır. Deneyler, Fotoğraf 4.8.'de görülen 200 KN kapasiteli basınç aletinde 0.05 MPa/sn yükleme hızı ile gerçekleştirilmiş ve eğilmede çekme dayanımı değerleri (4.6) eşitliği yardımıyla bulunmuştur.



Fotoğraf 4.8. Eğilmede çekme dayanımı deney düzeneği

$$f_{cf} = \frac{3xFL}{2xd_1xd_2^2} \quad (4.6)$$

f_{cf} : Eğilme dayanımı (N/mm²)

F : En büyük yük (N)

L : Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm)

d_1, d_2 : Numune en kesit boyutları (mm)

4.5.5 Yarmada çekme dayanımının belirlenmesi

Yarmada çekme dayanım deneyleri, TS EN 12390-6 (2010) standardına uygun olarak 150x150x150 mm ebatlarında küp numuneler üzerinde 7. ve 28. günlerde yapılmıştır. Yarmada çekme dayanım deneyinde her bir beton yaşı için 3 adet olmak üzere her bir karışım için toplam 6 adet küp numune üretilmiştir. Numuneler deney zamanına kadar 20 ± 2 °C kür havuzunda korunmuştur. Toplam olarak 36 adet küp numune üzerinde yarmada çekme dayanımı deneyi yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımı deneyinde küp numuneler, uzunluğu boyunca dar bir alana, basınç yükü uygulanarak yüklenmiş ve yükleme doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme kuvveti sonucunda, oluşan çekme gerilmesinin etkisiyle numune kırılmıştır. Deneyler, Fotoğraf 4.9.'da görülen aparat yardımıyla 3000 KN kapasiteli basınç aletinde 0.05 MPa/sn yükleme hızı ile gerçekleştirilmiş ve basınç dayanım değerleri (4.7) eşitliği yardımıyla bulunmuştur.



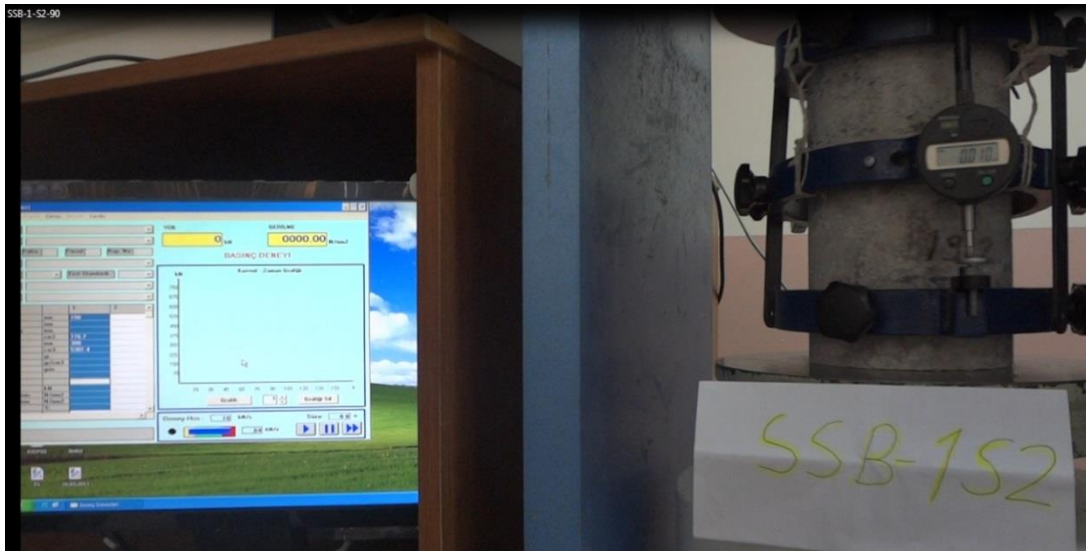
Fotoğraf 4.9. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği

$$f_{ct} = \frac{2xF}{\pi xLxd} \quad (4.7)$$

- f_{ct} : Yarma çekme dayanımı (N/mm²)
 F : En büyük yük (N)
 L : Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu(mm)
 d : Numunenin seçilen en kesit boyutu (mm)

4.5.6 Elastisite modülünün belirlenmesi

Elastisite modülü ölçümleri, TS EN 3502 (1981) standardına uygun olarak 150x300 mm ebatlarında silindir numuneler üzerinde 28. günde yapılmış olup, her bir karışım için 2 adet silindir numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülü ölçümleri için toplam 12 adet silindir numune üretilmiştir. Numuneler deney zamanına kadar 20±2 °C sıcaklıkta kür havuzunda korunmuştur. Deney öncesi numunelerin baş kısımlarında pürüzsüzlüğü sağlayabilmek için kükürt başlık yapılmıştır. Hazırlanan silindir numune üzerine yerleştirilen deplasman ölçücü cihazlarla birlikte kırılma deneyine tabi tutulmuştur. Deneyde 0.001 hassasiyette ölçüm yapabilen dijital komparatör kullanılmıştır. Deneyler, Fotoğraf 4.10.'da görülen 3000 KN kapasiteli basınç aletinde 0.5 MPa/sn yükleme hızı ile yapılmıştır.



Fotoğraf 4.10 Elastisite modülü ölçümü deney düzeneği

Kırılma deneyi esnasında her 50 kN'luk yük artışına karşılık gelen birim şekil değiştirme değerleri (4.8) eşitliği yardımıyla bulunmuştur. Bu birim şekil değiştirmeye karşılık gelen elastisite modülü değerleri ise (4.9) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.8)$$

Burada;

ε : Birim boy değişimi (mm/mm),

ΔL : Toplam boy değişimi (mm),

L : Numunenin orjinal(ilk) boyu (mm).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.9)$$

Burada;

E : Elastisite modülü (MPa),

σ : Gerilme değeri (MPa),

ε : Birim boy değişimi (mm/mm).

Statik elastisite modülü betonun gerilme birim Şekil değiştirme eğrisinin eğimi ile hesaplamaktadır. Betonun gerilme birim Şekil değiştirme eğrisi çok küçük gerilmeler altında doğrusallık göstermekle birlikte büyük bir bölümde doğrusal değildir. Bundan dolayı betonun statik elastisite modülünü doğrusal olmayan eğriden hesaplamak mümkün değildir. Ancak betonun elastisite modülünü belirleyebilmek için betondaki gerilme ile birim Şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişkinin var olduğu kabul edilmekte ve gerçek eğriyi temsil eden bir doğru çizgi çizilerek elastisite modülü eğimden hesaplanabilmektedir. Bu Şekilde elastisite modülünün hesaplandığı 4 yöntem bulunmaktadır. Bunlar başlangıç teğet yöntemi, teğet yöntemi, sekant yöntemi ve kiriş yöntemidir (Erdoğan, 2007).

Bu çalışmada elastisite modülü değerleri sekant yöntemi ile belirlenmiştir. Sekant yöntemi ile elastisite modülü, en büyük gerilmenin % 40'na ait değerin, gerilme birim Şekil değiştirme eğrisine karşılık gelen noktasından başlangıç noktasına çizilen teğetin eğimi hesaplanarak bulunmuştur.

4.5.7 Aşınma dayanımının belirlenmesi

Beton numunelerinin aşınma direncinin belirlenmesinde Böhme yüzey aşınma yöntemi kullanılmıştır. Böhme aşınma deneyi, TS 2824 EN 1338, (2005) standardına uygun olarak 71x71x71 mm ebatlarında küp numuneler üzerinde 28. ve 90. günlerde yapılmıştır. Böhme yüzey aşınma deneyinde her bir beton yaşı için 3 adet olmak üzere her bir karışım için toplam 6 adet küp numune üretilmiştir. Numuneler deney zamanına kadar 20 ± 2 °C kür havuzunda korunmuştur. Toplam olarak 36 adet küp numune üzerinde Böhme yüzey aşınma deneyi yapılmıştır (Fotoğraf 4.11.). Beton küp numunelerinin deney sonrasındaki aşınma miktarını belirlemek amacıyla deney öncesi ve sonrasında ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Aşınma değerleri (4.10) eşitliği yardımıyla ağırlıkça bulunmuştur.

$$\Delta_M = \frac{M_{ilk} - M_{son}}{M_{ilk}} \times 100 \quad (4.10)$$

Δ_M : Toplam kütle kaybı (%)

M_{ilk} : Deneye başlamadan önceki kütle (gr)

M_{son} : Deney sonrası kütle (gr)



Fotoğraf 4.11. Böhme aşınma deneyi yapılması

BÖLÜM V

DENEY SONUÇLARI BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında ince malzeme miktarının, silindirle sıkıştırılan yol betonlarının (SSB) özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında maksimum tane çapı 63 µ olan kalsit, ince agrega ile toplam agreganın ağırlıkça %0, %2, %4, %6, %10 ve %14'ü oranlarında ikame edilerek, 6 farklı karışım hazırlanmıştır. Her bir karışımın optimum su muhtevası zemin sıkıştırma metoduna göre tespit edilmiştir. Tespit edilen optimum su muhtevalarına bağlı olarak, her bir karışımın s/ç oranları saptanmak suretiyle karışımların malzeme miktarları belirlenmiştir.

Üretilen SSB karışımlarının taze beton birim hacim ağırlıkları, basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme dayanımları, ultrases geçiş hızları, elastisite modülleri ve aşınma dayanımları belirlenmiştir. Bu deneyler için çalışmaya kapsamında toplam 126 adet 150x150x150 mm ebatlarında küp numune, 36 adet 100x100x400 mm ebatlarında kiriş numune, 12 adet 150x300 mm ebatlarında silindir numune ve 36 adet 71x71x71 mm ebatlarında küp numuneler kullanılmıştır.

5.1 Taze Beton Birim Hacim Ağırlıkları

Şahit karışım ve %2, %4, %6, %10 ve %14 kalsitli olmak üzere toplam 6 karışımın, geoteknik yaklaşımla tespit edilmiş olan kuru birim ağırlık - su muhtevası grafiklerinden 2. mertebeden bir denklem oluşturularak elde edilen denklem kullanılarak, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim ağırlıkları belirlenmiş ve Çizelge 4.4'te verilmişti. Beton karışımlarının taze haldeyken, sıkıştırılmış malzeme ağırlıkları tespit edilmişti. Her bir karışım için taze betonun maksimum yaş(doğal) birim hacim ağırlık değerleri (4.3) eşitliği yardımıyla hesaplanmış ve Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Karışım betonlarına ait optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve maksimum yaş birim hacim ağırlık değerleri

Karışım Adı	Optimum su muhtevası (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kg/dm³)	Maksimum yaş birim hacim ağırlık (kg/dm³)
SSB1	5,56	2,31	2,43
SSB2	5,44	2,34	2,46
SSB3	5,39	2,36	2,47
SSB4	5,71	2,31	2,44
SSB5	6,29	2,29	2,43
SSB6	6,41	2,25	2,39

Çizelge 5.1.'de görüldüğü üzere SSB karışımlarında ince agrega yerine ikame edilen 63 µ elek altı kalsitin, şahit karışıma göre %2, %4 oranındaki ilavesinde; SSB'un optimum su muhtevası azalmakta, şahit karışıma göre %6, %10 ve %14 oranındaki ilavesinde; SSB'un optimum su muhtevası artış göstermektedir.

Çizelge 5.1.'de görüldüğü üzere SSB karışımlarında ince agrega yerine ikame edilen 63 µ elek altı kalsitin, şahit karışıma göre %2, %4 oranındaki ilavesinde; maksimum kuru ve ıslak birim hacim ağırlık değerleri artış göstermekte, şahit karışıma göre %6 oranındaki ilavesinde; maksimum kuru birim hacim ağırlık ve taze beton maksimum ıslak birim hacim ağırlık değeri şahit karışım değerindeki mertebelere dönmekte, şahit karışıma göre kalsitin %10 ve %14 oranındaki ilavesinde maksimum kuru birim hacim ağırlık ve taze beton maksimum ıslak birim hacim ağırlık değeri şahit karışım değerinden giderek azaldığı saptanmıştır.

Malzemedeki maksimum sıkışabilirlik; uygulanan belli bir sıkıştırma enerjisiyle, malzemenin optimum su muhtevasında, dane arası boşluklarının yeterli mertebe kadar dolmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine ulaşmasıdır.

Çizelge 5.1.'de görülen durum şöyle açıklanabilir; ince agrega yerine ikame edilen kalsit, gradasyon açısından ince agregaya göre daha ince olduğundan karışımın daneler arası boşluklarını ince agregaya göre çok daha iyi doldurmakta ve sıkışabilirliği olumlu etkilemektedir. Uygulanan belli bir sıkıştırma enerjisinde, bu etki ile yeterli sıkışma değerine daha düşük optimum su muhtevasında ulaşılmaktadır. Böylelikle karışımda kalsitin ikame miktarı belli bir mertebeye ulaşınca kadar

maksimum kuru ve ıslak birim hacim ağırlık değerleri de artmaktadır. Karışımda kalsit ikamesinin sıkışabilirliğe bu olumlu etkisi; karışım agregasındaki kalsit ikamesi ile gradasyona bağlı doluluk oranını arttırmasıyla ortaya çıkmaktadır. Yeterli doluluk oranına ulaşılması ile bu olumlu etki ortadan kalkarak, kalsit ikamenin arttırılmasıyla ince agregaya göre inceliği(özgül yüzeyi) daha fazla olan kalsitin bu artışı karışımın optimum su muhtevasında ciddi artışa neden olmaktadır.

5.2 Basınç Dayanımı Değerleri

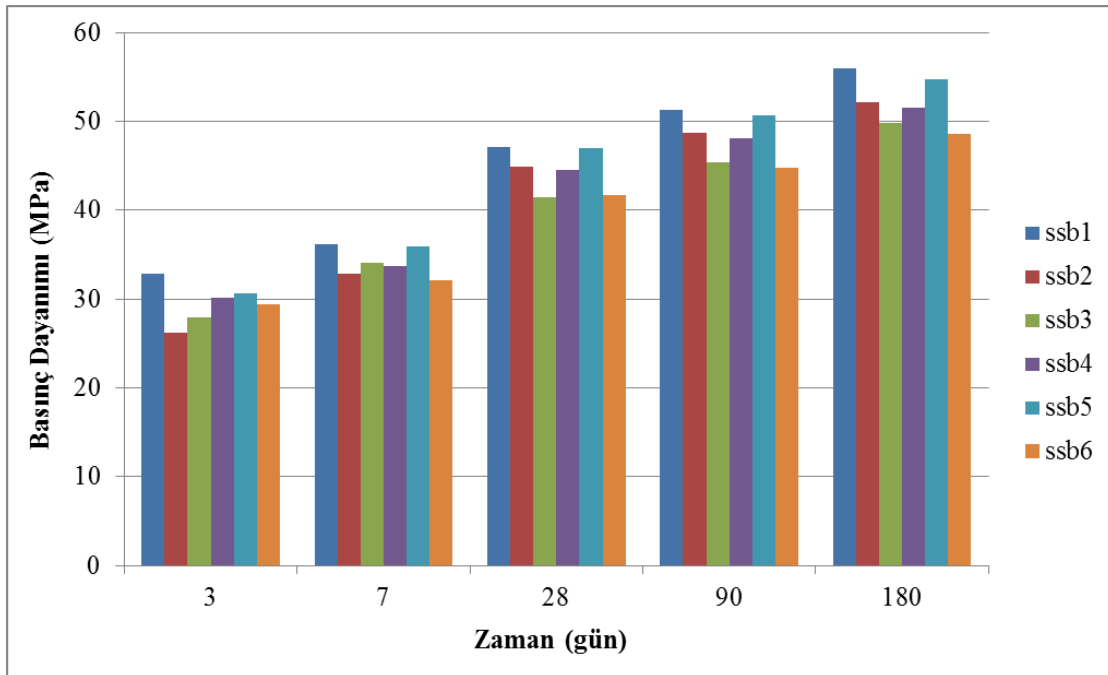
Deneysel çalışma kapsamında üretilen 6 farklı karışıma ait 3, 7, 28, 90 ve 180 günlük küp basınç dayanımı değerleri Çizelge 5.2. ve Şekil 5.1.'de verilmiştir. Çizelge 5.2. ve Şekil 5.1. incelendiğinde tüm karışımlar için numunelerin basınç dayanımlarının zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. Beton karışımlarının tamamında SSB1 numunelerine ait basınç dayanımları tüm günler için diğer beton karışımlarından daha büyüktür. İnce malzeme ilavesi ile birlikte basınç dayanımlarında bir azalma gözlemlenmiştir. SSB2, SSB3 ve SSB4 karışımlarının basınç dayanımı değerleri, tüm günler için SSB1'in basınç dayanımı değerlerinden düşük olmuştur. Ancak SSB5 karışımına ait basınç dayanımı değerleri 7. günden itibaren SSB1'in dayanım değerlerine oldukça yaklaşmıştır. SSB6 karışımının basınç dayanımı değerleri ise tekrar bir düşüş eğilimi göstermiştir. %10 ince malzeme ilave edilmiş olan SSB5 karışımının basınç dayanımı SSB1 ile birlikte en büyük basınç dayanımı değerine sahiptir. Yüzey düzgünlüğü ve işlenebilirliğin SSB5 karışımında SSB1 karışımına oranla daha iyi olduğunun gözlemlendiği de düşünüldüğünde SSB5 karışımının daha avantajlı olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Geleneksel betonlarda 3 günlük basınç dayanımı değeri 28 günlük basınç dayanımı değerinin yaklaşık %51 mertebesinde olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Baradan vd., 2012). Çalışma kapsamında üretilen numunelere ait bu oranlar %58 ile %70 arasında değişmektedir. Bu da göstermektedir ki; SSB numuneleri geleneksel betona kıyasla daha erken dayanım kazanmaktadır. Buradan SSB ile yapılan yol kaplamalarının daha kısa sürede trafiğe açılabileceği anlamına çıkmaktadır. Bu durum literatürde de belirtilmiştir (Ağar vd., 1998; Edis, 2007).

Numunelerin 28 günlük basınç dayanımları SSB1, SSB2, SSB3, SSB4, SSB5 ve SSB6 karışımları için sırasıyla 47.2, 44.9, 41.45, 44.6, 47.0 ve 41.7 MPa'dır. SSB yol kaplaması olarak dizayn edilen karışımların 28 günlük basınç dayanımları 27.6 MPa ile 69 MPa arasında değişmektedir (Halsted, 2005). Almanya'da SSB kaplamalar için önerilen basınç dayanımı 40 MPa olup, SSB ile yapılmış temeller için basınç dayanımı 30 MPa'dır (DOA, 1995; Ragan, 1988). İsveç'te ise sağlanması gerekli olan 28 günlük basınç dayanımı değeri 40 MPa'dır (Topçu, 2006). Çalışma kapsamında üretilen betonların tümü 28 günde 40 MPa'nın üzerine çıkarak, yukarıda farklı ülke şartnamelerinde verilen değerleri sağlamıştır.

Çizelge 5.2. Numunelerin 3, 7, 28, 90 ve 180 günlük ortalama basınç dayanım sonuçları

Numunelerinin Basınç Dayanımları (MPa)						
Gün	SSB1	SSB2	SSB3	SSB4	SSB5	SSB6
3	32.85	26.20	27.89	30.15	30.60	29.36
7	36.14	32.80	34.10	33.73	35.93	32.09
28	47.17	44.93	41.45	44.58	46.97	41.70
90	51.27	48.76	45.40	48.14	50.68	44.84
180	56.02	52.17	49.80	51.51	54.74	48.60



Şekil 5.1. Numunelerin 3, 7, 28, 90 ve 180 günlük ortalama basınç dayanım sonuçları

5.3 Ultrases Geçiş Hızları

Bir malzemenin ultrases geçiş hızı o malzemenin boşluk yapısına, dolayısıyla yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır (Akçaözoğlu vd., 2013). Betonun kompasitesi ve yoğunluğu azaldıkça ultrases geçiş hızı değer de azalmaktadır (Whitehurst, 1951; Zoldners, 1971). Çalışma kapsamında üretilen numunelerin ultrasonik ses hızları ölçülmüş ve Çizelge 5.3.'te verilmiştir. Neville ve Brooks (1987) ile Jones ve Gatfield (1955) normal betonlarda, iyi kalitedeki bir betonun ultrases geçiş hızınının 4.1 km/s - 4.7 km/s arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında üretilen SSB numunelerin ultrases geçiş hızları 4.7 km/s – 5.1 km/s arasında değişmektedir. SSB numunelerin su / çimento oranlarının normal betonlardan daha düşük olması ve numunelerin hazırlanması esnasında büyük bir enerji uygulanarak iyi sıkışmış yoğun bir beton elde edilmesi, ultrases geçiş hızlarınının normal betonlara göre daha fazla olmasına sebep olmuştur.

Çizelge 5.3. incelendiğinde ultrases geçiş hızlarınının karışımın içeriğine ve zamana bağlı bir değişim göstermediği, değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin tüm numunelerin optimum su muhtevalarına göre hazırlanmış olmalarıyla ideal sıkışma miktarına aynı oranlarda ulaşmaları ve boşluk yapılarının benzerlik göstermelerinden kaynaklandığı düşünölmektedir. Ultrases geçiş hızlarınının karışımın içeriğine ve zamana bağlı bir değişim göstermemesinden dolayı basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı arasında bir ilişki kurulamamıştır.

Çizelge 5.3. Numunelerin ultrases geçiş hızları

Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları (Km / s)					
Karışım Adı	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün	180 gün
SSB1			5.2	5.0	5.0
SSB2		5.1	4.9	4.9	5.1
SSB3		4.8	5.0	4.8	4.7
SSB4		4.9	5.1	5.1	5.1
SSB5	4.9	5.1	5.1	4.9	5.0
SSB6	4.8	4.9	5.1	4.8	4.7

5.4 Eğilmede Çekme Dayanımı Değerleri

Çekme dayanımı geleneksel beton kaplama dizaynında ve silindirle sıkıştırılmış beton kaplama dizaynında en önemli anahtar parametredir (Gauthier and Marchand, 2005). Deneysel çalışma kapsamında üretilen 6 farklı karışıma ait 7, 28 günlük kiriş numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerleri Çizelge 5.4. ve Şekil 5.2.'te verilmiştir. Çizelge 5.4. ve Şekil 5.2. incelendiğinde tüm karışımlar için numunelerin eğilmede çekme dayanımlarının zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. SSB3'ün 28 günlük eğilmede çekme dayanımı değeri hariç, beton karışımlarının tamamında SSB1 numunelerine ait eğilmede çekme dayanımları tüm günler için diğer beton karışımlarından daha büyüktür. İnce malzeme ilavesi ile birlikte eğilmede çekme dayanımlarında SSB1'e göre SSB2'de bir azalma gözlemlenmiştir. SSB3'te eğilmede çekme dayanım değerleri SSB2'ye göre artış gösterirken, SSB3'ün 28 günlük eğilmede çekme dayanımı SSB1'ide aşmıştır. SSB3'ten sonra eğilme çekme dayanımı tekrar düşüş eğilimine girmiş, SSB4, SSB5 ve SSB6'da bu düşüş devam etmiştir.

Numunelerin 28 günlük eğilmede çekme dayanımları SSB1, SSB2, SSB3, SSB4, SSB5 ve SSB6 karışımları için sırasıyla 7.2, 6.5, 7.4, 6.8, 6.5 ve 6.3 MPa'dır. %4 ince malzeme ilave edilmiş olan SSB3 karışımının 28 günlük eğilmede çekme dayanımı en büyük eğilmede çekme dayanımı değerine sahiptir. Agregada çimento harcı ara yüzeyi dayanımının, beton basınç dayanımı üzerinde nispeten küçük, çekme dayanımı üzerinde ise oldukça önemli bir etkisi vardır. Ara yüzeyin basınç dayanımı üzerinde %10-15 civarında bir etkisi varken, çekme dayanımı üzerinde %40 gibi önemli bir miktarda etkisi vardır (Baradan, 2012). Deneysel çalışmada, eğilmede çekme dayanımının SSB1 karışımından daha yüksek bir değere ulaşması; karışım içerisindeki ince malzeme miktarının optimum düzeyde artırılmasıyla, daha boşluksuz bir agregada çimento ara yüzeyi elde edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

SSB'nin mekanik direnci; eğilme deneyinde dikdörtgen kesitli prizmatik numuneler üzerinde ölçülür ve en az 4.5 Mpa olmalıdır (Ağar vd., 1998). Halsted (2005) ise SSB'nin 28 günlük eğilmede çekme dayanımı 3.4 MPa ile 6.9 MPa arasında değiştiğini belirtmiştir. Çalışma kapsamında üretilen betonların en düşük eğilmede

çekme dayanımı 6.3 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer üretilen betonların SSB yol kaplaması olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

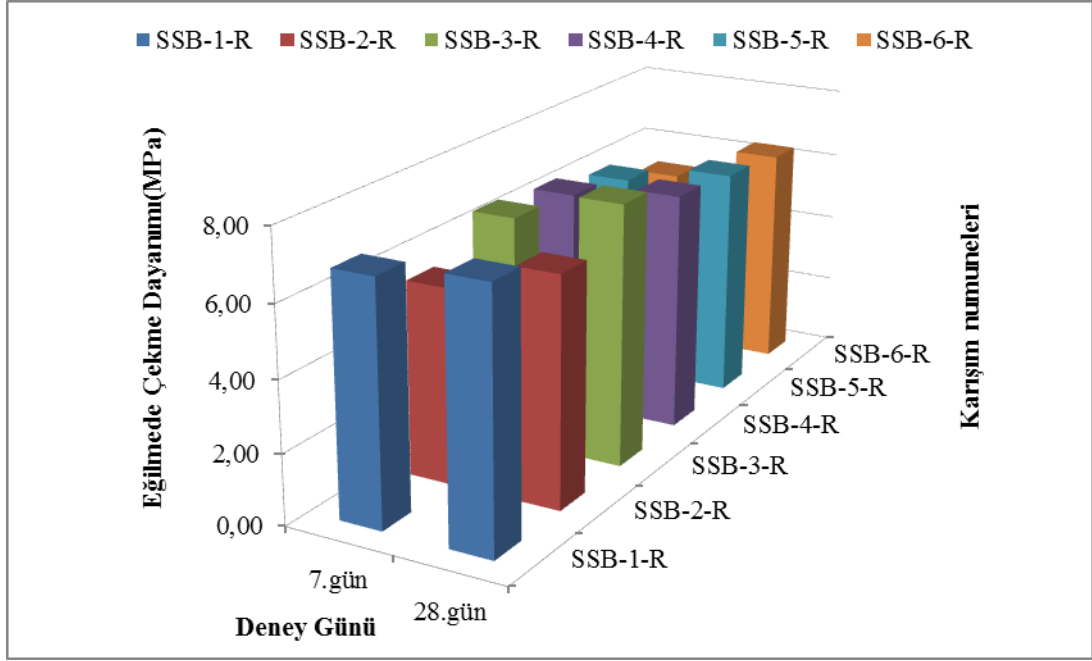
Uygun dizayn edilmiş SSB karışımının çekme dayanımı genel olarak geleneksel betonun çekme dayanımından daha yüksektir. SSB'nin bu performansı direk olarak sıkışmış yoğun agregaların kullanılmasıyla ilişkilidir. Yoğun sıkışmış agregaların kullanılması ile çatlak artışına engel olunmaktadır (Gauthier and Marchand, 2005)

Normal dayanımlı betonun eğilmede çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık %10 civarındadır. Ancak SSB'lerde bu oran %20'ye kadar yükselebilmektedir (Üte, 2008).

Yapılan çalışmada 7 ve 28 günlük Eğilme/Basınç Dayanımı oranları ortalaması sırasıyla %17.7 ve %15.3 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.4. Numunelerin 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımları ve eğilmede çekme / basınç dayanım sonuçları

Karışım Adı	Eğilmede Çekme Dayanımları (MPa)		Eğilmede Çekme / Basınç Dayanımı (%)	
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün
SSB1-R	6.80	7.22	18.82	15.31
SSB2-R	5.51	6.45	16.80	14.36
SSB3-R	6.52	7.40	19.12	17.64
SSB4-R	6.32	6.76	18.74	15.16
SSB5-R	5.94	6.54	16.53	13.92
SSB6-R	5.26	6.32	16.39	15.16
		Ortalama	17.73	15.26



Şekil 5.2. Numunelerin 7 ve 28 günlük numunelerin eğilmede çekme dayanım sonuçları

5.5 Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri

Çekme dayanımının, geleneksel beton kaplama dizaynında ve silindire sıkıştırılmış beton kaplama dizaynında önemli bir parametresi olduğu daha önce belirtilmişti (Gauthier and Marchand, 2005). Deneysel çalışma kapsamında üretilen 6 farklı karışıma ait 7, 28 günlük küp numunelerin yarma deneyi sonuçları Çizelge 5.5. verilmiştir. Çizelge 5.5. incelendiğinde eğilmede çekme dayanımına benzer şekilde tüm karışımlar için numunelerin yarmada çekme dayanımlarının zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. SSB4'ün 7 günlük yarmada çekme dayanımı değeri hariç, beton karışımlarının tamamında SSB1 numunelerine ait yarmada çekme dayanımları tüm günler için diğer beton karışımlarından daha büyüktür. İnce malzeme ilavesi ile birlikte yarmada çekme dayanımlarında SSB1'e göre SSB2 ve SSB3'ün yarmada çekme dayanımlarının azalarak devam ettiği görülmüştür. SSB4'e ait yarmada çekme dayanımı SSB3'e göre artış göstermiş, bu artışın SSB1'e yaklaşacak değerde olduğu görülmüş, 7 günlük dayanım değeri ise SSB1'in dayanım değerini yakalamıştır. SSB5 ve SSB6'ya ait yarmada çekme dayanımı değerleri ise tekrardan düşme eğilimine girmiştir.

Numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımları SSB1, SSB2, SSB3, SSB4, SSB5 ve SSB6 karışımları için sırasıyla 3.4, 3.0, 2.5, 3.1, 3.0 ve 2.8 MPa'dır. Çeşitli araştırmacılar silindirle sıkıştırılmış kaplama betonlarında olması gereken en düşük yarmada çekme dayanımı değerlerini şu şekilde belirtmişlerdir; Fransa ve İspanya'da yarmada çekme dayanımının 3.3 MPa olması gerektiği, düşük hacimli yollar için ise 2.8 MPa'ın yeterli olacağı açıklanmıştır. Almanya'da SSB kaplamalar için önerilen yarmada çekme dayanımı 3.0 MPa, SSB ile yapılmış temeller için yarmada çekme dayanımı 2.7 MPa'dır (DOA, 1995; Ragan, 1988). SSB'nin mekanik direnci; silindir numunelerde yarmada çekme deneyinde en az 2,8 Mpa olmalıdır (Ağar vd., 1998). Delatte vd., (2003), ACI Committee 325'e göre SSB'nin 28 günlük yarmada çekme dayanımının 2.75 MPa ile 4.14 MPa arasında değiştiğini belirtmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen bulgular incelendiğinde SSB1 karışımının yarmada çekme dayanımının yukarı belirtilen tüm kriterleri sağladığı görülmektedir. SSB2, SSB4 ve SSB5 karışımları Fransa ve İspanya'ya ait kriterler dışında yukarıda belirtilen diğer kriterleri sağladığı görülmektedir.

Uygun dizayn edilmiş SSB karışımının çekme dayanımının genel olarak geleneksel betonun çekme dayanımından daha yüksek olduğu daha önce belirtilmişti. 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 (Koçak, 1998). Ancak aynı kalitedeki betondan üretilmiş olan numunelere değişik deney yöntemlerinin uygulanması sonucunda birbirinde farklı çekme dayanımı değerleri elde edilmektedir. Yapılan çalışmalarda eğilmede çekme dayanımı değerinin en büyük, doğrudan çekme dayanımı değerinin en küçük ve yarmada çekme dayanımı değerinin ise ikisinin arasında bir değer aldığı belirtilmektedir(Baradan, 2012; Erdoğan, 2007). Bu çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmada yarma dayanımının basınç dayanımı oranları 7 günlük numuneler için 6.9 ile 9.2 arasında, 28 günlük numuneler için ise 5.8 ile 7.1 arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan çalışmada 7 ve 28 günlük yarma dayanımının basınç dayanımı oranlarının ortalaması sırasıyla %8.2 ve %6.7 olarak belirlenmiştir. 7 günlük dayanım oranlarının 28 günlük dayanım oranlarından daha fazla çıkmasının sebebi aşağıda açıklanmıştır. Çekme dayanımı basınç dayanımından daha yavaş artar, dolayısıyla çekme dayanımının basınç dayanımına oranı zamanla azalır (Baradan, 2012).

Çizelge 5.5. Numunelerin 3 ve 28 günlük yarma çekme dayanımları ve yarma çekme / basınç dayanım sonuçları

Karışım Adı	Yarma Çekme Dayanımları (MPa)		Yarma Çekme/ Basınç Dayanımı İlişkisi (%)	
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün
SSB1	3.09	3.37	8.86	7.14
SSB2	2.84	3.05	8.67	6.79
SSB3	2.36	2.45	6.92	5.84
SSB4	3.11	3.14	9.22	7.04
SSB5	2.89	3.03	8.04	6.45
SSB6	2.44	2.77	7.59	6.64
		Ortalama	8.17	6.65

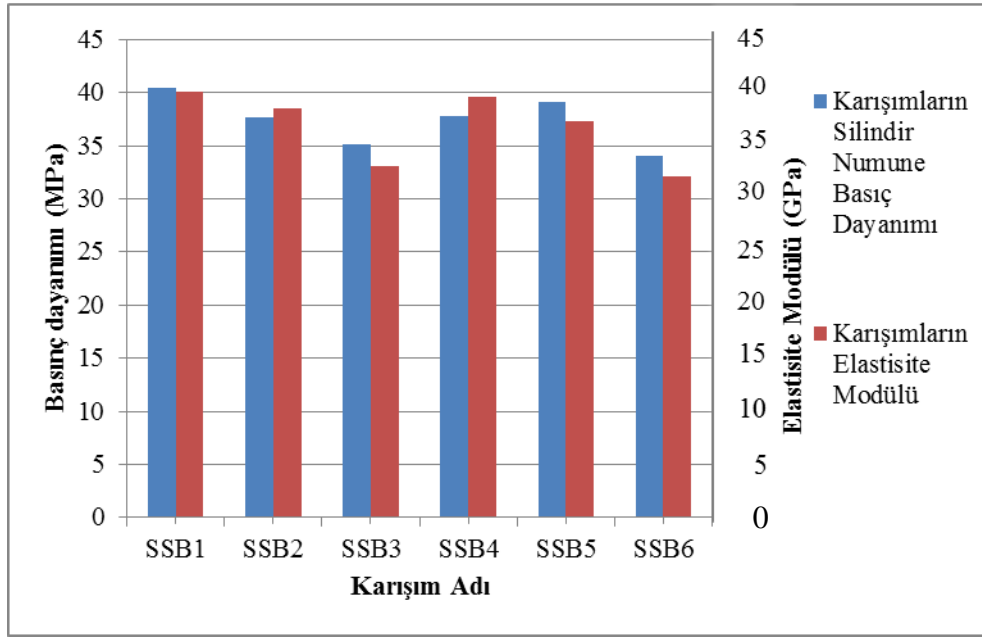
5.6 Elastisite Modülü Değerleri

Deneysel çalışma kapsamında üretilen 6 farklı karışıma ait 28 günlük silindirik numune basınç dayanımı ve sekant elastisite modülü değerleri Çizelge 5.6. ve Şekil 5.3.'te sunulmuştur. Çizelge 5.6. ve Şekil 5.3. incelendiğinde SSB1 numunelerine ait basınç dayanımlarının diğer beton karışımlarından daha büyük olduğu görülmüştür. İnce malzeme ilavesi ile birlikte basınç dayanımlarında bir azalma gözlemlenmiştir. SSB2, SSB3 ve SSB4 karışımlarının basınç dayanımı değerleri, SSB1'in basınç dayanımı değerinden düşük olmuştur. Ancak SSB5 karışımına ait basınç dayanımı değeri, SSB1'in dayanım değerine oldukça yaklaşmıştır. SSB6 karışımının basınç dayanımı değeri ise tekrar bir düşüş eğilimi göstermiştir. Bu durum Bölüm 5.2'de sunulan küp numune basınç dayanımı değerlerine benzerlik göstermektedir.

Çizelge 5.6. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri

Karışım Adı	Basınç Dayanımları (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
SSB1	40.42	40.13
SSB2	37.65	38.52
SSB3	35.13	33.06
SSB4	37.76	39.57
SSB5	39.07	37.34
SSB6	34.02	32.11

SSB kaplamalarının 28 günlük elastisite modüllerinin 20 GPa ile 38 GPa arasında değiştiği literatürde belirtilmiştir (Halsted, 2005). Araştırma kapsamında üretilen numunelere ait elastisite modülü değerleri 40.13 GPa ile 32.11 GPa arasında değişmekte olup literatür ile uyum içerisinde. En büyük elastisite modülü değeri SSB1 ve en düşük elastisite modülü değeri ise SSB3 karışımında gözlemlenmiştir. İnce malzeme ilavesi ile elastisite modülü değerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak SSB4 karışımının elastisite modülü değeri SSB1'e oldukça yaklaşmıştır. Karışımların elastisite modülü ile basınç dayanımı değerleri birbirine paralellik göstermektedir.



Şekil 5.3. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımı - elastisite modülü arasındaki ilişki

5.7 Aşınma Dayanımı Değerleri

Yürütülen çalışma kapsamında hazırlanan SSB karışımlarının 28 ve 90 günlük Böhme yüzey aşınma direnci ölçülmüş ve ölçüm sonuçları Çizelge 5.7. ve Şekil 5.4.'de sunulmuştur. Çizelge 5.7. ve Şekil 5.4. incelendiğinde zamana bağlı olarak aşınma direncinin arttığı görülmektedir. Betonun hidrasyonunun zamanla devam etmesi aşınma direncinin artmasına neden olmaktadır. 90 günlük betonların aşınma dirençleri, 28 günlük betonların aşınma dirençlerine oranla % 4.1 ile % 7.6 arasında değişmektedir.

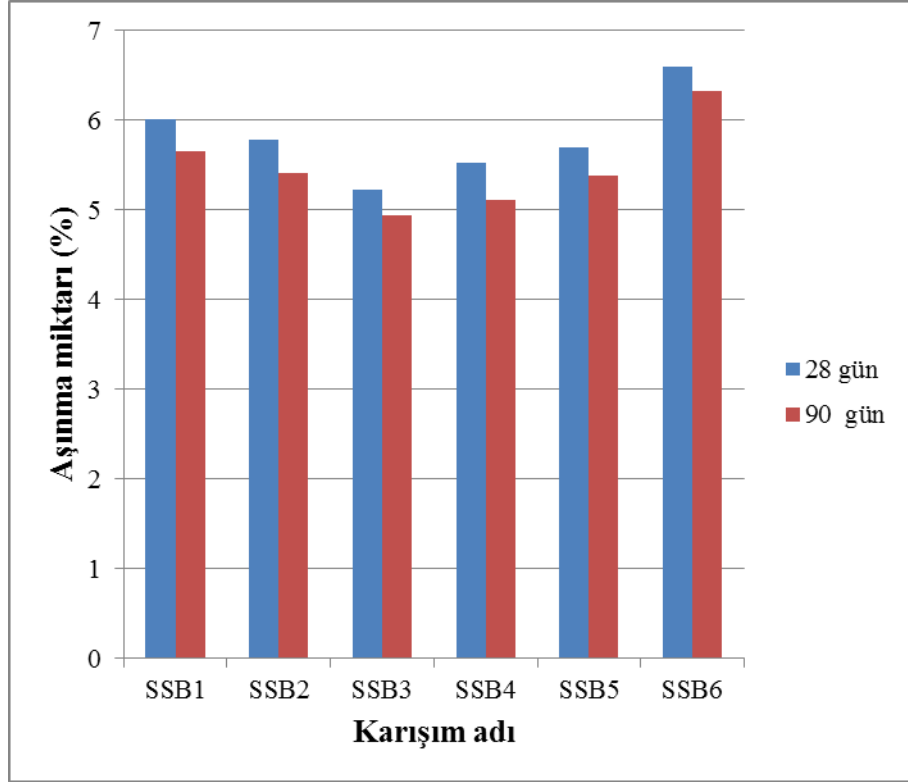
28 günlük ve 90 günlük SSB karışımlarının aşınma dayanımları incelendiğinde SSB3 karışımında en az aşınmanın meydana geldiği görülmektedir. İnce malzeme miktarının

%4 olduğu değerin maksimum aşınma direncini sağladığı sonucu çıkmıştır. Betonun aşınma direnci basınç dayanımı, agrega tipi ve özellikleri, kür şartları ve yüzey düzgünlüğü gibi bir çok faktördenden etkilenmektedir (Siddugue vd., 2012).

Yüzeyi yeteri kadar düzgün olmayan beton numunelerin aşınma direnci azalmaktadır. SSB numunelerin yüzey düzgünlükleri kullanılan ince malzeme miktarından etkilenmektedir. İnce malzeme miktarı az olan SSB numuneleri oldukça bozuk yüzeye sahip olmaktadır. SSB3 numunelerde yüzey yeterince düzgün hale geldiğinden aşınma direnci artmış, ince malzeme miktarı artan SSB4, SSB5 ve SSB6 numunelerinin yüzey düzgünlüğü SSB3'e göre daha iyi olmasına rağmen ince malzeme miktarının gereğinden fazla artmasıyla aşınma direncinde azalmalar görülmüştür. İnce malzemenin artmasının beton aşınma direncini azalttığı bilinmektedir (Siddugue vd., 2012).

Çizelge 5.7. Numunelerin 28 ve 90 günlük aşınma direnç oranları ve artış oranları

	28 gün (%)	90 gün (%)	Artış Oranı (%)
SSB1	6,01	5,65	6,0
SSB2	5,79	5,42	6,4
SSB3	5,23	4,94	5,5
SSB4	5,53	5,11	7,6
SSB5	5,7	5,39	5,4
SSB6	6,6	6,33	4,1



Şekil 5.4. Numunelerin 28 ve 90 günlük eğilme dayanım sonuçları

BÖLÜM VI

SONUÇ ve ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

- Üretilen SSB numunelerinin optimum su muhtevaları % 5.39 ile %6.41 arasında kalmıştır. SSB karışımlarında %2 ve %4 kalsit ikamesinde, SSB'nin optimum su muhtevası azalmakta, %6, %10 ve %14 oranındaki kalsit ikamesinde, optimum su muhtevası artış göstermektedir. Maksimum kuru ve ıslak birim hacim ağırlık değerleri ise optimum su muhtevasıyla ters orantılı olarak değişmektedir.
- Karışımlarda ince malzeme miktarının artması ile birlikte betonun sıkıştırılabilirliği olumlu etkilenmekte olup, uygulanan belli bir sıkıştırma enerjisinde, bu etki ile yeterli sıkışma değerine daha düşük optimum su muhtevasında ulaşılmaktadır. Bu olumlu etki, karışım agregasındaki gradasyona bağlı yeterli doluluk oranına ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Sonrasında bu olumlu etki ortadan kalkmakta olup, ikamenin devamında; kalsitin ince agregaya göre inceliği(özgül yüzeyi) daha fazla arttırması karışımın optimum su muhtevasında da ciddi artışa neden olmaktadır.
- Üretilen SSB numunelerinin 28 günlük küp basınç dayanımı değerlerinin 41.45 MPa ile 47.17 MPa arasında olduğu görülmüştür. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımları farklı ülke şartnamelerinde en az 40 MPa olarak verilen SSB yol betonlarının basınç dayanım değerlerini sağladığı görülmüştür. İnce malzeme ilavesi ile birlikte basınç dayanımlarında bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak SSB5 karışımına ait basınç dayanımı değerleri SSB1'in basınç dayanımı değerlerine oldukça yaklaşmıştır. SSB5 numunelerinde yüzey düzgünlüğü ve işlenebilirliği göz önüne alındığında SSB5 karışımının daha avantajlı olduğu kanısına varılmaktadır.

- SSB numunelerinin dayanım gelişiminin, normal betona göre daha hızlı olduğu sonucu çıkarılmıştır. Bu durum SSB ile yapılan yol kaplamalarının, literatürde de belirtildiği gibi daha kısa sürede trafiğe açılabilceğini de teyit etmektedir.
- Çalışma kapsamında üretilen SSB numunelerin ultrases geçiş hızları 4.7 km/s – 5.1 km/s arasında değişmekte olup, bu hız değerlerinin normal betonların hızlarından daha fazla olduğu görülmektedir.
- Çalışma kapsamında üretilen SSB numunelerin 28 günlük eğilmede çekme dayanımları 6.3 MPa ile 7.4 MPa arasında değişmektedir. Bu değerler üretilen betonların SSB yol kaplaması olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Ayrıca %4 kalsit ikame edilmiş olan SSB3 karışımının en büyük eğilmede çekme dayanımı değerine sahip olduğu görülmüş tür.
- Çalışma kapsamında üretilen SSB numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımları 2.5 MPa ile 3.4 MPa arasında değişmektedir. Beton karışımlarının tamamında SSB1 numunelerine ait yarmada çekme dayanımları tüm günler için diğer beton karışımlarından daha büyüktür Ancak SSB4'e ait yarmada çekme dayanımı SSB1'e çok yakın değerde olmuştur. SSB1 karışımının yarmada çekme dayanımının literatürde belirtilen tüm yarma çekme dayanımı kriterlerini sağlamıştır. SSB2, SSB4 ve SSB5 karışımlarının ise Fransa ve İspanya'ya ait kriterler dışında ki diğer kriterleri sağladığı görülmektedir.
- Üretilen SBB numunelere ait elastisite modülü değerleri 32.11 GPa ile 40.13 GPa arasında değişmekte olup literatür ile uyum içerisinde. En büyük elastisite modülü değeri SSB1 ve en düşük elastisite modülü değeri ise SSB3 karışımında gözlenmiştir. Kalsit ikamesi ile elastisite modülü değerinde bir azalma gözlemlenmiş, ancak SSB4 karışımının elastisite modülü değeri SSB1'e oldukça yaklaşmıştır.
- Çalışma kapsamında üretilen SBB numunelere ait 28 günlük beton aşınma dirençleri %5.2 ile %6.6 arasında, 90 günlük beton aşınma dirençleri ise %4.9 ile %6.3 arasında değişmektedir. 90 günlük betonların aşınma dirençleri, 28 günlük

betonların aşınma dirençlerine oranla % 4.1 ile % 7.6 oranında artmıştır. SSB3 karışımında maksimum aşınma direncinin sağlandığı görülmüştür.

6.2 Öneriler

- Ülkemizde ki beton standartlarında, yol kaplaması olarak kullanılacak SSB'lar yer almamaktadır. Üniversiteler, Karayolları Genel Müdürlüğü ve diğer ilgili Özel ve Resmi Kurumların bu konuda gerekli çalışmaları yaparak; ülkemiz şartları da dikkate alınarak hazırlanmış SSB yol kaplamalarının standartlarının biran evvel oluşturulması önerilmektedir.
- Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda, ince malzeme etkisinin araştırılması adına taş unu, mermer tozu vb. malzemeler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

ACI 207.5R, “Roller Compacted Mass Concrete”, ACI Materials Journal 85, *American Concrete Enstitute*, 1988.

ACI 309.5R-00, Compaction of roller compacted concrete, Reported by ACI Committee 309, *American Concrete Enstitute*, 2000.

ACI 325.10R, State-of-the-art report on roller compacted concrete pavements, *American Concrete Enstitute*, 1995.

Ağar, E., Sütas, İ. ve Öztas, G., Beton Yollar(Rijit yol üst yapıları), *İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası*, İstanbul, 1998.

Ağar, E., Öztaş, G., ve Sütas İ., Esnek Yol Üstyapıları İle Rijit Yol Üstyapılarının Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması, *Teknik Rapor, TÇMB 02537*, Ankara, s.60-108, 1999.

Akçaözoğlu, S., Akçaözoğlu, K. and Atiş, C.D., “Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)”, *Composites: Part B 45(1)*, 721-726, 2013.

Arslan M., Beton yol kaplamalarında alternatif beton ve yapım yöntemi araştırmaları, Gazi Üniversitesi, *Bilimsel araştırma projesi kesin rapor*, Ankara, 2007

ASTM-C 597-09, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concretei, *American society for testing and materials*, USA, 2009.

Atiş, C. T., “Uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılabilen betonların özellikleri”, *Turk J Engin Environ Sci*, 503-515, 2001.

Atiş, C.D., Sevim, U.K., Özcan, F., Bilim, C., Karahan, O., Tanrıkulu, A.H., Ekşi, A., Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash, *materials letters*, 58,1446-1450, 2004.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., Beton, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, İzmir, 2012.

Cannon, R.W., Air-entrained Roller Compacted Concrete, *Concrete International*, 15(5), 49-54., 1993.

Cement Association of Canada (CAC), “Roller Compacted Concrete for Heavy Duty Pavements”, <http://www.cement.ca>, 2002a.

Cement Association of Canada (CAC), “The Benefits of Concrete Highways” <http://www.cement.ca>, 2002b.

Cheng, C., Wei, S., Honggen, Q., The analysis on strength and fly ash effect of the roller compacted concrete with high volume fly ash, *Cement and concrete research*, 30 71-75, 2000.

Çetin, O., Beton yollarda yeni teknolojiler silindirle sıkıştırılabilen beton, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2009.

Delatte, N., Amer, N. and Storey, C., Improved Management of RCC Pavement Technology, *University Transportation Center for Alabama (UTCA) Report 01231*, 46p. 2003

Department of Army (DOA), Engineering and Design Roller Compacted Concrete Pavement Design and Compaction, *Army Corps of Engineering*, 1995.

Ecevit, O., Karayollarında rijit üst yapı uygulamaları ve tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.

Edis, E., Asfalt ve beton kaplamalı yolların maliyet yönünden karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 2007.

Erdoğan, T. Y., Beton, *ODTU Yayıncılık*, Ankara, 2007.

Eres Consultant, Review of Life Cycle Costing Analysis Procedures, *For the Ministry of Transportation Ontario*, 1998.

Flasmedya, Çine Barajı, <http://www.flasmedya.com/news.asp?idx=10567>, 2013.

Gagne, R., Proportioning for Non-Air-Entrained RCCP, *Concrete International*, 21 (5), s.37-41., 1999.

Gauthier, P. and Marchand, J., Design and Construction of Roller Compacted Concrete In Quebec, Canada, 111p., 2005.

Ghafoori, N and Zhang, Z., Sulfate Resistance of Roller Compacted Concrete, *ACI Materials Journal*, 95 (4): 347-355, 1995.

Giriş, Ü., Esnek üst yapılar ile rijit üst yapıların teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2007.

Güngör A.G., Esneklik Modülü Deneyi, *KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üst Yapı Şube Müdürlüğü*, Ankara 2008

Halsted, G.E., Roller-Compacted Concrete Pavement:Design and Construction, *Portland Cement Association*, 2005.

Hansen, K. D., “Roller Compacted Concrete: A Civil Engineering Innovation”, *Concrete International*, 18(3), 49-53, 1996.

Jofre, C., The Use of Roller Compacted Concrete for Roads, *PIARC Technical Committee on Concrete Roads*, 1993.

Jofre, C., Fernandez, R., Josa, A., and Molina, F., Spanish Experience With RCC Pavements, *Roller compacted concrete II*, 467-483, 1998.

Jones, R. and Gatfield, E.N., Testing concrete by an ultrasonic pulse technique, London: *H.M. Stationery Office*, 1955.

Kajorncheappunngam, S. and Steawart D. F., Rice Husk Ash in Roller Compacted Concrete, *Concrete International*, 14(4): 38-44., 1992.

Karpuz, O., Beton yol karışımlarındaki ince agreganın yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi, Doktora, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 2008.

Keifer, O., Corps of Engineering Experience with RCC Pavements, *Roller Compacted Concrete II, ASCE*, 1988.

Koçak, E.S., A Suitable Roller Compacted Concrete For Kahramanmaraş-Suçatı Dam, MSc Thesis, *Middle East Technical University Institute Of Science*, 130p, 1998.

Liu, T. C., "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., 1991.

Ludwig, D., Nanni, A. and Shoenberger, J.E., Application of Roller Compacted Concrete Technology to Roadway Paving, Technical Report, CPAR-GL-94-1, *US Army Corps of Engineers (USACE)*, 1994.

Luhr, D., RCC Applications for Pavements, *Portland Cement Association*, 2008.

Malisch, W. R., Roller Compacted Concrete Pavements, *Concrete Construction*, January, p.13-17, , 1988.

Marchand, J., Gagne, R., Ouellet, E., and Lepage, S., Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete - A Review, *Advances in Concrete Technology*, V. M., 1997.

Murphy, H.W., Reprinted From Concrete International: Design and Construction 9(2), Highway Construction in Queensland, *American Concrete Institute*, Compilation 8: 30-36, 1987.

Neville, A.M., Brooks, J.J., Concrete technology, *Longman Group UK Limited*, USA, 1987.

Pancar, E.B., Beton yollarda enine yivlenmenin sürtünmeye ve basınç dayanımına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 2008.

Pigeon, M. and Marchand, J., Frost Resistance of Roller Compacted-Concrete, *Concrete International*, 18(7): 22-26, 1996.

Piggott, R. W., Roller Compacted Concrete for Heavy Duty Pavements: Past Performance, Recent Projects, and Recommended Construction Methods, Roller Compacted Concrete Pavements and Concrete Construction, Transportation Research Board, *Transportation Research Record 1062*, Washington, DC, 1986.

Piggott, R. W., Roller Compacted Concrete Pavements, A Study of Long Term Performance, *Portland Cement Concrete – Research & Development*, RP366.01P, 1999.

Portland Cement Association (PCA), Production of Roller Compacted Concrete. 2006.

Portland Cement Association (PCA), Roller Compacted Concrete Density: Principles and Practices, 2004.

Prusinski, J., Roller-Compacted Concrete Carries a Heavy Load, *Roads & Bridges*, 68-69., 1997.

Ragan, S. A., Proportioning RCC Pavement Mixtures, Roller Compacted Concrete II, *ASCE*, 1988.

RCC Newsletter, *Roller Compacted Concrete Design and Construction*, Vol. 16, No. 1, 2000.

Rollings, R.S., Design of roller compacted concrete pavements, Proceedings of roller compacted concrete II, *ASCE*, San Diego, California, p.454-466,1988.

Schrader, E. and McKinnon, R., Construction of Willow Creek Dam, *Concrete International*, 6(5), 38-45, 1984.

Sua, N. and Peng, Y. N., “The characteristics and engineering properties of drymix/steam-injection concrete”, *Cement and Concrete Research*, 31, 2001.

Siddugue, R., Kapoor, K., Kadri, E., and Bannacer, R, Effect of polyester fibres on the compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete, *Construction and Building Materials*, 29, 270–278, 2012.

Şahin, N., “Türkiye Kalsit Olanakları ve Kalsitin Endüstriyel Hammadde Olarak Hazırlanması”, Bitirme Çalışması, *Hacettepe Üniversitesi*, Ankara, 1978.

Şahin, N., “Kalsit hakkında bazı bilgiler”, *Madencilik Bülteni*, s. 48 , 2008.

Tarun R.N., Yoon-Moon, C., Rudolph N.K., Shiw S.S., Lori-Lynn C. P., and Bruce W.R., 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, Report No. CBU, 2001-08*, Milwaukee, 2001.

Taşdemir, Y., Vinson, T.S. ve Ağar, E., “Roller Compacted Concrete Pavements”, ***Fifth International Congress On Advances in Civil Engineering***, İstanbul Technical University, İstanbul, 2002.

Topçu, B., Beton Teknolojisi, ***Uğur Ofset A.Ş.***, Eskişehir, 2006.

Tunç, A., Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, ***Asil Yayın Dağıtım***, Ankara, 2004.

Tunç, A., Yol Malzemeleri(agrega, asfalt, bitümlü karışımlar, beton, zemin) ve Uygulamaları(kaplamalar ve zemin ıslahı-dizayn ve yapım metotları), ***Nobel Yayın Dağıtım***, Ankara, 2007.

TS 1900-1/T1, İnşaat mühendisliğinde zemin lâboratuvar deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 2007.

TS 3502, Betonda statik elastisite modülü ve poisson oranı tayini, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 1981.

TS 706 EN 12620+A1, Beton agregaları, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 2009.

TS-2824 EN 1338, Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 2005.

TS EN 197-1, Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 2012.

TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 2002.

TS EN 12390-3, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 2010.

TS EN 12390-5, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-6, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

Uçar, S. ve Konrapa, U., Yol üst yapıları yapım maliyetleri araştırması, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul, 2002.

Uçar, S., “Yol üst yapıları yapım maliyetleri araştırması”, *Ulusal Beton Yollar Kongresi*, Ankara, s. 25-31, Aralık, 2002.

US Army Corps of Engineers (USACE), 2000, Roller-Compacted Concrete, *Engineer Manual*, EM 1110-2, 2006.

Üte, A. A., Uçucu kül ve polipropilen lif kullanılmasının silindirle sıkıştırılmış betonun özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 2008.

Watanabe-gumi Company, Roller Compacted Concrete Pavements, <http://www.watanabegumi.co.jp/pavements/concretes/rccpe.html>, 2002.

Whitehurst, E.A., “Soniscope tests concrete structures; Research and development laboratories of the portland cement association”, *J Am Concr Inst* 47, 433-444, 1951.

Yeğinobalı, A., “Beton yollar asfalt yollar: faydalı ömür maliyetleri konusunda örnekler”, *Ulusal Beton Yollar Kongresi*, Ankara, s.18-24, Aralık, 2002.

Yeğinobalı, A., Niçin beton yol?, Y 09.01, *TÇMB / Ar-ge Enstitüsü*, Ankara, 2009.

Zülkadiroğlu, Ö. F., C ve F sınıfı uçucu kül katkılı betonların yol kaplama betonu olarak kullanılabilme imkanlarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kahramanmaraş, 2006.

Zoldners, N.G., “Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures”, **ACI Publ SP-25**, 8, 1-31, 1971.

ÖZ GEÇMİŞ

Bedrettin MENEMENCİOĞLU, 28.11.1986 tarihinde Ereğli/Konya'da dünyaya geldi. İlköğretimine Karaman'da başladı. Orta öğretimini de Milli Piyango Karaman Fen Lisesi'nde tamamlayarak, 2005 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek öğreme başladı. 01.10.2006 – 01.06.2007 tarihleri arasında S.D.Ü. Yapı İşleri Teknik Daire Başkanlığı Proje Etüt Şube'nde stajyer mühendis olarak çalıştı. Yüksek öğrenimden 2009 yılı Haziran Ayı'nda mezun olarak, aynı yıl Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. 2009 yılında Devlet Su İşleri 4. Bölge Müdürlüğü 41. Şube Müdürlüğü Proje İnşaat Kontrol Mühendisliği Servisi'nde sözleşme olarak yardımcı kontrol mühendisliği görevine atandı. 2010 yılında kadrolu olarak Karayolları 3. Bölge Müdürlüğü Yol Yapım Başmühendisliği servisinde göreve başlamış, 31.03.2013 tarihine kadar Yol Yapım Kontrol Mühendisliği görevini devam ettirmiş olup, 31.03.2013 tarihi itibarıyla Yedek Subay olarak vatan borcunu ödemek üzere ücretsiz izine ayrılmıştır. 31.03.2014 tarihine kadar 19. Motorlu Piyade Tugayı Burhaniye Topçu Tabur Komutanlığı'nın emrinde Topçu Asteğmen olarak vatani görevini sürdürecektir. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.