

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON YOL: KOCAELİ  
İLİNDE BİR DURUM ÇALIŞMASI**

**YAVUZ ABUT**

**KOCAELİ 2017**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

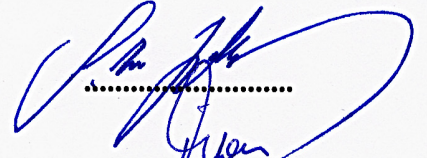
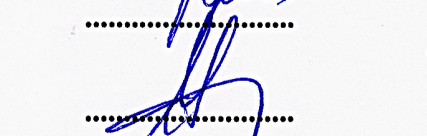
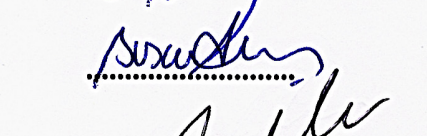
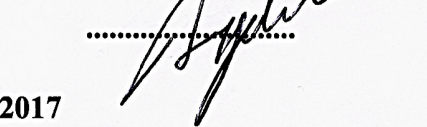
**DOKTORA TEZİ**

**SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON YOL: KOCAELİ**  
**İLİNDE BİR DURUM ÇALIŞMASI**

**YAVUZ ABUT**

**Doç.Dr. Salih Taner YILDIRIM**  
**Danışman, Kocaeli Üniv.**  
**Prof.Dr. İsmail Özgür YAMAN**  
**Jüri Üyesi, ODTÜ**  
**Prof.Dr. Kemalettin YILMAZ**  
**Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.**  
**Doç.Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**  
**Doç.Dr. Aydın KAVAK**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 30.06.2017**

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yol yapım ve rehabilitasyon faaliyetleri ile takip eden süreçlerde, maliyet unsurunun en önemli faktör olması ve birden fazla değişkene bağlı karmaşık bir yapı içerisinde ele alınan doğru kaplama tipi seçiminin, ancak kıt kamu kaynaklarının etkili ve sürdürülebilir projelere ayrılmasıyla mümkün olabileceği gibi nedenler, yol yapımında alternatif kaplama tiplerinin uygulanabilirliği konusunda merakımı artırmış ve beni bu konuda araştırma yapmaya itmiştir. Çalışma sürecinde, gerek yurtiçi rijit ve esnek üstyapı seminerlerindeki izlenimlerimde ve gerekse uygulamacılar tarafından yol inşaatı yapım, onarım faaliyetleri ve kullanılan teknolojinin verimliliği konusundaki tartışmalarda en çok konuşulan tema, bir endüstrinin diğerine göre üstünlüğü konusu olmuştur. Ülkemizdeki yol inşaatı yapım stratejilerinde yapılan bu alternatif değerlendirmelerin olumlu ve olumsuz taraflarının birlikte, şeffaf ve bilimsel bir çerçevede tartışılmasının daha doğru olacağı açıktır. Çalışmalarım ışığında, yapım teknolojileri ve yol kaplama malzemelerinin temsil ettiği endüstriler arasındaki rekabetin, kamu yararını gözetecek şekilde yeniden yapılandırılmasının ve karar verici pozisyondaki idare yetkililerinin kaplama tipi tercihlerini her endüstrinin belirli oranlarda kullanıldığı bir optimizasyon çözümü ile yapmasının, projeler üzerinde daha efektif ve doğru sonuçlar doğuracağı sonucuna vardım.

Bu yorucu süreçte, bilgi birikimiyle her türlü desteği sağlayan danışman hocam Doç.Dr. Salih Taner YILDIRIM'a, belirli zamanlarda bir araya geldiğimiz beton yol seminer ve uygulamalarında kendisinden aldığım bilgi, tavsiye ve motivasyonun yanında, ODTÜ Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda eğilme deneyi için sağladığı kolaylık nedeniyle Prof.Dr. İsmail Özgür YAMAN'a, tez izleme toplantılarında bilgi ve tecrübeleri ile çalışmalarına destek olan Doç.Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ'a ve önerileri ile yoluma ışık tutan diğer değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Elde edilen bütün verileri kullanabilmem için sağladığı destek için Kocaeli Büyükşehir Belediyesi'ne, başta laboratuvar ortamında numune üretilmesi, araziden örnekler alınması ve test edilmesi süreçlerinde yoğun iş temposuna rağmen yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım İsmail KANAT ve Feyzullah YILDIZ olmak üzere, ekonomik değerlendirmelerde katkısı bulunan meslektaşım Aydın GÜR ve Mustafa DURSUN'a zorlu yolculuğumda sağladıkları kesintisiz destek için müteşekkirim.

Zor dönemlerimde her zaman yanımda olarak beni hayata hazırlayan, bana her zaman inanan, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim annem Ayten ABUT ve babam Hayrettin ABUT'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Haziran – 2017

Yavuz ABUT

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET .....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ .....	1
1. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON YOL .....	5
1.1. Genel Özellikler .....	7
1.1.1. Kıvam.....	10
1.1.2. İşlenebilirlik .....	11
1.1.3. Kuruma rötresi .....	12
1.1.4. Donma/çözülme direnci .....	13
1.1.5. Aşınma direnci .....	19
1.2. Geri Dönüşümlü Agrega Kullanımı.....	20
1.3. Karışım Tasarımı .....	22
1.3.1. Beton kıvamı yöntemi .....	23
1.3.2. Katı süspansiyon modeli .....	23
1.3.3. Optimum çimento hamuru hacim yöntemi .....	24
1.3.4. Zemin sıkıştırma yöntemi .....	24
1.4. Yapısal Tasarım .....	28
1.5. Üretim .....	29
1.6. Serme .....	31
1.7. Sıkıştırma .....	32
1.8. Derz Kesimi ve Kür .....	35
2. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	36
2.1. Malzeme.....	36
2.2. Karışım Tasarımı .....	40
2.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	44
2.4. Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi.....	47
2.4.1. Kuruma rötresi tayini .....	49
2.4.2. Ultrasonik ses dalgası hızı tayini.....	52
2.4.3. Donma/çözülme direnci tayini .....	53
2.4.4. Eğilme dayanımı tayini .....	60
2.5. RAP İçerikli SSB Yolun Yapısal ve Ekonomik Analizi.....	62
2.5.1. Yapısal tasarım için bir uygulama.....	63
2.5.2. Analiz sonuçları .....	65
3. TEST YOLU ÜZERİNDE LABORATUVAR VE SAHA ÇALIŞMALARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ .....	68
3.1. Kocaeli İlinde Mevcut Durumun Tespiti .....	68
3.1.1. Konum ve nüfus dağılımı.....	68
3.1.2. İklim ve meteoroloji.....	69

3.1.3. Trafik altyapısı .....	69
3.2. Test Yolu İçin Güzergâh Seçimi.....	72
3.3. Zemin Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi .....	72
3.4. Yolu Yapısal Tasarımı .....	74
3.4.1. Servis yeteneği .....	75
3.4.2. Trafik.....	76
3.4.3. Gerekli plak kalınlığının bulunması.....	77
3.5. SSB Üretimi .....	78
3.6. Test Yolunun Yapılması .....	80
3.7. Laboratuvar Çalışmaları .....	82
3.7.1. Ultrasonik ses dalgası hızı.....	84
3.7.2. Kılcallık (Kapilarite) .....	85
3.7.3. Yoğunluk, su emme ve porozite.....	90
3.7.4. Basınç ve yarmada çekme dayanımı .....	93
3.7.5. Aşınma direnci .....	95
4. YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYET ANALİZİ.....	98
4.1. İdeal Kaplama Tipinin Seçilmesi.....	98
4.1.1. Seçim komitesi .....	101
4.1.2. Eşdeğerlik için yaşam döngüsü stratejileri.....	102
4.1.3. Rekabetin rolü .....	102
4.2. Kaplama Analiz Periyodu ve Performansı.....	105
4.3. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizinin Mukayeseli Bir Değerlendirmesi ....	110
4.3.1. İlk yapım maliyet mukayesesi.....	111
4.3.2. Yaşam döngüsü maliyet analizi .....	113
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	117
KAYNAKLAR .....	123
EKLER.....	133
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	157
ÖZGEÇMİŞ .....	158

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	ABD’de SSB kullanımı.....	5
Şekil 1.2.	Geleneksel ve SSB için karışım oranları.....	7
Şekil 1.3.	Dayanım gelişiminin zamana göre değişimi.....	8
Şekil 1.4.	Kaplama tipine göre yüzey dokusu.....	10
Şekil 1.5.	Vebe süresi ve serbest su içeriği arasındaki ilişki.....	11
Şekil 1.6.	Betonun reolojisini etkileyen faktörler.....	12
Şekil 1.7.	SSB içyapılarında gözlemlenen çatlaklar [SEM, 40x].....	15
Şekil 1.8.	SSB için açıklık faktörü ve durabilite ilişkisi.....	16
Şekil 1.9.	Hava sürükleyici katkı ve çimento düzeyine göre hava içeriği değişimi.....	18
Şekil 1.10.	Son bitirme ve kür yönteminin aşınma direncine etkisi.....	20
Şekil 1.11.	SSB için tipik kuru birim ağırlık su içeriği ilişkisi.....	25
Şekil 1.12.	Kompaksiyon enerjisinin etkileri.....	26
Şekil 1.13.	Kompaksiyon enerjisindeki değişimin etkileri.....	26
Şekil 1.14.	Yük tekrerrür sayısı ile yorulma ilişkisi.....	28
Şekil 1.15.	SSB üretimi için tasarlanmış bir planlama.....	30
Şekil 1.16.	Serme ve sıkıştırma işlerinde kullanılan iş makinaları.....	31
Şekil 1.17.	1. şeridi sıkıştırmak için sıkıştırma şablonu.....	33
Şekil 1.18.	2. şeridi sıkıştırmak için sıkıştırma şablonu.....	33
Şekil 1.19.	Son bitirme için sıkıştırma şablonu.....	34
Şekil 1.20.	Nükleer kaynaklı yoğunlukölçer cihazı.....	34
Şekil 1.21.	Beton yollar için önerilen kür yöntemleri.....	35
Şekil 2.1.	Karışım tasarımında kullanılan agrega grupları ve RAP stok sahası.....	37
Şekil 2.2.	Harç çubuğunda günlere göre boy değişimi.....	39
Şekil 2.3.	K karışımına ait tane boyut dağılımı.....	41
Şekil 2.4.	Titreşimli tokmak (a), titreşimli plakalı zemin sıkıştırıcı (b).....	41
Şekil 2.5.	Kuru birim ağırlık ve kütlece su içeriğinin belirlenmesi.....	43
Şekil 2.6.	Kuru birim ağırlığın su içeriği ile değişimi.....	43
Şekil 2.7.	Elastisite Modülü test düzeneği.....	45
Şekil 2.8.	Prizmatik numune üretilmesi süreci.....	48
Şekil 2.9.	Kuruma rötresi tayininde kullanılan numuneler ve test düzeneği.....	49
Şekil 2.10.	Numune boylarının günlere göre değişimi.....	50
Şekil 2.11.	Numune ağırlıklarının günlere göre değişimi.....	51
Şekil 2.12.	Prizmatik numunede UPV ölçümü.....	52
Şekil 2.13.	Donma/çözülme döngüsü için kurulan sistem.....	54
Şekil 2.14.	Dummy numune içerisinde sıcaklığın zamana bağlı değişimi.....	54
Şekil 2.15.	300 döngüde ağırlık değişimi.....	57
Şekil 2.16.	300 döngüde boy değişimi.....	57
Şekil 2.17.	300 döngüde Dinamik Elastisite Modülü değişimi.....	58
Şekil 2.18.	300 döngüde Dinamik Elastisite Modülü değişimi (%).....	58
Şekil 2.19.	K ve RAP15 için deney önce ve sonrasında ait yüzey görüntüsü.....	60
Şekil 2.20.	MTS-793 yükleme çerçevesi.....	61
Şekil 2.21.	Numunelerin eğilme deneyinden sonrasındaki görüntüleri.....	62

Şekil 2.22. Plak üzerindeki yük konsantrasyonu ve düğüm noktaları.....	64
Şekil 2.23. Program için kullanılan işlem algoritması .....	65
Şekil 2.24. Farklı zeminler için beton tipine göre kaplama kalınlığı değişimi.....	66
Şekil 3.1. Kocaeli ili karayolu ve demiryolu ağı genel görünüm.....	70
Şekil 3.2. KBB sorumluluğundaki yol ağının kaplama tipine göre değişimi.....	71
Şekil 3.3. Yolun plan görüntüsü.....	72
Şekil 3.4. %CBR dağılımı yüzde değişimi.....	73
Şekil 3.5. Proje tipik en kesiti.....	78
Şekil 3.6. Beton santrali ve üretim prosesinden birkaç bölüm .....	79
Şekil 3.7. Numune alma ve deneye hazırlama .....	82
Şekil 3.8. Numune alma planlamasında belirlenmiş bölgeler .....	83
Şekil 3.9. Numunelerde UPV ve yoğunluk değişimi .....	84
Şekil 3.10. Su ile temas anından itibaren gelişen kılcallık olayı.....	85
Şekil 3.11. Su işleme derinliğinin zamana bağlı değişimi .....	86
Şekil 3.12. Numunelere su işleme derinliğinin zamana bağlı değişimi .....	87
Şekil 3.13. Numunelerde kılcallık hızı değişimi .....	88
Şekil 3.14. Numunelerde ilk kılcallık hızı değişimi .....	89
Şekil 3.15. Numunelerde ikinci kılcallık hızı değişimi .....	89
Şekil 3.16. Numunelerde porozite değişimi .....	92
Şekil 3.17. Porozitenin yoğunluk ile değişimi .....	92
Şekil 3.18. Porozitenin ilk kılcallık hızı ile değişimi .....	92
Şekil 3.19. Yoğunluğa göre sıkışma yüzdesi değişimi.....	93
Şekil 3.20. Numunelerde basınç dayanımı değişimi .....	95
Şekil 3.21. Numunelerde yarmada çekme dayanımı değişimi .....	95
Şekil 3.22. Basınç ve çekme dayanımının numune konumuna göre değişimi .....	95
Şekil 3.23. Böhme cihazı ve ekipmanları ile test numuneleri .....	97
Şekil 3.24. Numunelerde aşınma direnci değişimi.....	97
Şekil 4.1. Kaplama tipi seçimi için basitleştirilmiş bir diyagram .....	101
Şekil 4.2. Beton yol yapımının kaplama tipi maliyetine etkisi .....	103
Şekil 4.3. Bir kaplama tasarımı için analiz süresi .....	106
Şekil 4.4. Performans eğrileri.....	108
Şekil 4.5. Harcama akımı şeması .....	108
Şekil 4.6. SSB test yolu maliyetinin iş kalemlerine göre dağılımı.....	112
Şekil 4.7. Yaşam döngüsü maliyetinin kaplama tipine göre mukayesesi.....	115
Şekil A.1. KENPAVE program arayüzü.....	134
Şekil A.2. Genel bilgi ekranı.....	134
Şekil A.3. Kıvrılma etkisi ve diğer fiziksel koşulların belirlenmesi .....	135
Şekil A.4. X eksenine göre simetri noktaları.....	135
Şekil A.5. Y eksenine göre simetri noktaları.....	136
Şekil A.6. Rijit plak özellikleri (kalınlık, Poisson oranı, elastisite modülü) .....	136
Şekil A.7. Dingil yükü konsantrasyonu ve büyüklüğünün belirlenmesi.....	137
Şekil A.8. Referans alınan noktalar.....	137
Şekil A.9. X eksenine göre simetri alınan noktalar .....	138
Şekil A.10. Y eksenine göre simetri noktaları.....	138
Şekil A.11. Zemin koşullarının belirlenmesi.....	139
Şekil A.12. Rijit plak için eğilme mukavemeti .....	139
Şekil A.13. Sonsuz büyüklükte dingil yükü etkisi .....	140
Şekil A.14. Analiz çıktısı (1) .....	141
Şekil A.15. Analiz çıktısı (2) .....	142

Şekil A.16. Analiz çıktısı (3) .....	143
Şekil B.1. Yolun boy profili .....	144
Şekil C.1. PMT tabakası (15 cm).....	145
Şekil C.2. Taşıyıcı tırdaki SSB malzemesinin finişere nakli.....	145
Şekil C.3. Malzemenin ilk şeride finişerle serilmesi (1. faz).....	146
Şekil C.4. Taze betonda yüzey görünümü .....	146
Şekil C.5. Vibrasyon sistemli düz çelik bandajlı silindirle sıkıştırma .....	146
Şekil C.6. Lastik (pnömatik) tekerlekli silindirle sıkıştırma işlemi .....	147
Şekil C.7. Eksende kaplama tabakası kalınlık kontrolü .....	147
Şekil C.8. Malzemenin ikinci şeride finişerle serilmesi (2. faz).....	147
Şekil C.9. Malzemenin ikinci şeride finişerle serilmesi (2. faz).....	148
Şekil C.10. Şerit ek yerlerinin 4 tonluk silindirle düzeltilmesi.....	148
Şekil C.11. Son silindiraj (mix-type compaction).....	148
Şekil C.12. Nükleer cihaz ile kuru birim ağırlık ve nem muhtevası ölçümü .....	149
Şekil C.13. Arazöz ile su kürü uygulaması .....	149
Şekil C.14. Derz uygulaması .....	149
Şekil C.15. Kaplama yüzey dokusunda görsel inceleme.....	150
Şekil C.16. Yolun yüzey dokusu .....	150
Şekil C.17. Proje tip kesite göre “V” tipi kanal yapılması .....	150
Şekil C.18. Yolun kuşbakışı görüntüsü.....	151
Şekil C.19. Kar küremeden sonra yol güzergâhının görünümü .....	151



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Kaplama tipine göre karşılaştırmalar .....	9
Tablo 1.2. Çimento ve iri agrega düzeyinin kuruma rötresine etkisi .....	13
Tablo 1.3. SSB karışımlara ait parametreler .....	17
Tablo 1.4. Genel karışım tasarımı yöntemleri ve uygulamaları .....	23
Tablo 1.5. Gradasyon limitleri.....	24
Tablo 1.6. SSB karışım tasarımı için birkaç örnek.....	27
Tablo 1.7. Kalite kontrol eylem planı örneği .....	29
Tablo 1.8. SSB için önerilen homojenlik testleri .....	31
Tablo 2.1. Agrega ve RAP'e ait fiziksel özellikler.....	37
Tablo 2.2. İri agregaya ait diğer fiziksel özellikler.....	38
Tablo 2.3. Agrega ve RAP'e ait yüzde geçen değerleri .....	38
Tablo 2.4. Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	38
Tablo 2.5. Her elek üstü malzeme miktarı .....	39
Tablo 2.6. 1 m <sup>3</sup> karışım için teorik ve gerçek malzeme miktarları .....	42
Tablo 2.7. Kür periyodu sonunda belirlenen kuru birim ağırlık ve su içeriği değerleri.....	43
Tablo 2.8. 1 m <sup>3</sup> K karışımı için malzeme miktarları .....	44
Tablo 2.9. 1 m <sup>3</sup> RAP katkılı karışım için malzeme miktarı ve yüzde oranları.....	44
Tablo 2.10. Mekanik deneylerde test sonuçları.....	45
Tablo 2.11. Prizmatik numuneler için deney planlaması .....	48
Tablo 2.12. Numunelerin belirli günlerde yapılan boy ve ağırlık ölçümleri.....	50
Tablo 2.13. UPV test sonuçları.....	53
Tablo 2.14. Donma/çözülme deneyi test okumaları .....	55
Tablo 2.15. Donma/çözülme deneyi test sonuçları .....	56
Tablo 2.16. Durabilite Faktörü'nün karışım tipine göre değişimi.....	59
Tablo 2.17. Eğilme deneyi test sonuçları .....	61
Tablo 2.18. Programa girilen bağımsız değişkenler .....	65
Tablo 2.19. RAP kullanılması durumunda ortaya çıkan fayda maliyet.....	66
Tablo 3.1. Kocaeli ili karayolu ulaşımında kaplama uzunlukları.....	70
Tablo 3.2. %CBR değerlerinin güzergâh boyunca değişimi .....	72
Tablo 3.3. %CBR frekans tablosu .....	73
Tablo 3.4. Tavsiye edilen taşıt eşdeğerlik faktörleri .....	76
Tablo 3.5. 20 yıllık dingil yükü tekerrür sayısı analizi.....	76
Tablo 3.6. Projede kullanılan veriler .....	77
Tablo 3.7. İmalat miktarlarının günlere göre değişimi .....	80
Tablo 3.8. Sıkışma testi sonuçları.....	81
Tablo 3.9. Numune özellikleri ve uygulanan deneyler.....	83
Tablo 3.10. UPV test sonuçları.....	84
Tablo 3.11. Kılcallık hızı tespitinde kullanılan doğru denklemleri.....	87
Tablo 3.12. Yoğunluk, su emme ve porozite deney sonuçları .....	91
Tablo 3.13. Basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları .....	94
Tablo 3.14. Böhme aşındırma deneyi sonuçları .....	97
Tablo 4.1. Beton yol yapımının kaplama tipi maliyetine etkisi .....	104

Tablo 4.2. Tavsiye edilen analiz periyodları .....	106
Tablo 4.3. Son iki yılda yapılan yollar için ilk yapım maliyet analizi .....	112
Tablo 4.4. Analiz süresi içerisinde planlanan bakım ve onarım stratejisi .....	113
Tablo 4.5. Yaşam döngüsü maliyet analizi .....	114
Tablo D.1. Numunelerde zamana bağlı su işleme derinlikleri.....	152
Tablo D.2. Beton kaplamada onarıma ait birim fiyat analizi.....	153
Tablo D.3. Asfalt yama yapılması işçiliğine ait birim fiyat analizi .....	154
Tablo D.4. Asfalt yama malzemesi temini ve nakliyesine ait birim fiyat analizi.....	155
Tablo D.5. Bazı ulaştırma hizmetleri için hedeflenen bütçe dağılımı.....	156
Tablo D.6. Yol yapım ve bazı ulaştırma hizmetleri için hedeflenen işler.....	156



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Kısaltmalar

1No	: 4,75-19mm Boyutunda Kırmataş (Aselmaslar Taş Ocağı)
2No	: 9,50-25mm Boyutunda Kırmataş (Aselmaslar Taş Ocağı)
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaşım Görevlileri Birliği)
ACI	: American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ACPA	: American Concrete Pavement Association (Amerikan Beton Üstyapılar Birliği)
ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
BYŞ	: Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi
CBR	: California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
COV	: Coefficient of Variation (Varyasyon Katsayısı)
CSA	: Canadian Standards Association (Kanada Standartlar Birliği)
D/Ç	: Donma/Çözülme
EDYTS	: Eşdeğer Dingil Yüğü Tekerrür Sayısı
EN	: European Standard (Avrupa Standardı)
FHWA	: Federal Highway Administration (Federal Karayolu İdaresi)
IS	: Indian Standards (Hindistan Standardı)
JPCP	: Jointed Plain Concrete Pavements (Derzli Donatısız Beton Kaplama)
K	: KONTROL Numunesi/Karışımı
K(D/Ç)	: Donma/Çözülme Çevrimine Maruz Kalmış KONTROL Numunesi
K1	: 0-4,75mm Boyutunda Kırmakum (Aselmaslar Taş Ocağı)
K2	: 0-4,75mm Boyutunda Kırmakum (Demirtaş Taş Ocağı)
KBB	: Kocaeli Büyükşehir Belediyesi
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Lineer Değişken Fark Transformatörü)
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program (Ulusal Otoyol Araştırmaları İşbirliği Programı)
PCA	: Portland Cement Association (Portland Çimento Birliği)
PMT	: Plentmiks Temel
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavement (Geri Dönüşüm Asfalt Agregası)
RAP15	: Ağırlıkça % 15 Oranında RAP İçeren Numune/Karışım
RAP20	: Ağırlıkça % 20 Oranında RAP İçeren Numune/Karışım
RCA	: Recycled Concrete Aggregate (Geri Dönüşüm Beton Agregası)
S/Ç	: Su / Çimento Oranı
SSB	: Silindirle Sıkıştırılmış Beton
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TEF	: Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri

UPV : Ultrasonic Pulse Velocity (Ultrasonik Ses Dalgası Hızı)  
USACE : United States Army Corps of Engineers  
(Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği)  
YOGT : Yıllık Ortalama Günlük Trafik



## SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON YOL: KOCAELİ İLİNDE BİR DURUM ÇALIŞMASI

### ÖZET

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) dünya ölçeğinde bir karayolu kaplama alternatifi olarak yaygın bir şekilde uygulanmakta ve ülkemizdeki kullanımı her geçen gün artmaktadır. Ancak SSB için numune üretimi ve laboratuvar ile saha uygulamasının birbirleriyle mukayese edilmesi konusunda literatürde standart bir prosedürün olmaması, test sonuçlarının değerlendirilmesi sürecinde birtakım zorlukları ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada, numune üretimindeki bu uyumsuzlukların gerçek bir saha uygulaması yapılarak belirginleştirilmesine katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında ilk aşamada SSB karışımında ağırlıkça %15-20 oranlarında RAP (Geri Dönüşümlü Asfalt Agregası) kullanımının betonun mekanik performansı üzerindeki görece etkileri incelenmiş, RAP'in iyi derecelendirilmesi durumunda betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde bir azalma gerçekleşse bile, yol üstyapı kaplaması için uygun performans düzeylerinin elde edilebileceği görülmüştür. İkinci bölümde, ilk aşamada özellikleri belirlenen kontrol karışımı ile 2,2 km uzunluğunda bir test yolu yapılmış ve tahribatlı yöntemlerle numuneler alınarak, laboratuvarda üretilenler ile karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, araziden alınan numunelerin laboratuvarda üretilenlerden düşük dayanım göstergelerinde, daha yüksek aşınma ve geçirimsizlik özelliklerinin olduğu Ultrasonik Ses Dalgası Hızı, basınç ve yarmada çekme dayanımı, kılcallık, yoğunluk, su emme, porozite ve aşınma deneyleri ile tespit edilmiştir. Basınç dayanımındaki farklılık %19-32 aralığında iken, yarmada çekme dayanımında bu fark %9,5-30 olarak saptanmıştır. En büyük farklılık %280-307 ile kılcallık deneyinde gözlenmiştir. İki farklı yöntemle elde edilen numunelerde değişkenliklerin oluşmasında, sıkıştırma tekniği, kür koşulları ve tek seferde sıkıştırılan malzeme hacminin farklı olmasının etkili olduğu anlaşılmıştır. Son olarak yapılan bir ekonomik değerlendirmede 43,6 TL/m<sup>2</sup> ile SSB yolun ilk yapım maliyetinin asfalt yoldan %39,4 daha ekonomik olduğu, yaşam döngüsü maliyeti ile bu oranın %46'ya çıktığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geri Dönüşümlü Asfalt Agregası (RAP), Kaplama Maliyeti, Rehabilitasyon, Silindirle Sıkıştırılmış Beton, Yol Tasarımı.

## **ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENT: A CASE STUDY IN THE CITY OF KOCAELİ**

### **ABSTRACT**

Roller Compacted Concrete (RCC) is widely used as a highway pavement alternative around the world and its use in our country is increasing day by day. However, the lack of a standardized procedure in the literature for RCC sample production and comparison of laboratory and in-situ specimens with each other causes some difficulties in the process of evaluating the test results. In this study, it is aimed to contribute to the clarification of these disputes in sample production by an actual field application. As a first phase of this study, the use of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) at 15-20% by weight in the RCC mixture, the relative effects on the mechanical performance of concrete were investigated and it was observed that even though there is a reduction in strength and durability properties, satisfactory performance levels can be obtained for the pavement layer when RAP is well classified. In the second phase of the study, a test track of 2.2 km length was constructed with the control mixture optimized in the first phase and a comparative analysis of the samples taken from this track by destructive methods was performed with the samples produced in the laboratory. According to the results obtained by Ultrasonic Pulse Velocity, compressive and splitting-tensile strength, sorptivity, density, water absorption, porosity and abrasion tests, it was determined that the samples taken from the test track have lower strength properties, higher wear and permeability characteristics than the ones produced in the laboratory. While the difference in the compressive strength is in the range of 19-32%, this difference is found to be 9.5-30% in the splitting-tensile strength. The most difference was observed on the sorptivity test with 280-307%. It was observed that the compaction technique, curing conditions and the difference in volume of material compacted at one time are effective in the observed changes on the samples obtained by the two different methods. As a final economical assessment, it was determined that the initial construction cost of the RCC pavement with 43.6 TL/m<sup>2</sup> is more economical at 39.4% than the asphalt pavement, and this ratio has increased to 46% with life cycle cost.

**Keywords:** Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Pavement Cost, Rehabilitation, Roller Compacted Concrete, Pavement Design.

## GİRİŞ

Günümüz yolculuk talepleri, araç sahiplikleri ile doğru orantılı olarak hızlı bir şekilde yükselmekte, artan bu ihtiyaca karşılık olarak da alternatif ulaştırma politikaları sürekli gelişim göstermektedir. Bu amaçla hava, deniz, karayolu ulaşım modellerinin yanında, raylı sistemler, akıllı ve entegre taşıma türlerinin beraber kullanıldığı modern yol ağları, ihtiyaçları karşılamak adına optimize edilmektedir.

Yeni bir karayolu yapmak yerine mevcut üstyapıların doğru bakım onarım stratejileri sayesinde yenilenmesi, geri dönüşümlü malzeme kullanımı ile doğal kaynakların korunması gibi süreçler, bu kaynakların daha verimli kullanılması konusundaki çabalara örnek olarak verilebilir. Bu amaçla, mevcut üstyapıların daha yüksek kapasitelerde hizmet sağlayabilmesi için modernize edilmesi, günümüz çağdaş ulaştırma politikalarında ön plana çıkan önemli konulardan biri haline gelmiştir. Her iki durum örneğinde de üstyapı tipinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Üstyapı tipine karar verme konusu çok aşamalı bir çözümlenir ve en önemli unsurlarından birisi de malzemedir. Bu duruma en çarpıcı örnek olarak, 1973'teki petrol krizinden sonra Fransa ve Almanya gibi birçok Avrupa ülkesinde beton yollara olan eğilimin artması verilebilir.

Beton üstyapılar, dünya ölçeğinde şehir içi yollar, sokaklar, otoyollar, havaalanı pistleri, park ve depo alanları, endüstriyel yapılar gibi birçok alanda özellikle ağır taşıt trafiğinin fazla, yerel zemin koşullarının zayıf olduğu bölgelerde esnek üstyapılara bir alternatif olarak tasarlanabilmektedir. Türkiye ölçeğinde ise, asfalt kaplamalı yol endüstrisi üstyapı inşaat sektörüne hâkim olmuş durumdadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM)'nin sorumluluğunda 1499 km bölünmüş yol, 2155 km otoyol, 19790 km devlet yolu olmak üzere toplamda 66774 km'lik yol ağı bulunmaktadır. Bu yol ağının %63'ü sathi kaplama, %31'i asfalt, %6'sı ise stabilize yoldur. Asfalt kaplamalı yollar ile kıyaslandığında beton yolların oranı mevcut verilere göre sadece %0,05 düzeyindedir. Ülke içinde yolcu taşımacılığının %95'i karayoluyla yapılmaktadır. Bu oran ABD'de %89, AB ülkelerinde ise %79 düzeyinde

seyretmektedir. Ülkemizde yük taşımacılığı alanında karayolu kullanım oranı ise %76 civarındadır. Bu oran ABD'de %69, AB ülkelerinde ise yaklaşık %45 mertebesindedir (Keçeci, 2006). Dolayısıyla karayolu projelerinde üstyapı yapım maliyetleri ile beraberinde gelen bakım ve onarım faaliyetlerinin ekonomik göstergelerinin tartışılması önemli bir konu haline gelmektedir.

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) teknolojisi büyük ölçüde baraj yapımında kullanılmasına rağmen, yol yapımında da kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Harrington ve diğ., 2010). Ülkemizde ilk SSB yol uygulaması Antalya Büyükşehir Belediyesi tarafından, dâhil olduğu bir Avrupa Birliği 6. Çerçeve Projesi kapsamında Antalya'da gerçekleştirilmiştir. Kısaca "Ecolanes" olarak isimlendirilen ve İngiltere'deki Sheffield Üniversitesi tarafından yürütülen bu projede, araç lastiklerinden elde edilen çelik tellerin beton yollarda kullanılabilirliği, çeşitli laboratuvar deneyleri ve saha uygulamalarıyla gösterilmiştir (URL-1). Türkiye'deki gerçek anlamdaki ilk SSB yol uygulaması ise Denizli Büyükşehir Belediyesi tarafından 2011'de 9 etap halinde yapılmış ve kaplama miktarının 500.000 m<sup>2</sup>'yi aştığı bildirilmiştir (Yaman ve Ceylan, 2013). 2014 yılından bu yana ise Samsun ve Tekirdağ Büyükşehir Belediyeleri'nin toplamda 225 km uzunluğunda SSB yol yaptığı belirtilmektedir (TÇMB, 2017). Yakın zamanda da, Avrupa'nın birinci çimento üreticisi olan Türkiye'de, yıllık yaklaşık 10 milyon ton çimento ihracatı ve ülke genelinde 65 milyon ton civarlarında gerçekleşen iç satış ile beton yolların yerli sermaye noktasında oluşturacağı rekabet sayesinde, asfalt kaplamalı üstyapılara ciddi bir alternatif olabileceği tahmin edilmektedir (TÇMB, 2017).

SSB, geleneksel betona nazaran daha düşük su/bağlayıcı düzeyine sahip olması nedeniyle "kuru kıvam" özelliği taşımaktadır. Karışım optimizasyonunda standart bir test prosedürü olmamasına karşın, deneysel çalışmalarda zemin sıkıştırma yöntemi, kıvam testi yöntemi, katı süspansiyon modeli, optimum çimento hamuru hacim yöntemi gibi yaklaşık metotlar kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde arzu edilen fiziksel sonuçlara göre karışım içeriğinde deneme yanılma yöntemiyle birtakım düzenlemeler yapılabilmektedir (Hansen ve Reinhardt, 1991; Pittman, 1993; USACE, 1995, 2000; Jittbodee ve Somnuk, 2003; Mehta ve Monteiro, 2006; Harrington ve diğ., 2010; ACI, 2011).



Düşük hidratasyon ısısı, erken trafiğe açma, hızlı, kolay ve donatısız uygulanabilirliği sayesinde SSB kaplamaları, baraj, uçak pistleri, yol ve banket uygulamalarında ekonomiklik sağlamaktadır (Delatte ve diğ, 2003; Delatte, 2004; PCA, 2005).

Öte yandan gerek beton yollar gerekse SSB yol özelinde daha çevreci yaklaşımlar da son yıllarda yürütülmekte olan araştırma konuları arasındadır. Beton karışımında geri dönüşümlü agrega kullanımı; atıkların yönetimi, enerji ve doğal kaynaklardan tasarruf, ekolojik dengenin korunması, düşük CO<sub>2</sub> salınımı gibi çok sayıda alanda avantaj sağlamakta, birçok yapı idaresi bu malzemelerin kullanımı konusunda yüklenicilere teşvikler sunmaktadır. İnşaat yıkıntı ve molozlarından sonra çıkan Recycled Concrete Aggregate (RCA) ile eski veya hasar görmüş bitümlü sıcak karışımların yerinden kazılması sonucu oluşan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) birçok araştırmaya konu olmuş ve çalışmaların büyük bir çoğunluğunda, geri dönüşümlü malzemelerin temel ve alttemel tabakalarında sınırlı düzeyde kullanılması gerektiği bildirilmiştir.

Bununla birlikte literatürde, SSB numune üretimi ve sonuçların değerlendirilmesi konusunda standart bir test prosedürünün olmaması, numune üretimi esnasında farklı enerji kapasitelerinde kompaksiyon yöntemlerinin kullanılması, laboratuvarda üretilen numunelerin saha performansını yansıtamaması, SSB saha uygulamalarının daha çok baraj yapılarından alınan örneklerle yapılması, SSB yol çalışmalarıyla yapılan araştırmaların kısıtlı sayıda olması gibi hususlar, elde edilen sonuçların birbirleri ile kıyaslanmaları konusunda birtakım zorlukların ortaya çıkmasına neden olmuştur.

#### Çalışmanın Amacı:

Bu çalışmada, öncelikle RAP kullanımının SSB beton özellikleri üzerindeki etkileri incelenecek, sonra bu ilk çalışmadan elde edilecek SSB karışımı gerçek bir saha uygulamasında kullanılacak, ardından da laboratuvar ortamında üretilen ve test yolu yapılarak kaplama gövdesinden alınan numunelerin, dayanım ve geçirimsizlik özellikleri belirlenecektir. Kapsamlı bu çalışma sonucunda SSB karışımlarında literatürdeki saha ve laboratuvar çalışmalarının mukayesesine katkı sağlanması amaçlanmıştır. Aynı zamanda, iklimik etkilerle gelişen ıslanma-kuruma, soğuma-ısınma, donma-çözülme gibi etkilerin sebep olabileceği muhtemel zararlar, kaplama üzerinde eş zamanlı olarak gözlemlenebilecek, bu sayede ilerleyen zamanlarda gerçek zamanlı bakım ve onarım stratejilerinin geliştirilmesine imkân sağlanacaktır. Çalışmanın son aşamasında da,

Kocaeli İlinde yol kaplaması yapımı süreçlerinde yaşam döngüsü maliyet analizleri yapılarak, kaplama tipleri arasındaki mukayeseler sayesinde ekonomik faydaların ortaya konması hedeflenmiş, karışım içeriğinde belirli oranlarda RAP kullanılması durumunda oluşabilecek performans kayıplarına mukabil, elde edilecek mali kazançların tartışılması amaçlanmıştır.

#### Çalışmanın Kapsamı:

Çalışmanın ilk bölümünde, bütünleşik bir yapı elemanı olan yol üstyapısının yapısal ve geometrik özellikleri, rijit üstyapılar özelinde tartışılmıştır. SSB karışımları ve betonda geri dönüşümlü agrega kullanımı konularında daha önce yapılan çalışmalar, SSB özellikleri, kullanım alanları, karışım tasarımı, taşıma, yerleştirme, sıkıştırma, gerektiğinde derz yapımı, kür ve bakımı gibi konular ele alınmıştır.

Çalışma yönteminin ele alındığı ikinci bölümde, Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen karışım optimizasyonu, karışım içeriğinde RAP kullanımı, betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi gibi deneysel çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular tartışılmıştır.

Üçüncü bölüm, saha şartlarında Kocaeli İli karayolu yapısı özelinde ilk defa uygulaması yapılan 2,2 km'lik bir test yolu için güzergâh seçimi, yapısal tasarım ve inşaat aşamalarını kapsamaktadır. Bölüm içerisinde ayrıca kaplamadan numune alınması ve değerlendirilmesi, laboratuvar ortamında elde edilen ve sahadan alınan sonuçların kıyaslanması süreçlerine yer verilmiştir.

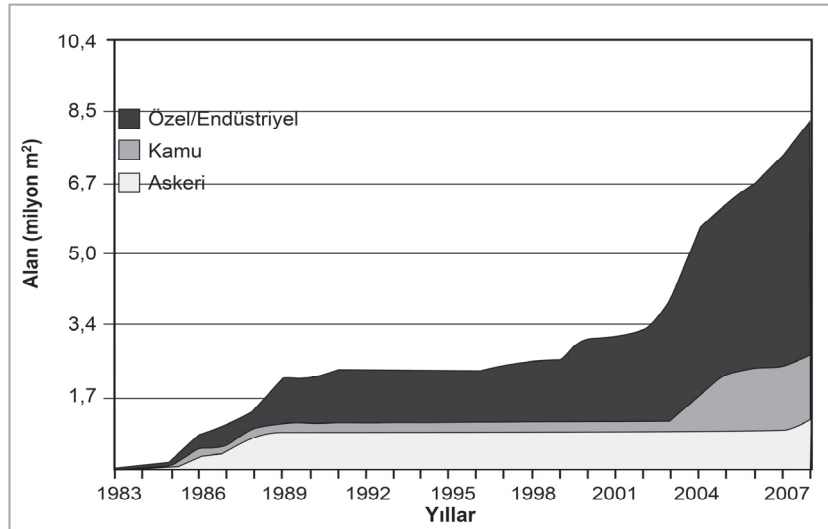
Dördüncü bölümde, ideal kaplama tipi seçiminde ekonomik yönden mukayeseler yapılarak, yaşam döngüsü maliyet analizlerine yer verilmiştir.

Son kısım olan beşinci bölümde ise, Laboratuvar ortamında ve sahadan elde edilen deneysel bulgular ışığında, test sonuçları arasındaki farklar tartışılarak, SSB karışım tasarımında RAP kullanımı, SSB yol yapımı, onarım stratejileri ve kaplama tipi seçimi hakkında önerilerde bulunulmuştur.

## 1. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON YOL

SSB, çelik bandajlı ve lastik tekerlekli silindirlerle kuru kıvamdaki bir beton karışımının sıkıştırılarak sertleşmesi sonucunda ortaya çıkan bir rijit üstyapı teknolojisidir. Geleneksel betonlarla benzer dayanım ve kalıcılık özelliklerine sahiptir. Geleneksel beton karışımlar ile arasındaki en büyük fark, SSB’de sıkılaşmaya ve çökmeye olanak sağlayan ince agregaların daha yüksek oranda olmasıdır. Bu karışımlar titreşimli silindirler altında stabil kalacak kadar sert, ayrışma olmadan karışım içeriğinde çimento hamurunun dağılmasına izin verecek kadar nemlidir. SSB, genellikle asfalt tipi serici ile serilir ve sonrasında silindir makineleriyle birkaç kez sıkıştırılır. Nihai sıkıştırma ilk 1 saat içerisinde sağlanır ve geleneksel beton yolların aksine hiçbir aşamada donatı kullanılmaz. Derz kesimi şart olmayıp ihtiyaç duyulması durumunda derz aralıkları geleneksel beton yollara göre daha geniş tutulur (Harrington ve diğ., 2010).

Bu kaplamalar, liman, inter-modal ve askeri tesisler, karayolu kaplamaları, sokak ve otoyol yapımında birçok koşulda ekonomiklik sağlamaktadır. SSB, temel malzemesi olarak da kompozit sistemlerde kullanılabilir. Kamu ve özel sektörde, özellikle düşük hacimli yol ve park alanları yapımında son yıllarda kullanımı giderek artmaktadır (Şekil 1.1) (Pittman ve Anderton, 2009).



Şekil 1.1. ABD’de SSB kullanımı (Pittman ve Anderton, 2009)

SSB yollar, 1970'lerde Amerika ve Kanada'daki ilk kullanımından sonra, sert ve ılıman iklim bölgeleri, ağır tekerlek yükleri ve zor çalışma koşulları altında birçok bölgede uygulanmıştır. İlk etaplarda tomruk dağıtım depoları, çok amaçlı terminaller, nakliye depoları ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılmasına rağmen, son 10 yıldır birçok geleneksel karayolu ve cadde kaplama inşaatında kullanımı artış göstermiştir.

SSB teknolojisi, Amerika ve Avrupa'da son 50 yıldır başarılı bir şekilde kullanılmasına rağmen, Türkiye'deki ilk uygulaması seksenli yılların başında Karakaya Barajı'nın mansap kısmında gerçekleşmiş, doksanlı yılların ortalarından itibaren baraj gövdelerinde tekrar kullanılmaya başlanmıştır (Öztürk ve Yıldız, 1998; Özcan, 2008). SSB yol ise son 4 yılda yerel yönetimler tarafından benimsenmiş, Kocaeli, Antalya, Denizli, Samsun ve Tekirdağ Büyükşehir Belediyeleri tarafından 2017 verilerine göre yaklaşık 225 km uzunluğunda kent içi ve kırsal bölgelerde uygulamalar yapılmıştır (TÇMB, 2017).

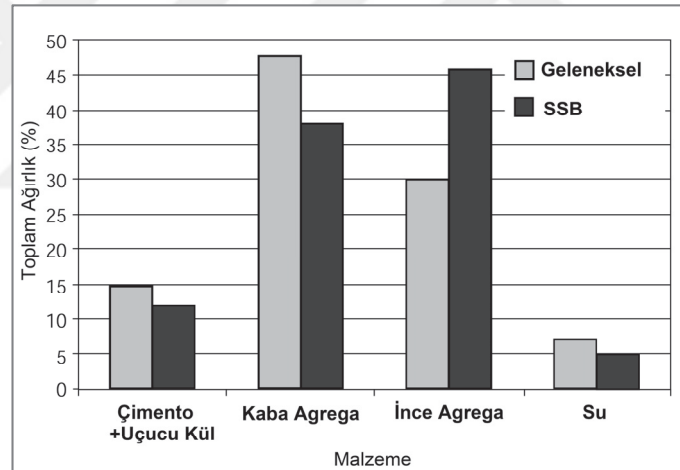
SSB yollar, esnek ve rijit üstyapıların birçok yönlerini ve uygulamalarını birleştirmektedir. Bu kaplamalar, her ne kadar bitümlü sıcak karışımlarla benzer agrega gradasyonuna sahip olsalar ve sıkıştırılsalar da, malzeme ve yapısal performansları bakımından geleneksel beton yollara benzemektedirler. İyi derecelendirilmiş agregalar, uygun çimento ve su içeriği ve yoğun sıkıştırma işlemleri ile düşük geçirgenlik dereceleri sağlanabilir, bu sayede geleneksel betona yakın düzeyde dayanım özellikleri elde edilebilir. Malzeme, serim işleminden sonra silindiri taşıyabilecek kadar kuru olmalı, öte yandan harcın homojen olarak dağılabilmesi için de yeteri miktarda nem barındırmalıdır. Harcın agrega yüzeylerini kaplaması ve boşlukların doldurulması için uygun karışım oranlarının elde edilmesi şarttır. Aynı zamanda yük transferinin agregalar arasındaki kenetlenme ile sağlanabilmesi için, yüzeylerinin yeterli düzeyde çimento hamuruyla sarılması gereklidir.

Kompaksiyon (sıkıştırma), taneli malzemelerde aralardaki boşlukların özellikle de hava boşluklarının azaltılması ve yoğunluğun artırılması işlemidir. Sıkıştırma işlemine hidrasyon başlangıcından hemen önce başlanmalıdır. Sıkıştırma esnasında uygun yoğunluğun elde edilmesi, eşit olmayan çökmelerin ve izole edilmiş zayıf bölgelerin oluşmasını engeller. Karışım içeriğine ve serim işleminde kullanılan iş

makinelere bağılı olarak silindirlerle yapılan harici mekanik kompaksiyon, karışımın hacminde %5 ile %20 oranında bir azalmaya sebep olur. Karışımlardaki geçirimli hava boşluklarını en aza indirmek, dayanım ve dayanıklılık açısından önemlidir. Geçirimli hava boşlukları malzemenin zayıflamasına sebep olurken, aşırı su, donma/çözülmeye bağılı gerilmelere sebep olacaktır. En iyi performans özellikleri, karışımda ayrışmaların olmadığı ve kaplamanın bütününde maksimum yoğunluğa ulaşacak şekilde sıkıştırmanın sağlandığı durumlarda elde edilmektedir (Harrington ve diğ., 2010).

### 1.1. Genel Özellikler

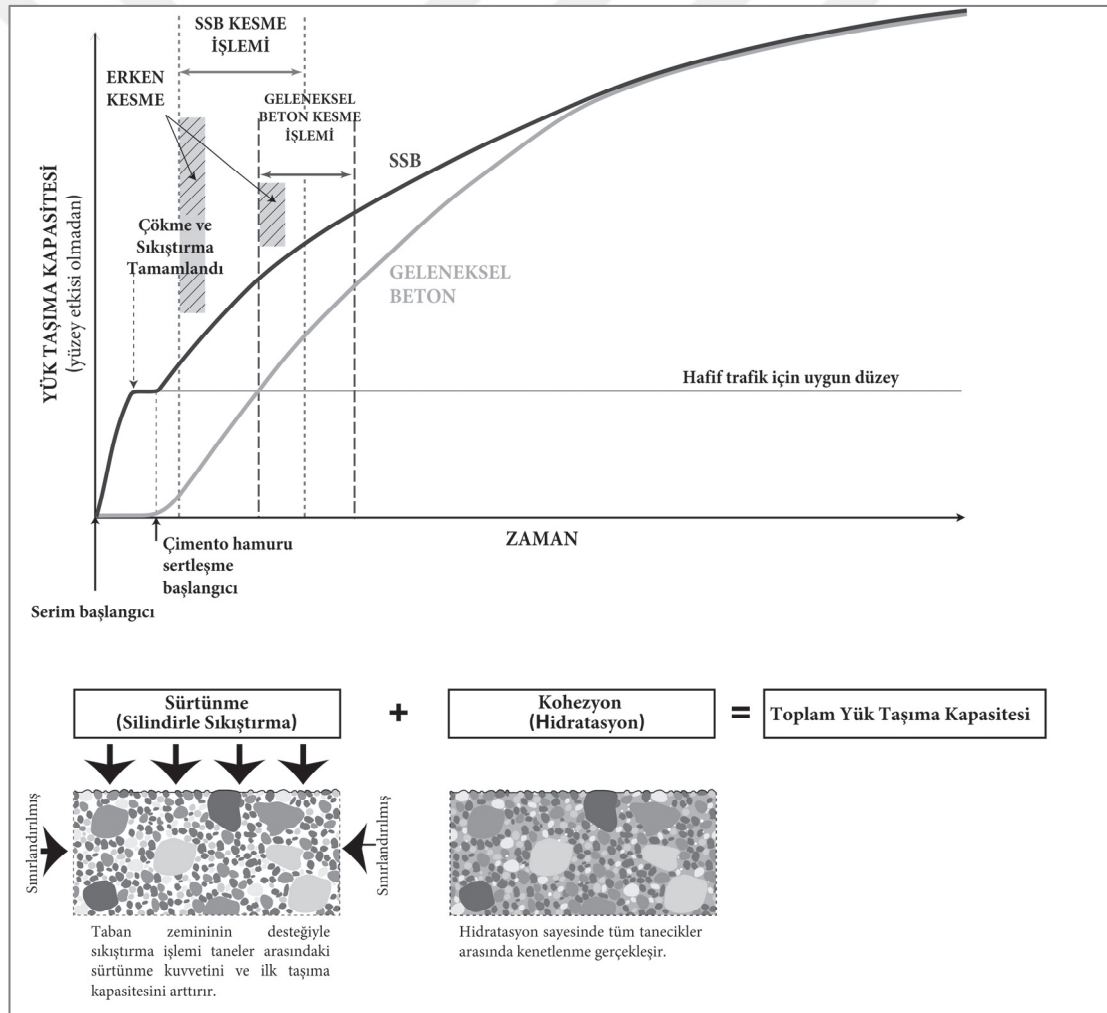
SSB karışımları, geleneksel beton karışımlarına göre daha az bağlayıcı malzeme (çimento + uçucu kül vb.), iri agrega ve su barındırmasına rağmen, daha fazla ince agregaya sahiptir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Geleneksel ve SSB için karışım oranları (Harrington ve diğ., 2010)

SSB karışımında, geleneksel betona göre ince taneli agregalar daha sıkı bir formda bir arada toplanmıştır. Bu sıkılaşıma, taneler arasında agrega kenetlenmesi sayesinde daha yüksek sürtünme direnci sağlamakta, bu da başlangıç taşıma kapasitesinde artışlara neden olmaktadır (ACI, 2011). Bütün beton yol inşaatları mekanik (oturma) ve kimyasal (hidratasyon) prosesler içermektedir. Geleneksel beton karışımlarında oturma prosesi, serici (finişer) bünyesindeki dâhili titreşim sayesinde gerçekleşir ve ekstra bir sıkıştırma enerjisine gerek duyulmaz. SSB karışımları için ise oturma, geleneksel veya yüksek yoğunluklu sericilere müteakip, çelik bandajlı veya lastik

tekerlekli silindirlerle sağlanır. Geleneksel beton ve SSB serildikten sonra, zaman içerisinde farklı dayanım gelişimleri gösterir ve zamanla bu değişim birbirine benzemeye başlar (Şekil 1.3). Geleneksel beton, serim işleminden hemen sonra agrega tanelerini birleştiren çimento hamurunun sertleşmesine sebebiyet veren hidrasyon süreci başlayıncaya kadar plastik kıvamdadır. Dolayısıyla hafif araç trafiği kapsamında yük taşıma kapasitesine erişilebilmesi için biraz daha zamana ihtiyaç duyulabilir. Bunun tersine SSB, serimden hemen sonra hafif araç trafik yükünü taşıyabilecek kapasiteye ulaşabilmektedir. Erken yük taşıma kapasitesi, agrega taneleri arasında sürtünmeye ve kenetlenmeye sebep olan sıkıştırma enerjisi sayesinde sağlanmaktadır.



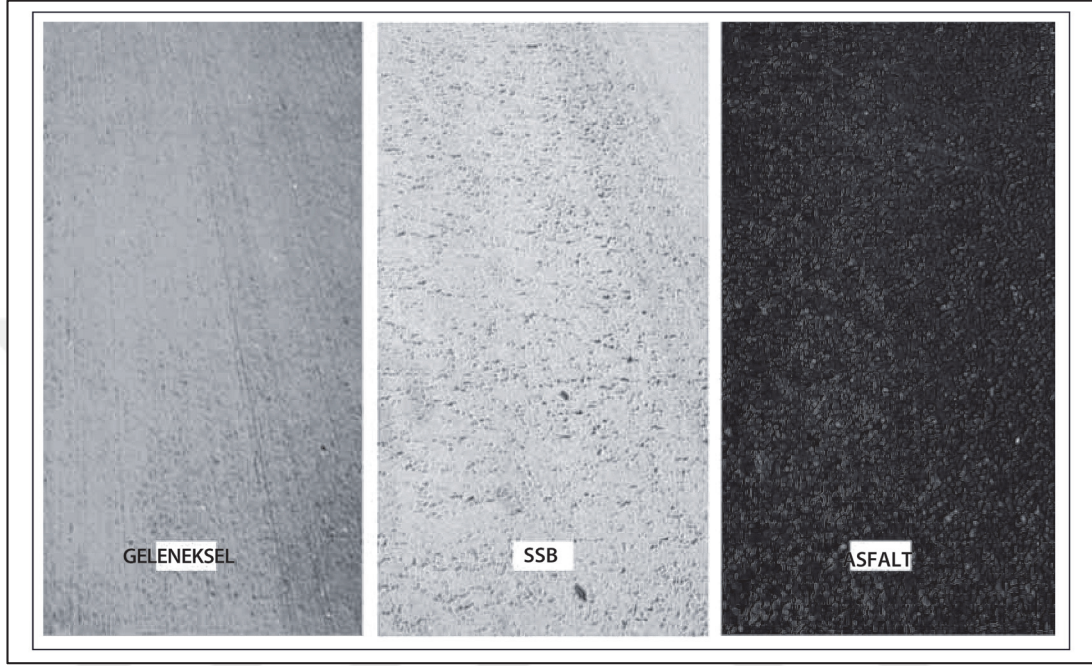
Şekil 1.3. Dayanım gelişiminin zamana göre değişimi (Harrington ve diğ., 2010)

Geleneksel beton ile SSB beton yol arasında malzeme karakteristikleri, işçilik ve yapım sonrası yürütülen faaliyetlerde birtakım farklılıklar bulunmaktadır (Tablo 1.1).

Tablo 1.1. Kaplama tipine göre karşılaştırılmalar (Yaman ve Ceylan, 2013)

ÖZELLİKLER	GELENEKSEL BETON YOL	SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON YOL
Karışım Oranları	Agrega, beton hacminin % 60-75'i düzeyindedir. Tipik s/ç = 0,40-0,45.	Agregalar beton hacminin % 75-85' ini oluşturur. Tipik s/ç < 0,40.
İşlenebilirlik	Karışım plastik ve akışkandır, çökme değeri yaklaşık 5 cm düzeyindedir	Karışımı nispeten kuru ve rijittir (Sıfır çökme değerindeki bir betondan daha rijit)
Kaplama Yapılması	Karışım, betonu titreşim aracılığıyla yayan, seviyelendiren, sıkıştırıcı ve çıkarıcı bir kayar kalıp beton sericinin önüne dökülmektedir.	Kendinden tahrikli asfalt kaplama sericisi ile serme işlemi yapılır. Herhangi bir kalıp sistemi kullanılmaz.
Sıkıştırma	Sıkıştırma işlemi içsel olarak meydana gelir. Başlangıçta, sericilerdeki daldırma ve yüzey tipi vibratörleri taze betonu akışkanlaştırır ve sıkışmış havanın çıkmasını sağlar. Beton sericiden sıkıştırılıp çıkıp, priz başlamadan önce katların (çimento ve agrega) çökmesi ve suyun yüzeye yukarı doğru hareketi (terleme) aracılığıyla ilave bir sıkışma meydana gelir.	SSB'de esas sıkıştırma işlemi betonun silindirlerle dışardan sıkıştırılmasıyla, genellikle beton karıştırma işleminden sonraki ilk 60 dakika içerisinde beton sertleşmeye başlamadan önce gerçekleştirilir.
Yüzey Düzeltme	Beton yüzeyinin düzeltilmesi, beton priz almaya başlamadan önce gerçekleştirilir. Geleneksel beton yolda araç ile yol arasındaki sürtünmeyi artırmak için genellikle mekanik olarak bir yüzey pürüzlendirme işlemi yapılır.	SSB yol yüzeyi tipik bir asfalt yol gibi açık yüzeyli olmasına rağmen, daha küçük agregaların kullanılması ve/veya çimento ilavesi ile daha yoğun bir yüzey (geleneksel betona yakın) elde edilebilir. SSB yol yüzeyi elmas taşıma yöntemiyle de şekillendirilebilir.
Hidratasyon	Beton karışımının uygun hidratasyonu yol betonunun uzun süreli dayanıklılığı için oldukça önemlidir. Hidratasyona yardımcı olması için, betonun bakımı önemli bir gereksinimdir.	
Kür İşlemi	Yüzey düzeltme işleminden sonra kusursuz bir kür işlemi gereklidir. Betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlayan çimentonun hidratasyonunu mümkün kılabilmek için beton yüzeyinden suyun buharlaşmasının kontrol edilmesi önemlidir.	Silindirlerle sıkıştırma işleminden sonra kusursuz bir kür işlemi gereklidir. Betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlayan çimentonun hidratasyonunu mümkün kılabilmek için beton yüzeyinden suyun buharlaşmasının kontrol edilmesi önemlidir.
Çatlama, Yük Transferi ve Güçlendirme	Geleneksel derzli beton kaplamalarda çatlakların yeri sonradan kesilen derzlerle kontrol edilir. En az 20 cm veya daha kalın kaplamalarda yük transferi içinse bu derzlerdeki kayma donatıları ile agregaların birbirine kenetlenmesine yardımcı olan boyuna çubuk donatılar kullanılır. Sürekli donatılı beton yol kaplamalarda ise daha kısa aralıklarla doğal olarak oluşan çatlakların oluşmasına izin verilerek yük aktarımında agregaların birbirine kenetlenmesi ve çelik donatı birlikte yardımcı olur.	Endüstriyel uygulamalarda SSB yol derzleri genellikle kesilmezler. Bu gibi kesme işleminin istenmediği durumlarda 4,5 ile 9 m aralığında rastgele oluşan dar çatlaklar ve agregaların birbirine kenetlenmesi aracılığıyla yük transferi sağlanır. Araba ve kamyon trafiği uygulamalarında ise rastgele beton çatlakların kontrolü için kesme işlemi istenir. SSB yollarda geleneksel beton yollara göre daha az derz kesilir. Enine derzler 4,5 ile 9 m aralıklarda yerleştirilir. SSB yollardaki sıkıştırma yönteminden dolayı derzlerde kayma donatısı yerleştirmek mümkün değildir.

SSB yüzey pürüzlülüğü tipik olarak asfalt yüzeyine benzer, fakat geleneksel betona göre daha açık ve pürüzlüdür (Şekil 1.4). Buna rağmen, daha yoğun pürüzlü yüzeyler elmas kesme veya bileme (grinding) işlemleriyle elde edilebilir (Harrington ve diğ., 2010)



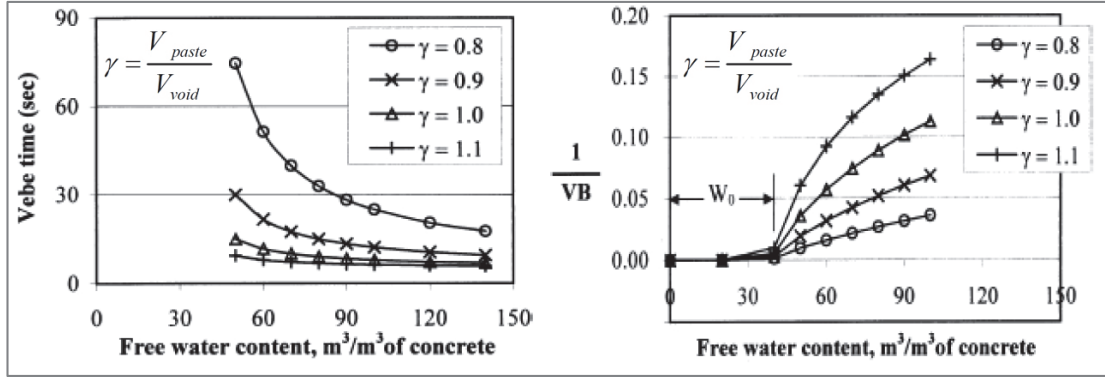
Şekil 1.4. Kaplama tipine göre yüzey dokusu (Harrington ve diğ., 2010)

### 1.1.1. Kıvam

Betonun taze haldeki kıvamını etkileyen başlıca faktörün serbest su içeriği olduğu bildirilmiştir (Khunthiongkeaw ve Tangtermsirkul, 2003). Çünkü karışıma su eklendiğinde katı danecikler arasındaki mesafe ve yağlanma etkisi artmaktadır. SSB gibi sert kıvamdaki karışımların kıvamını ölçebilmek için Vebe kıvam ölçerler kullanılmaktadır. Bu test, özellikle çok kuru karışımlar için iyi bir laboratuvar testidir. Buna ek olarak, betonun sahadaki yerleştirme yöntemini yansıması açısından Vebe süresinin tespiti önemlidir.

Kıvam tahmin modelinin geliştirilmesi için yapılan bir çalışmada araştırmacılar, Vebe süresi ile karışımların serbest su içeriği arasında birtakım korelasyonlar geliştirmişlerdir. Bu ilişkiler Şekil 1.5'te gösterilmektedir (Khunthiongkeaw ve Tangtermsirkul, 2003).





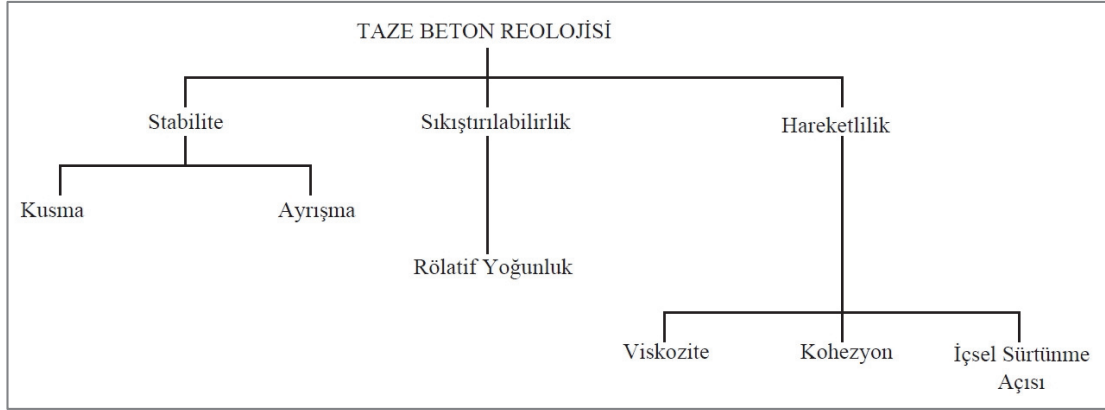
Şekil 1.5. Vebe süresi ve serbest su içeriği arasındaki ilişki (Khunthiongkeaw ve Tangtermsirkul, 2003)

Bu grafiklere göre;

- Karışımın serbest su içeriği belirli bir değerden düşükse, Vebe süresi önemli derecede artar. Bunun nedeni katı daneler arasındaki sürtünme ve yüzey kuvvetlerini aşmak için gerekli olan su miktarının yeterli olmamasıdır. Karışımın işlenebilir hale getirilmesi için gereken minimum serbest su miktarı, karışımdaki katı daneler arasındaki yüzey kuvvetlerinden doğrudan etkilenir.
- $\gamma$  artışı ile Vebe süresi azalır. Bunun nedeni de, daha yüksek çimento hamuru içeriğine sahip karışımlarda agregalar iyi dağılmış haldeyken, hamur içinde daha büyük bir partiküler mesafeye sahip olmalarıdır. Bu durum, karışımın daha iyi şekil değiştirebilmesine ve daha kısa sürede tüm boşlukların dolmasına olanak tanımaktadır.

### 1.1.2. İşlenebilirlik

Betonun yerleştirilmesi maliyeti işlenebilirliğine bağlıdır ve üniform yapıda bir serim yapılabilmesi için karışımın ayrışma olmadan yeteri düzeyde akışkan olması gereklidir. Karışımın işlenebilirliği; s/ç oranı, agrega gradasyonu, karışım türü ve dozaj dâhil olmak üzere birçok değişkenden etkilenmektedir. Betonun reolojisi, işlenebilirliğine karar vermede çok önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 1.6, taze beton reolojisini etkileyen faktörleri göstermektedir (ACI, 1981).



Şekil 1.6. Betonun reolojisini etkileyen faktörler (ACI, 1981)

Kuru özelliği nedeniyle SSB karışımlarında kusma problemi görülmez, fakat tanecikli yapı nedeniyle karışımın ayrışma yapma eğilimi vardır. Ayrışma riski, iyi derecelendirilmiş agrega ve uygun ince dane içeriği ayarlanarak kontrol altına alınabilir. Daha yüksek çimento içeriğindeki karışımlar genellikle daha tutarlıdır ve ayrışma olasılığı daha düşüktür (ACI, 1981).

Yüksek kompaksiyon enerjisi kullanılarak yüksek yoğunluklarda sıkıştırılmış aşırı kuru betonlarda, bazen uygun olmayan karışım oranları ve sıkıştırma nedeniyle gözenekli bir yapı oluşabilir. SSB karışımlarının sıkıştırılabilirlik ölçüm yöntemleri, ilk dolun hacim oranı (initial-filled volumes ratio), son dolun hacmi oranı (ultimate filled volumes ratio), konsolidasyon verimliliği ve enerji (consolidating efficiency and energy) şeklinde sıralanabilir. Bu indisler, yol kaplaması yapımında SSB karışımlarının uygunluğunu tahmin etmek için kullanılmaktadırlar (Kokubu ve Ueno, 1996; Kokubu ve diğ., 1993; Kokubu ve diğ., 1996).

### 1.1.3. Kuruma rötresi

Kuruma rötresi, çimento hamurunun yapısı, agreganın sıkıştırılabilirliği, agrega içeriği, numune geometrisi, betonun yaşı ve beton çevresindeki bağıl nem gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. SSB karışımlarında yapılan birçok araştırmada 28 günlük kuruma rötresi seviyesi 250-300 microstrain düzeyinde tespit edilmiştir (Ghafoori ve Cai, 1998; Pittman ve Ragan, 1998; Jingfu ve diğ., 2009; Khayat ve Libre, 2014). İçeriğinde %25 uçucu kül bulunan iri, orta, ince olmak üzere üç farklı agrega gradasyonu ve karışımdaki su içeriğinin optimum, fazla (opt. +%1) ve az (opt.

-%1) olmak üzere 3 farklı düzeyde seçildiği SSB numuneleri üzerinde yürütülen bir çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Pittman ve Ragan, 1998);

- Geleneksel betona nazaran daha düşük bir kuruma rötresi düzeyi tespit edilmiştir (28 günlük ortalama 150 microstrain).
- SSB karışımlarında kuruma rötresi üzerinde, su içeriği ve agrega derecelendirmesinin bireysel etkileri olmamalarına karşın, birlikte etkilerinin olduğu tespit edilmiştir.
- İri gradasyon ve fazla su içeriğine sahip numunelerde maksimum rötre görülürken, optimum su içeriğindeki orta dereceli karışımlarda en az rötre düzeyi gözlemlenmiştir.

Başka bir çalışmada ise aşağıdaki bulgular elde edilmiştir (Dias, 2004);

- Sabit çimento düzeyinde, agrega içeriği tarafından daha yüksek oranlarda kenetlenme kuvveti sağlandığından, iri agrega içeriği arttıkça kuruma rötresi azalmıştır.
- Artan çimento hamuru içeriği ile kuruma rötresi artmıştır. Bu araştırma sonuçlarının bazıları Tablo 1.2’de gösterilmektedir.

Tablo 1.2. Çimento ve iri agrega düzeyinin kuruma rötresine etkisi (Dias, 2004)

Çimento İçeriği (%)	Ağırlıkça İri Agrega İçeriği (%)		
	50	55	60
	Kuruma Rötresi (microstrain)		
9	248	218	203
12	270	236	217
15	298	277	255

Çimento içeriğinin 403 - 438 kg/m<sup>3</sup> olarak seçildiği bir çalışmada, SSB kaplama gövdesinden alınan prizmatik numunelerde, 112. gün sonunda 500–700 microstrain mertebesinde kuruma rötresi düzeyi tespit edilmiştir (Damrongwiriyanupap ve diğ., 2012).

#### 1.1.4. Donma/çözülme direnci

SSB gibi kuru karışımlar, geleneksel betonlara göre farklı bir içyapıya sahiptirler. Geleneksel betonlarda geçerli olan donma/çözülme ile ilgili teorilerin kuru karışımlarda da uygulanabileceği net olarak ortaya konmuş değildir (Pigeon ve Pleau, 1995). Daha önce belirtildiği gibi SSB, iyi bir sıkılık elde edebilmek için doğru

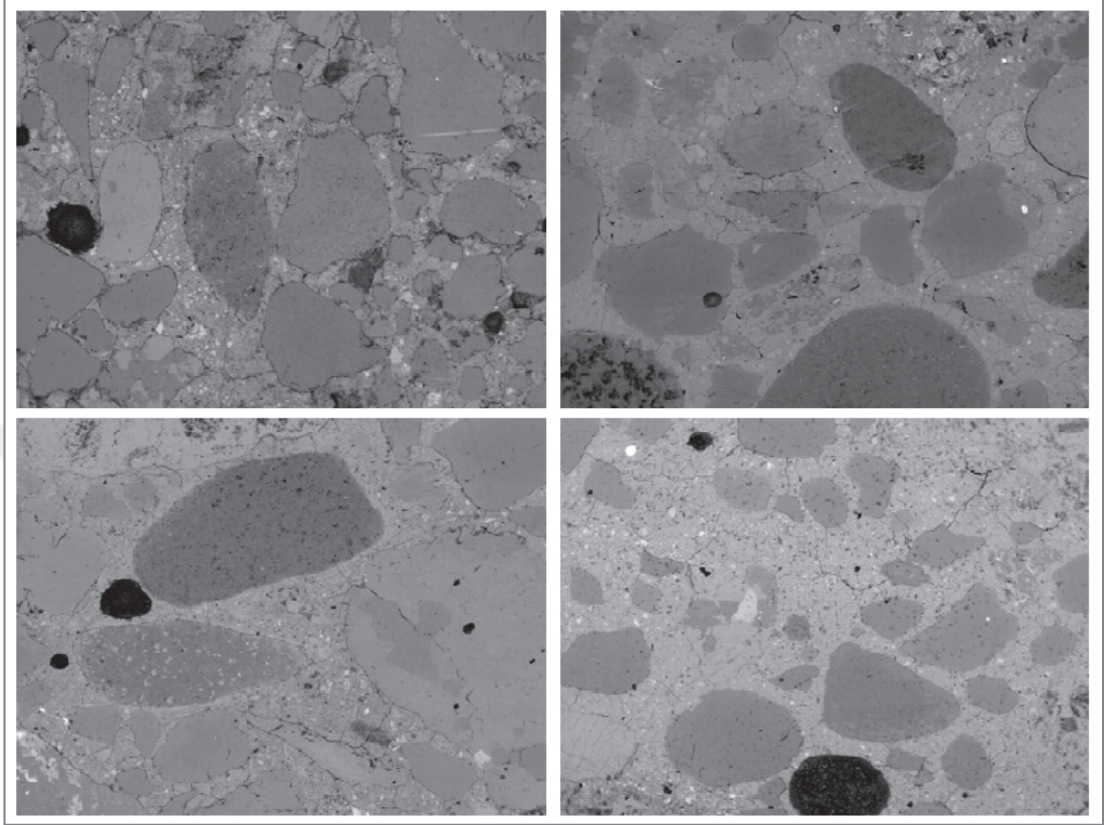
miktarda su ile düşük çimento hamuru formunda ortaya çıkan çok kuru ve sert bir kıvamına sahiptir. Dolayısıyla büyük ölçüde kendinden konsolide olan geleneksel betonlardan farklı olarak, SSB karışımına şekil verilebilmesi için ek sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır (Pigeon ve Pleau, 1995).

SSB'nin mikroyapısı, mekanik, hidrolik ve fiziksel yük gibi farklı etkilere verilen tepkilerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. SSB karışımlarında kompaksiyon boşluklarının varlığı en belirgin farklardan biri olarak gösterilebilir. Geleneksel betonlarda hapsolmuş havanın dışarı atılması için titreşim uygulanır. Ancak SSB yapısının sıkı ve sert yapısı nedeniyle, kompaksiyon boşluklarına benzer bir şekilde gelişigüzel yayılmış hava boşluklarının atılması mümkün değildir. Kompaksiyon boşluklarının miktarı ve yapısı, çimento hamurunun kompozisyonu ve kararlılığına, betonun kıvamına, agrega dokusu ve şekline bağlıdır (Hazaree, 2007).

Geleneksel betonlara göre bir diğer farklılık, çimento hamurunun göreceli olarak heterojen bir yapıda olmasıdır. Karışımın daha düşük kıvamda olması ve agrega içeriğinin nispeten daha yüksek olması nedeniyle çimento tanelerinin homojen bir şekilde dağılması oldukça zordur (Pigeon ve Pleau, 1995). Dolayısıyla karışım, kuru çimento hamurunu ince bir tabaka gibi kaplayan agrega iskeleti gibi düşünülebilir. Bu danelerin derecelendirilmesi iyi optimize edilirse, kompaksiyon boşluklarının sayısı düşürülebilir. Aksi durumlarda, oran artabilir ve karışım içerisindeki bu boşluklar sürekli bir ağ oluşturabilirler (Pigeon ve Marchand, 1996).

Karışımın kuru bir kıvamına sahip olması ve agreganın kısıtlayıcı etkisiyle sıkıştırma işlemi sırasında, geleneksel karışımlara nazaran agregalarda çok daha fazla kırılma olayı gerçekleşir. Buna bağlı olarak çok sayıda gözenekli ve kırık ara yüzey bölgesi oluşur (Şekil 1.7). Buna ek olarak, çimento hamurunun heterojen olması nedeniyle de daha geçirgen bir yapı oluşabilir. Bu durum, donma esnasında hava boşluklarına suyun hareketini kolaylaştırır ve ara yüzey bölgesinin donma sırasında hassas bir noktaya erişmesine neden olabilir (Pigeon ve Marchand, 1996). SSB karışımlarının kuru ve sert yapıları, bu gözenekli ara yüzeylerin oluşumunda önemli etkiler ortaya çıkarmaktadır. Yüksek derecedeki sertliğe bağlı olarak, agrega daneleri etrafındaki çimento hareketi karıştırma sırasında sınırlı hale gelmektedir. Islak agrega yüzeyindeki su filmi karışım boyunca yeterince dağıtılamaz, böylece ara yüzeydeki

gözeneklilik artar. Yüksek kapasiteli karıştırıcıların bile agrega yüzeyindeki su filmi çıkarmada etkili olmadıkları tespit edilmiştir (Marchand ve diğ., 1996).

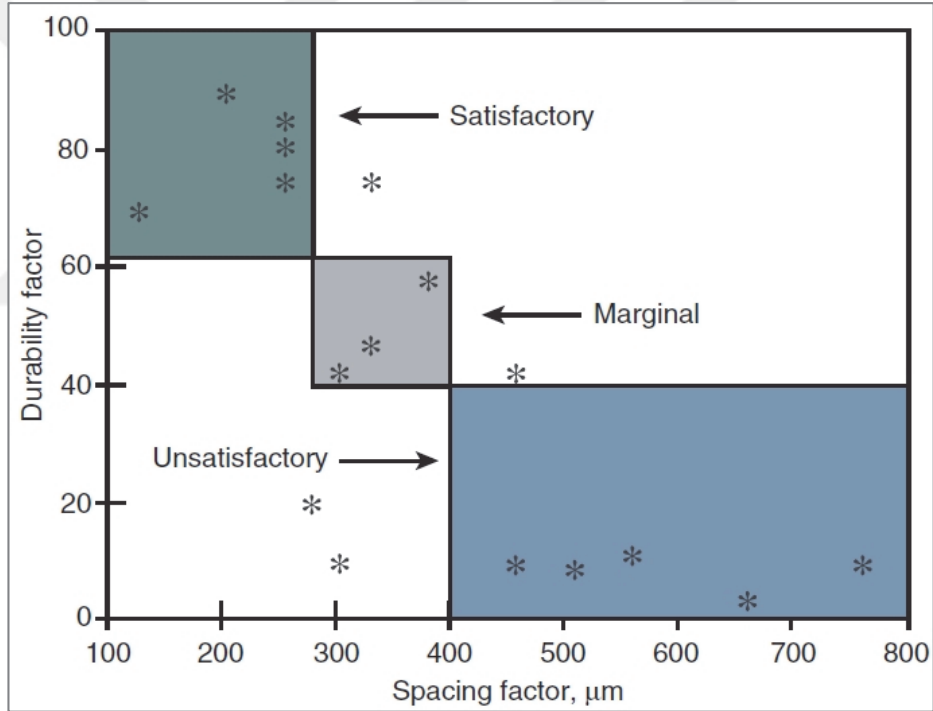


Şekil 1.7. SSB içyapılarında gözlemlenen çatlaklar [SEM, 40x] (Hazaree, 2007)

Betonun donma hasarına karşı korunması için bünyesindeki toplam hava içeriği en önemli parametredir ve konvansiyonel olarak sürüklenen hava, betonun donma/çözülme direncini yansıtan bir parametre olarak karakterize edilir. Kuru karışımlarda, bu hava kabarcıklarının oluşabilmesi için bir çeşit yoğurma işlemi yapılır. Bu süreçte karıştırıcı enerjisinin düzeyi önemli bir yere sahiptir (Hazaree, 2007). Diğer taraftan vibrasyon uygulanması hava içeriğini azaltır, bu vesileyle büyük boşlukların oluşması kolay bir şekilde önlenbilir (Dolch, 1995). SSB gibi kuru karışımlarda hava sürükleyebilmek için, karıştırma sırası; çimento, su, hava sürükleyici katkı ve tek bir agrega fraksiyonu olarak seçilmelidir. Karıştırma işlemine, yeteri düzeyde hava boşluğu elde edildikten sonra geri kalan agregaların ilave edilmesiyle devam edilir (Andersson, 1987).

Bazı laboratuvar ve saha araştırmalarında, hapsolmuş hava miktarının kompaksiyon boşlukları ile geliştiği, bunun yanında hava sürüklenmiş boşluk formlarının da

karışımlar içerisinde gelişigüzel yer aldığı gözlemlenmiştir (Whiting, 1985; Marchand ve diğ., 1990). Ters akımlı pan-mikserlerin, SSB'de havanın tutulmasında etkili olduğu tespit edilmiştir (Marchand ve diğ., 1998). Bir araştırmada, SSB karışımlarında % 0,1 - 0,6 düzeyinde küresel hava kabarcığı tespit edilmiştir. Nispeten düşük oranda olan bu hava kabarcıklarının açıklık faktörü (spacing factor) 84 - 169  $\mu\text{m}$  ve özgül yüzeyi (specific surface) 11,7 - 21,9  $\text{mm}^{-1}$  düzeyinde hesaplanmıştır (Delagrave ve diğ., 1997). 1976-1985 yılları arasında SSB kaplamalarında yapılan bir araştırmada durabilite özelliği, açıklık faktörü ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 1.8). Mikroskobik incelemede, kaplamalarda belirgin miktarda hava kabarcığı bulunmadığı saptanmış ve donmaya karşı olan direncin, kompaksiyon ile oluşan boşluk sistemi ile sağlandığı tespit edilmiştir.



Şekil 1.8. SSB için açıklık faktörü ve durabilite ilişkisi (Ragan, 1986)

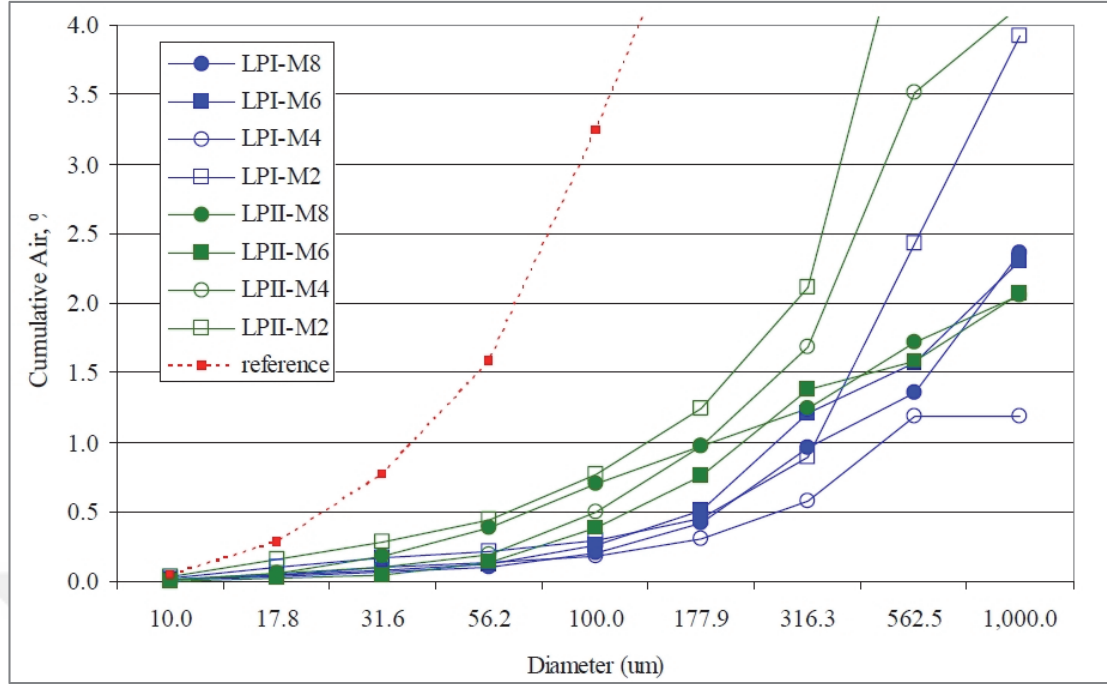
British Columbia (Lowe, 1988) ve New Hampshire'daki (Hutchinson ve diğ., 1987) bazı SSB yapılarında karışım içeriğine hava sürüklenmemiş olmasına rağmen, betonun donma/çözülmeye karşı dirençli olduğu, ancak tüm bölgelerde bunun geçerli olmadığı saptanmıştır. Fakat British Columbia'daki projeden alınan numuneler, ASTM C666 standardına göre laboratuvar testlerinde birtakım çelişkili sonuçlar doğurmuş, bu uyumsuzluk başka bir SSB çalışmasında da doğrulanmıştır (Liu, 1991).

Özetle, içsel çatlaklar ile beraber kompaksiyon boşlukları, hava sürükleyici katkı kullanılarak elde edilen boşluklar gibi koruma sağlayabilir. SSB karışımlarında yüksek geçirimsizlik özelliklerinin olmasının, donma sırasında hava boşluklarına hareket eden su akışı nedeniyle iç basıncın düşmesi gibi olumlu etkileri de vardır. Bununla birlikte kompaksiyon boşlukları her zaman yeterli bir koruma sağlayamayabilir (Pigeon ve Pleau, 1995).

Farklı çimento düzeylerinde (150-450 kg/m<sup>3</sup>) hazırlanan SSB karışımlarının donma/çözülme direncinin tespit edildiği bir çalışmada (Hazaree, 2007), SSB karışımlarında hava sürükleyici katkı kullanılmasının mümkün olabileceği görülmüştür. Çalışmaya ait karışım parametreleri Tablo 1.3’de, boşluk analizi ise Şekil 1.9’da verilmiştir.

Tablo 1.3. SSB karışımlara ait parametreler (Hazaree, 2007)

Kodu	Karışım	Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	İnce Agregası (kg/m <sup>3</sup> )	İri Agregası (kg/m <sup>3</sup> )	Su Azaltıcı (kg/m <sup>3</sup> )	Hava Sürükleyici (kg/m <sup>3</sup> )	Su/Çimento	Ve-Be (s)	Max. Kuru Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Kütütlece Su Emme (%)	Porozite (%)
Kontrol	LPIM2	150	1103	982	2,3	0	0,85	50	2425	25,5	4,32	10,8
	LPIM4	250	918	1087	3,8	0	0,50	43	2500	51,9	3,95	10,2
	LPIM6	350	791	1137	5,3	0	0,35	39	2490	57,7	4,06	10,2
	LPIM8	450	671	1176	6,8	0	0,27	40	2480	55,5	4,91	12,2
Hava Sürüklenmiş	LPIIM2	150	1104	984	2,3	1,2	0,85	42	2410	22,5	4,34	10,7
	LPIIM4	250	924	1094	3,8	2,0	0,48	46	2536	45,3	3,70	9,6
	LPIIM6	350	765	1142	5,3	2,8	0,34	38	2518	51,6	4,24	10,7
	LPIIM8	450	676	1184	6,8	3,6	0,26	41	2430	50,9	5,20	12,7



Şekil 1.9. Hava sürükleyici katkı ve çimento düzeyine göre hava içeriği değişimi (Hazaree, 2007)

Bu çalışma sonuçlarına göre, hava sürükleyici katkı kullanımıyla boşluk oranının arttığı tespit edilmiştir. ASTM C 666 ya göre yapılan donma/çözülme testlerinde ise, hava sürüklenmemiş ve çimento düzeyi  $300 \text{ kg/m}^3$  ve yukarısı olan karışımlarda, Rölatif Dinamik Elastisite Modülü'nün 300 döngü sonunda %65 ve yukarısı seviyesinde olduğu saptanmıştır. Karışımlara hava sürüklendiğinde ise, sürüklenen hava sayesinde karışımlarda 300 döngü sonunda %9-22 arasında bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir (Hazaree, 2007).

Farklı çimento düzeyleri ile elde edilen SSB karışımlarında donma/çözülme direnci açısından geleneksel beton düzeyinde veya daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür (Kuzu ve diğ., 1990; Liu ve Tatro, 1995).

Kanada ve ABD'de inşa edilen 34 farklı SSB yol kaplamasında yapılan bir incelemede, 20 yıla yakın bir süredir hizmet sağlayan kısımlarda gelişigüzel oluşan enine çatlaklar ve ilk donma/çözülme sezonunda gerçekleşen ince agrega kaybı dışında yapısal bir hasar gözlemlenmemiştir (Piggott, 1999).

Pei-wei ve diğ., (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, Çin'de bulunan Longtan barajında kullanılan SSB betonunun donma/çözülme direnci ve hava boşluğu özellikleri ASTM C666 yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Donma/çözülme



döngülerine tabi tutulmuş numunelerde dayanım ve kütle kayıpları arasında lineer bir korelasyon olduğunu belirlenmiştir. %50 uçucu kül ve %8 HNM (MgO-bearing expansive agent) içeren karışımda su/bağlayıcı oranı 0,48'den ve açıklık faktörü 0,4 mm'den düşükse, D<sub>300</sub> değerinin üzerinde bir durabilite faktörünün elde edilebileceği bildirilmiştir.

SSB karışımlarında geçirimsizlik ve donma/çözülme direncinin araştırıldığı bir çalışmaya göre, çimentonun uçucu kül ile belirli oranlarda ikame edilmesi ile hazırlanan karışımlarda, ilk 90 güne kadar artan uçucu kül içeriği ile durabilite özellikleri olumsuz yönde etkilenmiştir. Bunun yerine belirli bir grup agreganın uçucu kül ile ikame edildiği karışımlarda ise, numunelerin durabilite performansının olumlu yönde geliştiği tespit edilmiştir (Mardani-Aghabaglou ve diğ., 2013).

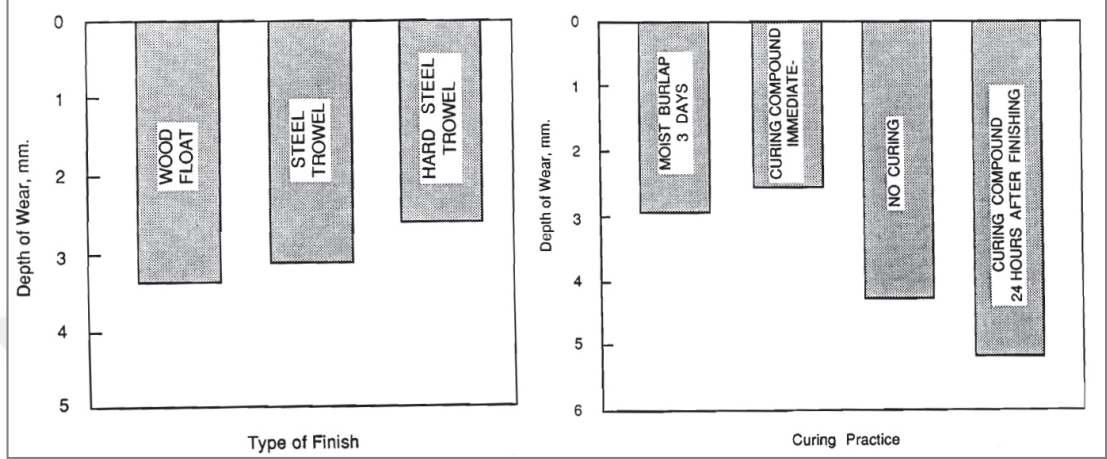
#### **1.1.5. Aşınma direnci**

Beton yüzeylerin aşınması çeşitli biçimlerde olabilir. Çoğunlukla zayıf tasarım detaylarından kaynaklanan kaviteasyon, yüksek hızlarda akan sıvılardaki düşük basınç kabarcıklarının ani oluşumu ve çökmesinden kaynaklanmaktadır (ACI, 2016). Erozyon, başka bir aşınma şekli olup, sıvılar tarafından taşınan aşındırıcı malzemelerin hareketinden kaynaklanmaktadır ve genellikle baraj, dolusavak, boru ve tünellerde meydana gelir. Beton kaplamalar ya da endüstriyel zeminlerde ise tekerlek direnci ile kaplama arasında sürtünme, sıyrılma, kayma veya nesnelere beton yüzeylerde hareketlenmesi sonucu oluşan üçüncü bir aşınma türü gerçekleşir.

Deney yöntemleri aynı parti numuneleri üzerinde gerçekleştirilse bile, test sonuçları her durum için oldukça farklı olabilmektedir. Bu yüzden, ağırlık ve hacim kaybı, görsel muayene veya penetrasyon derinliği gibi kıstaslara bağlı olarak göreceli aşınma mertebelerinin tespit edilmesi yeterli kabul edilir. Betonun aşınma direncini etkileyen başlıca faktörler, basınç dayanımı, agrega özellikleri, yüzey bitirme, kür ve yüzey sertleştiricilerinin kullanılması şeklinde sıralanabilir (Kettle ve Sadegzadeh, 1987).

Bir çalışmada, aynı partiden üretilmiş beton karışımlarda aşınma direnci üzerinde son bitirme işlemi ve kür uygulamalarının göreceli etkisi incelenmiştir. Son bitirme işlemlerinde ahşap mala, çelik mala ve sert çelik mala kullanılmıştır. Kürleme tekniği olarak da, üç gün süreyle nemli çuval uygulaması, yüzey bittikten hemen sonra

uygulanan kür kimyasalı, kürlenme yapılmaması ve kür kimyasalının gecikmeli olarak uygulanması olacak şekilde seçilmiştir. Şekil 1.10'da görüldüğü gibi, farklı son bitirme işlemi ve farklı kür uygulamalarında betonun aşınma direncinin göreceli olarak değiştiği tespit edilmiştir (Fentress, 1973).



Şekil 1.10. Son bitirme ve kür yönteminin aşınma direncine etkisi (Fentress, 1973)

Karışım içeriğindeki agreganın aşınma direnci, betonun aşınma direncinin belirlenmesinde bir başka önemli faktördür. Örneğin bazalt, kireç taşıdan daha serttir ve bu nedenle aşınmaya karşı daha dayanıklıdır. Betonun aşırı aşınmaya maruz kalması muhtemel durumlarda, üst katmanda sert agrega kullanılması betonun ömrünü büyük ölçüde uzatacaktır (ACI, 2016). Doğru zamanda ve teknikte yapılan yüzey bitirme işlemi ve kür uygulaması, betonun aşınma direncini önemli ölçüde artırır. En iyi sonuçlar, terleme suyunun yüzeye çıkması ve betonun yeterince sertleştiği zaman elde edilir. Betonun yeterli bir şekilde kürlenmesi, bitirme işlemi tamamlandıktan hemen sonra başlanmalı ve en az yedi gün boyunca devam ettirilmelidir (Kettle ve Sadegzadeh, 1987).

## 1.2. Geri Dönüşümlü Agrega Kullanımı

İnşaat yıkıntıları sonucunda ortaya çıkan RCA ve asfaltın yerinden kazınmasıyla ortaya çıkan RAP, SSB karışımları içeriğinde birçok araştırmaya konu olmuştur;

RCA ve RAP içerikli karışımların temel tabakalarında kullanıldığı bir çalışmada, RCA içerikli karışımların daha düşük kalıcı deformasyon sergilediği çevrimsel üç eksenli

yorulma testleri sonucunda kurulan deformasyon modeli ile gösterilmiştir (Bennert ve diğ., 2000).

RCA içerikli karışımların temel tabakalarında kullanıldığı bir çalışmada, Elastisite Modülü'nün kompaksiyon enerjisi ve kür periyodu ile ilişkisi incelenmiştir. Belli bir düzeyden sonra uygulanan ekstra sıkıştırma enerjisinin dayanım özelliklerini geliştirse bile, elastik şekil değiştirmeler üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceği tespit edilmiştir (Xuan ve diğ., 2012).

İspanya'da saha üzerinde gerçekleştirilen bir SSB granüler temel uygulamasında, çimento bağlayıcı kullanılarak elde edilen RCA içerikli karışımların, doğal agrega ile elde edilen karışımlar ile benzer mekanik sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Perez ve diğ., 2013).

Farklı atık malzemelerin (RAP, RCA, tuğla kırığı, cam parçacıkları, atık kaya kütleleri) SSB granüler temel ve SSB alttemel karışımları içeriğinde belirli oranlarda kullanıldığı bir çalışmada karışımların sıkıştırılabilirlik özellikleri incelenmiştir. RCA, tuğla kırığı ve atık kaya kütlelerinin kullanıldığı temel ve alttemel tabakalarında gerekli kesme mukavemetinin sağlandığı belirtilmiştir (Arulrajah ve diğ., 2014).

RCA'nın maksimum dane çapının mekanik özellikler üzerinde etkisinin incelendiği bir SSB granüler temel çalışmasında, 0-8 mm boyutundaki karışımların 0-40 mm boyutundaki karışımlara nazaran daha iyi dayanım ve dayanıklılık performansı sergilediği tespit edilmiştir (Del Rey ve diğ., 2015).

RCA kullanımının kaba agrega yerine %50 ve %100 olarak kullanıldığı bir SSB çalışmasında, çimento dozajı ve trafik yoğunluğuna göre uygun optimizasyonlarda yol tabanında temel tabakası olarak kullanılabilmesi saptanmıştır (Lopez-Uceda, 2016).

RAP içerikli SSB karışımların sıkıştırılabilirlik özelliklerinin doğal agrega ile hazırlanan SSB karışımlarla benzer olduğunun bildirildiği bir çalışmada, dayanım özelliklerindeki azalma nedeniyle RAP içerikli karışımların sadece SSB temel tabakalarında kullanılabilmesinin mümkün olabileceği belirtilmiştir (Courard ve diğ., 2010).

Bir çalışmada, farklı oranlarda RAP ve çelik lif kullanımıyla elde edilen SSB karışımlarında, lif içeriğinin artmasıyla tekrarlı yükler altında enerji yutma kapasitesinin

iyileştigini gösteren viskoelastik bir kırılma modeli geliştirilmiştir. Çalışmalarda RAP malzemenin sınırlı oranlarda kullanılması durumunda mekanik özellikler üzerinde ciddi bir azaltıcı etkisinin olmadığı görülmüştür (Bilodeau ve diğ., 2011; Bilodeau ve diğ., 2012).

RAP içerikli SSB karışımları üzerinde yürütülen mikroskobik bir incelemede, RAP ile çimento hamuru arasında bulunan ince asfalt filminin, dayanım ve Elastisite Modülü üzerinde azaltıcı bir etkisinin olduğu bildirilmiştir (Sachet ve diğ., 2013).

SSB içeriğinde %50 oranında RAP kullanılması durumunda, tokluk ve enerji yutma kapasitelerinde ciddi oranlarda azalma meydana geldiği için, karışım içeriğinde bu oranlara yakın değerlerde RAP kullanılması durumunda, kaplamanın sadece temel veya alttemel düzeyinde kullanılabileceği belirtilmiştir (Sachet ve diğ., 2011).

Hızlandırılmış test yöntemlerinin kullanıldığı bir proje çalışmasında, lif ve RAP içerikli SSB karışımlarının yorulmaya dayalı performansları gözlenmiş, ideal karışım optimizasyonundan sonra yol kaplama kalınlıklarının hesaplanabileceği bir dizayn kataloğu geliştirilmiştir (Nguyen ve diğ., 2012).

İçeriğinde pirinç kabuğu külü ve RAP bulunan SSB karışımlarında, %3 oranında pirinç kabuğu külü kullanımının poroziteyi düşürdüğü ve 120 gün sonundaki yorulma direncini önemli ölçüde iyileştirdiği bildirilmiştir (Modarres ve Hosseini, 2014).

SSB karışımlarında mekanik özelliklerin ve durabilite performanslarının belirlendiği bir çalışmada, RAP içerikli SSB karışım içeriğinde %50 düzeyine kadar RAP kullanılmasının uygun olabileceği belirtilmiştir (Settari ve diğ., 2015).

%16 RAP katkılı SSB karışımlarının kırılma özelliklerinin incelendiği bir çalışmada basınç dayanımları farklı olsa da, RAP katkılı örneklerin kırılma enerjisi özelliklerinin benzer olduğu saptanmıştır (Ferrebee ve diğ., 2014).

### **1.3. Karışım Tasarımı**

Kaliteli bir SSB karışımı elde edebilmek için, malzeme seçiminin yanı sıra bu malzemelerin doğru oranlarda kullanımı çok önemlidir. Dünya genelinde birçok karışım oranlama metodu başarıyla uygulanmaktadır. Uygulamada bu kadar fazla

yöntemin olması standart bir prosedürün oluşmamasını da beraberinde getirmiştir. Ancak genel itibarıyla en yaygın yöntemler aşağıdaki iki yaklaşımın farklı varyasyonları şeklinde gruplandırılabilir:

Zemin kompaksiyon modeli; kompaksiyon enerjisi kullanılarak karışım tasarımı, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim ağırlık parametreleri ile yapılır.

Kıvam veya işlenebilirlik modeli; su/çimento oranı yaklaşımı ile kıvam sabitlenerek, mutlak hacim yöntemi esaslarınca karışım tasarımı yapılır.

Tablo 1.4’de karışım tasarımında kullanılan yöntemler ve kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 1.4. Genel karışım tasarımı yöntemleri ve uygulamaları (ACI, 2011)

YÖNTEM	UYGULAMA SAHASI
Zemin sıkıştırma yöntemi	Yollar (Amerika’da en yaygın yöntem)
Beton kıvamı yöntemi Katı süspansiyon modeli Optimum çimento hamuru hacim yöntemi	Hidrolik yapılar (barajlar, dolu savaklar, vb.) ve yollar

### 1.3.1. Beton kıvamı yöntemi

Beton kıvamı yöntemi, agrega, su veya çimento miktarı gibi özel karışım parametrelerinin önceden belirlenmesini gerektirir. Vebe kıvam ölçer cihazıyla istenen kıvam seviyesine göre birtakım düzenlemeler yapılmaktadır. Bu yöntem esas olarak baraj yapılarında sıklıkla kullanılmıştır (ACI, 2011).

### 1.3.2. Katı süspansiyon modeli

Son yıllarda, SSB karışım tasarımı için daha teorik ve temel bir yaklaşım olan katı süspansiyon modeli geliştirilmiştir. Bu model, karışımın kuru yoğunluğunu optimize etmek amacıyla her bir kuru içeriğin (çimento, uçucu kül, silis dumanı, kum ve iri agrega) karışım içeriğindeki oranını belirlemeyi esas almaktadır. Optimize edilmiş kuru yoğunluğun referans alınmasıyla malzemeler arasındaki boşlukları tümüyle kaplayacak su miktarı hesaplanabilmektedir. Malzeme özelliklerinin bilinmesi durumunda, bilgisayar yazılımları sayesinde karmaşık optimizasyonlar yapılabilmektedir. Katı süspansiyon modelinin en büyük avantajı, çok sayıda deneme

karışımlarına gerek kalmadan optimum karışım oranlarının tekrardan hesaplanabilmesidir.

### 1.3.3. Optimum çimento hamuru hacim yöntemi

Bu yöntem, büyük beton yapıları için kullanılacak SSB karışımın optimizasyonu için geliştirilmiştir. Tasarım, kompaksiyon altında granüler yapının maksimum yoğunluğa ulaşması için taneler arasındaki boşlukları dolduracak yeteri miktardaki çimento hamurunun tespit edilmesi felsefesine dayanır.

### 1.3.4. Zemin sıkıştırma yöntemi

Bu oranlama metodu, SSB karışımları için belirli su muhtevalarına sahip numuneler üzerinde maksimum birim ağırlığı elde etmek amacıyla yapılan sıkıştırma proseslerini dolayısıyla da su muhtevası ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi içermektedir.

Yöntem, sırasıyla iyi derecelenmiş agreganın seçimi, orta seviyede bir çimento içeriğinin seçimi, su muhtevası-yoğunluk ilişkisi grafiğinin oluşturulması, basınç mukavemetinin ölçülmesi için numunelerin dökülmesi, gerekli çimento miktarının seçimi, karışım oranlarının hesaplanması adımlarından oluşmaktadır.

İlk adım, agreganın gradasyon, segregasyon ve sıkıştırılabilirlik açısından optimize edilmesidir. Agreganın tane boyut dağılımı, maksimum yoğunluktaki dizilime yaklaşmalıdır. Tablo 1.5’de bu şartlar için tavsiye edilen gradasyon limitleri verilmektedir.

Tablo 1.5. Gradasyon limitleri (PCA, 2004)

ELEKLER (mm)		Min (%)	Max (%)
25	1 in.	100,0	100,0
19	3/4 in.	90,0	100,0
12,5	1/2 in.	70,0	90,0
9,5	3/8 in.	60,0	85,0
4,75	No. 4	40,0	60,0
1,18	No. 16	20,0	40,0
0,15	No. 100	6,0	18,0
0,075	No. 200	2,0	8,0

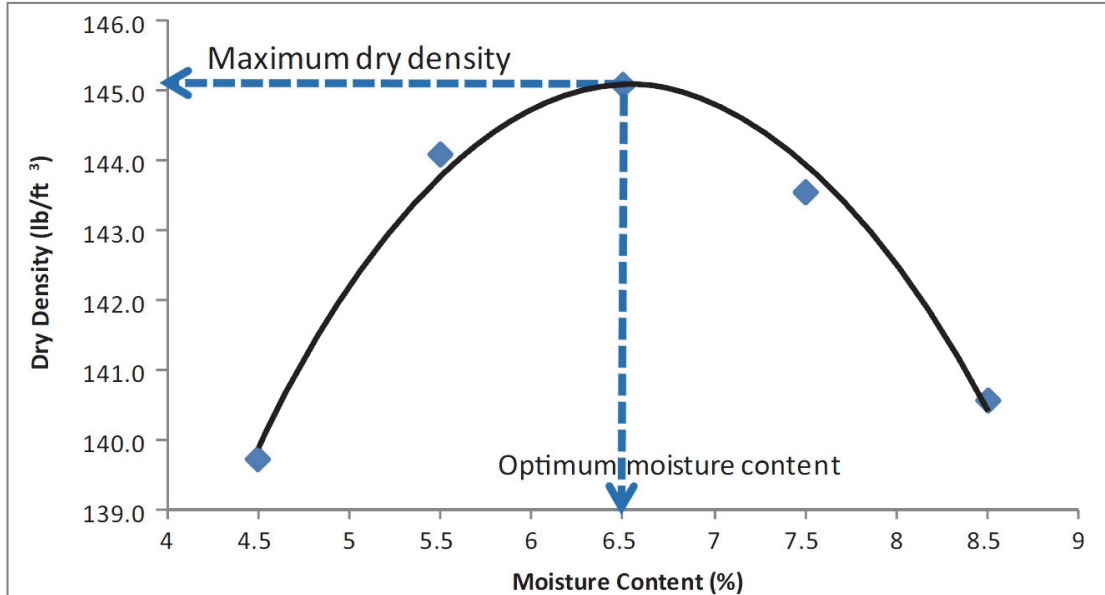
Bağlayıcı malzemenin seçimi proje özelliklerine, ekonomik beklentilere, malzemenin elde edilebilir olup olmadığına bağlıdır. Aşınma tabakası uygulamaları için herhangi bir katkı (uçucu kül, silis dumanı vb.) ilavesi olmadan ağırlıkça %11 ile %13 arası bir çimento düzeyi seçilebilir. Karışım içerisindeki çimento yüzdesi aşağıdaki formülle ifade edilir;

$$\text{Bağlayıcı malzeme (\%)} = \frac{\text{Bağlayıcı malzeme ağırlığı}}{\text{Bağlayıcı malzeme} + \text{kuru agrega ağırlığı}} \times 100 \quad (1.1)$$

Her bir çimento düzeyi için kuru birim ağırlık-su muhtevası eğrileri oluşturularak, maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su içeriği tespit edilir. Üç farklı bağlayıcı içeriği için en az üç eğrinin çizilmesi gerektiği belirtilmiştir (ACI, 2011). Bu amaçla Proctor sıkıştırma prosedürleri kullanılacağı gibi, sarsma tablası yöntemi de bu ilişkilerin belirlenmesi için kullanılabilir (ASTM D1557, ASTM D698, ASTM C1170 / C1170M). Karışım içeriğindeki su muhtevası şu şekilde ifade edilir;

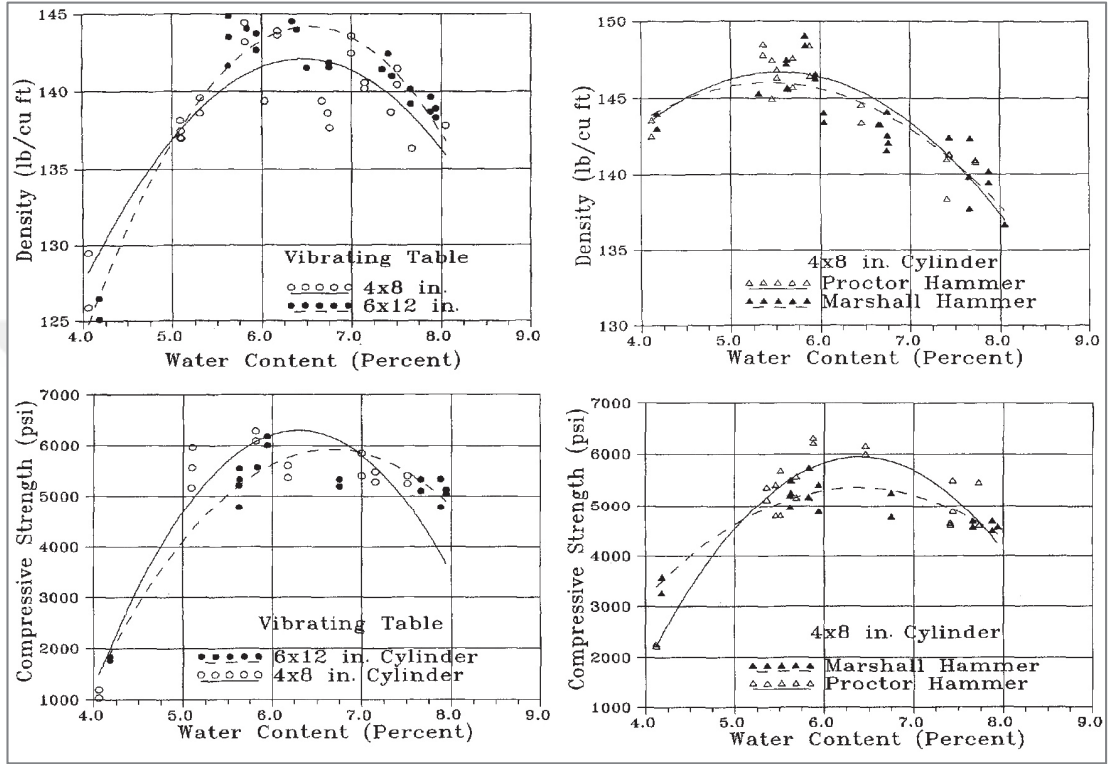
$$\text{Su Muhtevası (\%)} = \frac{\text{Su ağırlığı}}{\text{Bağlayıcı malzeme} + \text{kuru agrega ağırlığı}} \times 100 \quad (1.2)$$

Tipik bir kuru birim ağırlık-su içeriği değişimi grafiği Şekil 1.11’de verilmektedir.

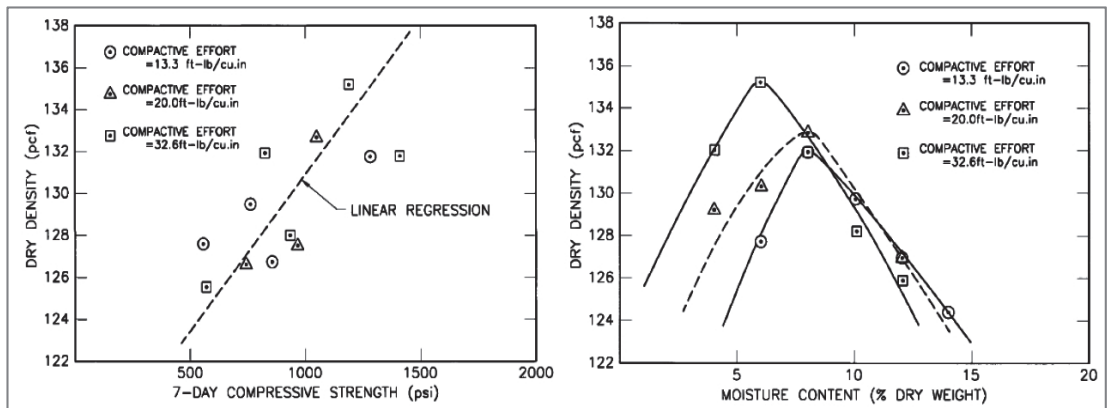


Şekil 1.11. SSB için tipik kuru birim ağırlık su içeriği ilişkisi (ACI, 2011; PCA, 2004; Harrington ve diğ., 2010)

Kompaksiyon enerjisi üzerine sınırlı sayıda yapılan çalışmada, numune boyutlarının sıkıştırma enerjisi ile korelasyonu üzerinde odaklanılmıştır. Şekil 1.12 ve 1.13, bu araştırmaların bazı sonuçlarını göstermektedir (Nanni ve Meamarian, 1993; Reeves ve Yates, 1985).



Şekil 1.12. Kompaksiyon enerjisinin etkileri (Nanni ve Meamarian, 1993)



Şekil 1.13. Kompaksiyon enerjisindeki değişimin etkileri (Reeves ve Yates, 1985)

Laboratuvar denemelerinde elde edilen kuru birim ağırlık daha yüksekse, sahada elde edilen pratik yoğunlukla karşılaştırıldığında rölatif yoğunluk düşebilir. Dolayısıyla laboratuvarında elde edilen maksimum kuru birim ağırlık, saha üzerinde hedeflenen yoğunluğa göre kalibre edilmelidir. Bununla ilgili bir diğer önemli husus, kalıp



cidarlarında sınırlandırmanın nispi miktarıdır. Bu durum, karışımın kıvamına ve numune boyutuna bağlı olarak yoğunlukları önemli miktarda değiştirebilir (Reeves ve Yates, 1985).

Optimum su muhtevası belirlenen karışımlarda basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla, titreşimli tokmak veya sarsma tablası yardımıyla numuneler üretilir (ASTM C1435, ASTM C1170). Diğer taraftan su muhtevası değeri, deneylerde kullanılan çimento içeriğinin değişimi ile çok fazla değişmiyorsa, optimum su muhtevası enterpolasyon ile belirlenebilir. Optimum su muhtevası ve çimento içeriğinin nihai seçiminden sonra, güvenlik katsayıları kullanılarak proje için karışım oranları hesaplanabilir. Amerika ve Kanada’da uygulanmış SSB projelerindeki beton karışım oranları ve mühendislik özelliklerinden birkaçı Tablo 1.6’da verilmiştir.

Tablo 1.6. SSB karışım tasarımı için birkaç örnek (Harrington ve diğ., 2010)

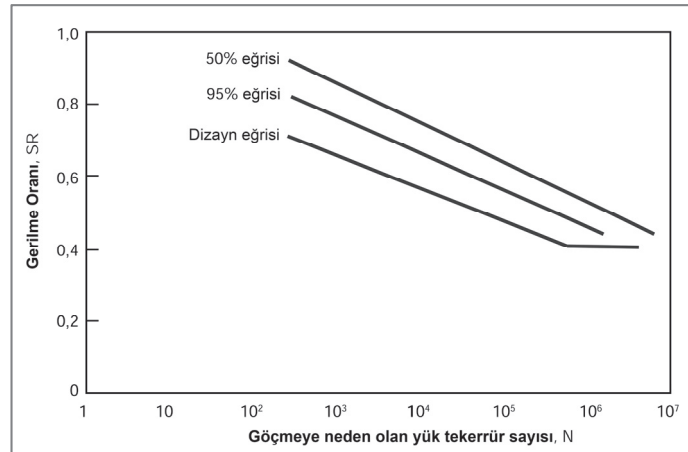
MALZEME VE KARIŞIM ÖZELLİKLERİ		BİRİMİ	Takoma Liman	CTL Karışım	Chattanooga	Brownsville	Güney Karolina	Atlanta	Kanada
Bağlayıcılar	Çimento	(kg/m <sup>3</sup> )	267	300	178	300	263	300	300
	Uçucu Kül	(kg/m <sup>3</sup> )	59	0	89	0	0	0	0
Agregalar	Max. Agregada Boyutu	(mm)	16	19	19	19	25	13	19
	İri Agregada	(kg/m <sup>3</sup> )	1008	817	1251	763	1043	978	1255
	İnce Agregada	(kg/m <sup>3</sup> )	1008	1249	983	1045	983	978	800
	İnce Malzeme (<75 µm)	(%)	3-7	2	3,6	2	-	-	-
Su	Su	(kg/m <sup>3</sup> )	152	125	113	140	128	158	95
Kimyasal Katkılar	Su Azaltıcı / Priz Geciktirici	(kg)	-	-	0,504	-	-	0	1,148
	Hava Sürükleyici	(kg)	-	-	0	-	-	0	1,148
Karışım Parametresi	Yaş Yoğunluk	(kg/m <sup>3</sup> )	2472	2435	-	2358	-	2408	2513
	Su/Çimento	-	0,47	0,42	0,42	0,47	0,49	0,53	0,32
	Agregada/Çimento (Ağırlık)	-	6,18	6,91	8,37	6,05	7,70	6,60	6,93
	İnce / Toplam Agregada	(%)	50,0	60,5	44,0	57,8	48,5	50,0	38,9
Dayanım	Basınç (MPa)	3 gün	12,7	-	-	21,3	25,0	27,1	-
		7 gün	-	38,2	35,6	-	-	-	-
		28 gün	42,4	55,3	42,7	34,6	36,5	36,1	58,6
	Eğilme (MPa)	3 gün	3,7	-	-	3,5	-	-	-
		7 gün	-	4,8	4,3	-	-	-	-
		28 gün	5,4	6,3	4,9	4,5	-	-	-
	Eğilme/Basınç Oranı, 28 Günlük	(%)	12,7	11,4	11,5	12,9	-	-	-

#### 1.4. Yapısal Tasarım

SSB yollar, mühendislik özellikleri bakımından geleneksel beton yollara benzediğinden, kaplama kalınlığı hesaplanmalarında geleneksel beton kaplamalarda kullanılan yöntemler kullanılmaktadır. İki karışım arasındaki en büyük farklılık, SSB karışımları daha az su ve çimento içeriğine sahip olduğu için, rötne mertebeleri daha düşüktür. Tasarım yöntemleri, esas olarak tekerlek yükleri nedeniyle meydana gelecek eğilme gerilmeleri ve kalıcı hasarların izin verilen sınırlar içerisinde olması esasına dayanmaktadır. Kaplama kalınlığı, dingil yükü, betonun eğilme dayanımı ve zemin özelliğinin bir fonksiyondur. Dolayısıyla tasarım yaklaşımı kaplamaların belirli bir büyüklükte ve periyotta tekrarlanan yükleri, göçme olmadan taşıyabileceği esasına dayanmaktadır. Ağır endüstriyel uygulamalardaki kaplamalar için kalınlık tasarım yöntemleri, çoğunlukla PCA (Portland Cement Association) ve USACE (The United States Army Corps of Engineers) tarafından geliştirilmiştir. Yorulma ilişkisini tanımlamak için kullanılan gerilme oranı, kritik eğilme gerilmelerinin, malzeme eğilme dayanımına oranı şeklinde ifade edilmektedir;

$$\text{Gerilme Oranı} = \frac{\text{Uygulanan kritik eğilme gerilmesi}}{\text{Betonun eğilme mukavemeti}} \quad (1.3)$$

Buradaki eğilme mukavemeti, betonun 3 nokta yükleme deneyine tabi tutularak elde edilen eğilme dayanımını ifade etmektedir (ASTM C78, AASHTO T97, CAN/CSA-A23.2-8C-14). Şekil 1.14’de, 4 farklı SSB kaplama gövdesinden alınan kiriş numuneler üzerinde yapılan örnek bir yorulma testi grafiği görülmektedir.



Şekil 1.14. Yük tekerrür sayısı ile yorulma ilişkisi (PCA, 1987)

Kaplama tasarımları, ACI (American Concrete Institute), PCA ve USACE tablolarından yapılacağı gibi, WinPAS, Street-Pave, SSB-PAVE gibi yazılımlar yardımıyla da yapılabilmektedir. Tasarım programları kullanılırken programa önceden tanımlanmış yük transfer sınırlayıcılarının bilinmesi önem taşır. Tekerek yükü nedeniyle meydana gelen gerilme, şekil değiştirme ve yorulma kaplamanın kenar ve birleşim noktalarında, kaplamanın iç bölgelerine göre daha fazladır (PCA, 1987). Bu nedenle birleşim performansı (etkili bir şekilde transfer edilen yükün yüzdesi) beton kaplamanın yorulma ömründe önemli bir rol oynar. Kenar bölgelerinde oluşan gerilmeleri azaltmak amacıyla, yükün kenarlardan taşındığı varsayımına dayanarak, kaplama kalınlığı artırılır. Kaplama birleşim noktalarındaki gerilmeleri azaltmak için ise, yük transferinin etkili bir şekilde gerçekleşmesi amacıyla yeterli agrega kenetlenmesinin olması gerektiği bildirilmiştir (PCA, 1987).

### 1.5. Üretim

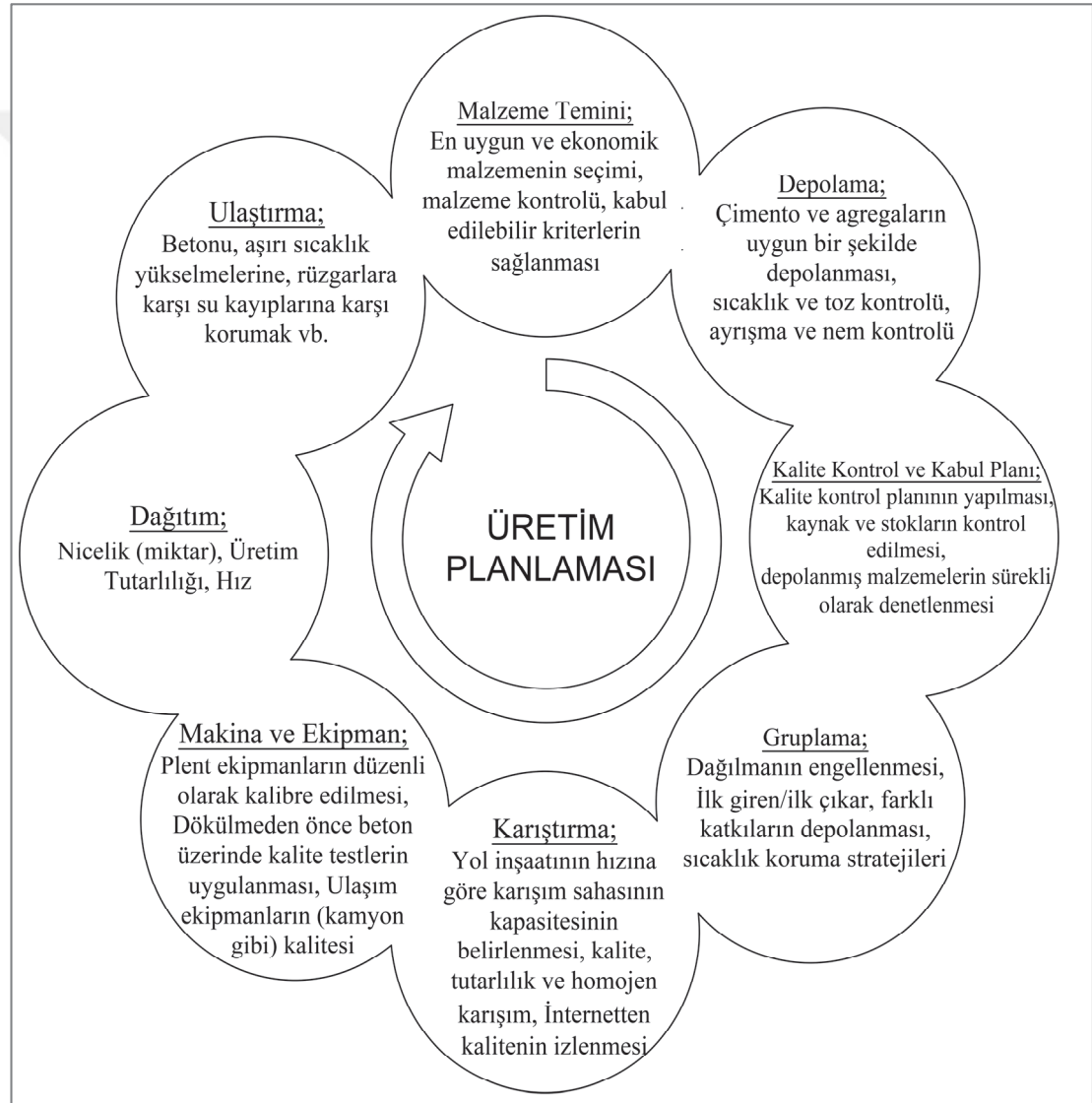
SSB üretimi, malzeme seçimi ve depolanması, kaynakların doğrulanması, malzemelerin karıştırılması, harmanlanması ve denetlenmesi, üretim planlaması, taşınması ve kalite kontrol gibi süreçleri kapsar. Karışım, merkezi harmanlama plantleri (ikiz shaft mikseri veya pan-mikser), kuru harmanlama plantleri, devamlı dönen mikserler (harç mikseri ve yatay shaft mikseri) ve tambur tipi mikserlerden üretilebilir. Üretimin sürdürülebilir bir şekilde sağlanabilmesi için bir planlamaya ve kalite eylem planına ihtiyaç vardır. Örnek bir kalite kontrol eylem planı Tablo 1.7’de ve üretim planlaması Şekil 1.15’te verilmektedir. SSB yollar için, literatürde üretim süreçlerinde homojenliği (üniformaluluk) test eden bir prosedür bulunmamaktadır. Ancak SSB teknolojisi kullanılarak inşa edilen dolu savak ve set tahkimat işlerinde homojenlik testlerinin yapılmasının zorunlu olduğu belirtilmiştir (PCA, 2000). Tavsiye edilen bu homojenlik testleri Tablo 1.8’de verilmektedir.

Tablo 1.7. Kalite kontrol eylem planı örneği (Harrington ve diğ., 2010)

MALZEME	ÖZELLİK	STANDART	SIKLIK
Su	Kalite	ASTM C 1602	İmalattan önce veya istenildiğinde
		CSA A23.1	
Çimento	Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	ASTM C 150 veya dengi	Üreticinin onayı ile veya ön yeterlilik
		ASTM C 1595	
		ASTM C1157	
		CSA A3000	

Tablo 1.7. (Devam) Kalite kontrol eylem planı örneği (Harrington ve diğ., 2010)

MALZEME	ÖZELLİK	STANDART	SIKLIK
Puzzolan	Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	ASTM C618 veya dengi	Üreticinin onayı ile veya ön yeterlilik
		CSA A3000	
Katkılar	Kimyasal içerikler	ASTM C494	Üreticinin onayı
		ASTM C260	
		CSA A23.1	
Agregalar	Kalite	ASTM C33	Proje başlangıcında haftalık veya aylık
		ASTM A23.1	



Şekil 1.15. SSB üretimi için tasarlanmış bir planlama (Harrington ve diğ., 2010)

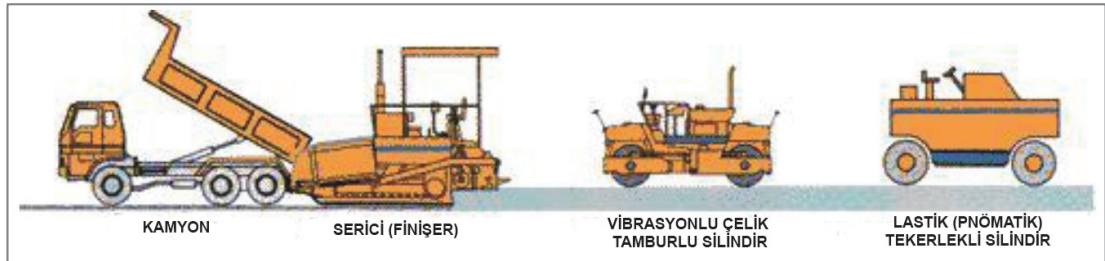
Tablo 1.8. SSB için önerilen homojenlik testleri (PCA, 2000)

Test	Max. Fark* (%)	Standart
Karışımındaki toplam su içeriği (ağırlıkça)	15	ASTM D 2216
Karışımındaki iri agrega (No.4 elek üstü) içeriği	15	ASTM C 94
Hava boşluğu içermeyen harcın birim hacim ağırlığı	2	ASTM C 94
Karışımın hava içeriği	100	ASTM C 231
Taze beton birim hacim ağırlığı	2	ASTM C 1170
7 günlük basınç dayanımı	25	ASTM C 39
Vebe süresi	15	ASTM C 1170

\*Max. Fark (%) = 100 x (max. değer - min. değer) / (3 testin ortalaması)

## 1.6. Serme

SSB, genellikle bir asfalt serici ile serilir, bazen de serici boyunca hareket eden nispeten büyük miktardaki malzemeyi yerleştirebilmesi için modifiye edilmiş başka sericiler kullanılır. Tipik bir SSB yol inşaatında kullanılan iş makineleri Şekil 1.16'da verilmiştir.



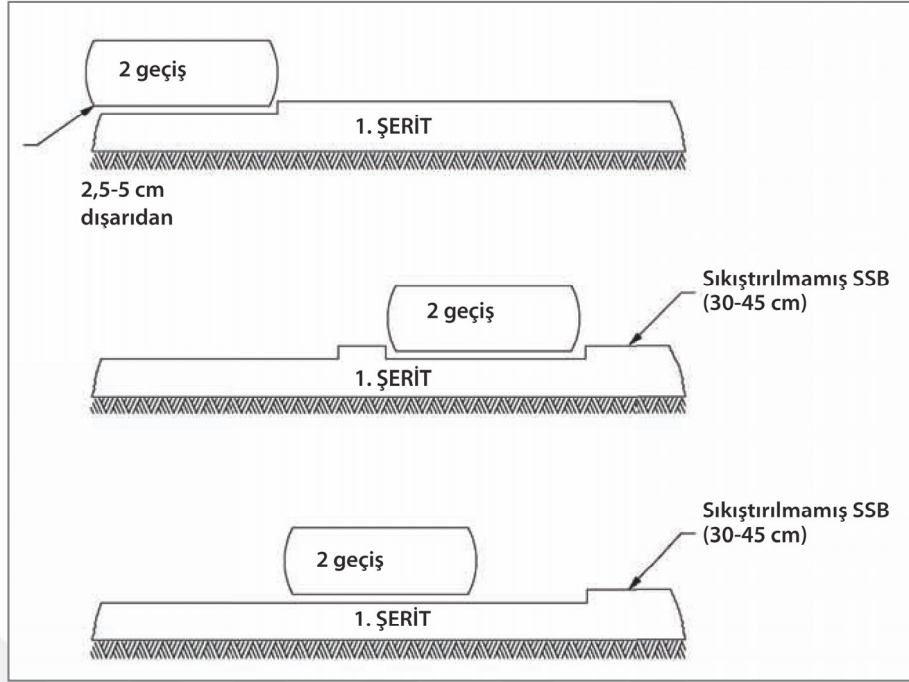
Şekil 1.16. Serme ve sıkıştırma işlerinde kullanılan iş makineleri

Büyük hacimli kaplama imalatlarında serici üzerindeki besleme haznesi, beton döküm mastarı arasındaki bölümler ve mastar önündeki helezonların döşeme hattı genişliği boyunca düzgün bir serim yapabilmesi için büyütülmesi gibi birtakım değişiklikler yapılmaktadır. Serici sayesinde kompaksiyon başlamadan önce döşeme genişliği boyunca ıslak yoğunluğun en az % 80'i mertebesinde sıkışma sağlanmış olur. Ondülasyon riskini azaltmak amacıyla, mikserlerin üretim kapasitesinin en az 1,5 katı kadar serme kapasitesine sahip sericiler kullanılmalıdır. Yerleştirme boyunca segregasyonu önlemek amacıyla serici haznesi asla tamamen boşaltılmamalı, hazne tarafı asla yükseltilmemeli ve malzeme helezonların üzerini tamamen kaplayacak

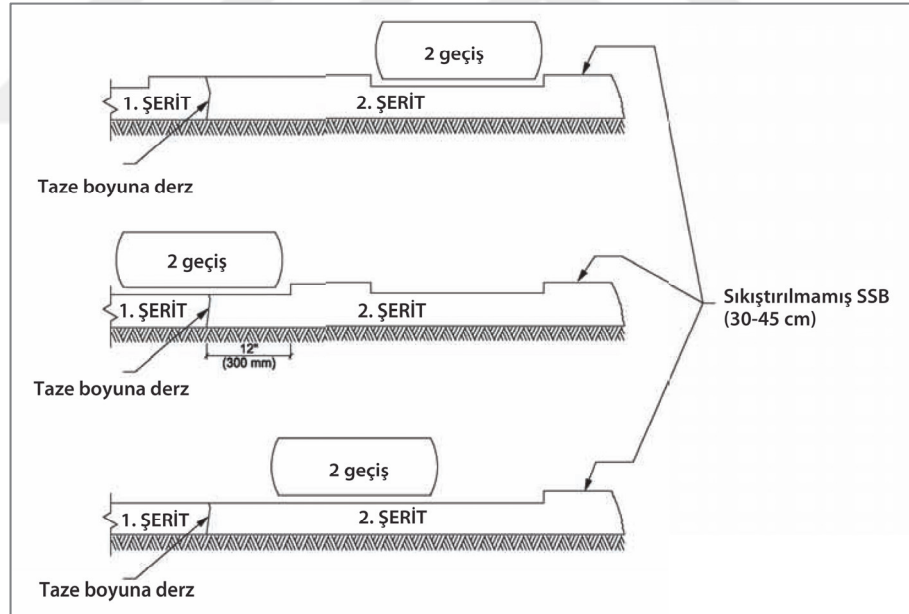
şekilde serim yapılmalıdır. Yerleştirme işlemi sırasında yüzey düzgünlüğü ve tabakanın gerekli kalınlığı mutlaka sağlanmalıdır. Kaplama kalınlığı otomatik olarak ayarlanabilen gergi sistemleri ve multi-plex seviye kontrol cihazlarıyla serim esnasında sürekli kontrol edilmelidir. Geleneksel asfalt sericiler ile tek seferde sıkışmış halde en fazla 15 cm kalınlığındaki kaplamaların serilmesi tavsiye edilmektedir (Harrington ve diğ., 2010). Yüksek yoğunluklu asfalt serme makinaları, 25 cm kalınlığına kadar olan kaplamalar için başarıyla kullanılabilir (Harrington ve diğ., 2010). Eğer birden fazla tabaka teşkil edilecekse, iki tabaka arasında yeterli bir bağ dayanımının gelişebilmesi için, ilk tabaka ile takip eden tabaka arasında 1 saatten fazla zaman geçmemesi gerekmektedir. Daha yüksek bağ dayanımlarının gerekli olduğu durumlarda ise iki tabaka arasında yüksek çökme değerlerine haiz harç veya sulu çimento harcı kullanılabilir. Serim işlemi ile serilen hattın sıkıştırılması arasındaki zaman farkı kaplamada yeterli yoğunluğun ve pürüzsüzlüğün elde edilmesi bakımından önemlidir. Çok tabakalı kaplamalarda, kaplama yüzeyinin yanı sıra her bir tabakanın kenarı, bir sonraki tabakayla kaplanıncaya ya da kür işlemi tamamlanıncaya kadar nemli tutulmalıdır.

### **1.7. Sıkıştırma**

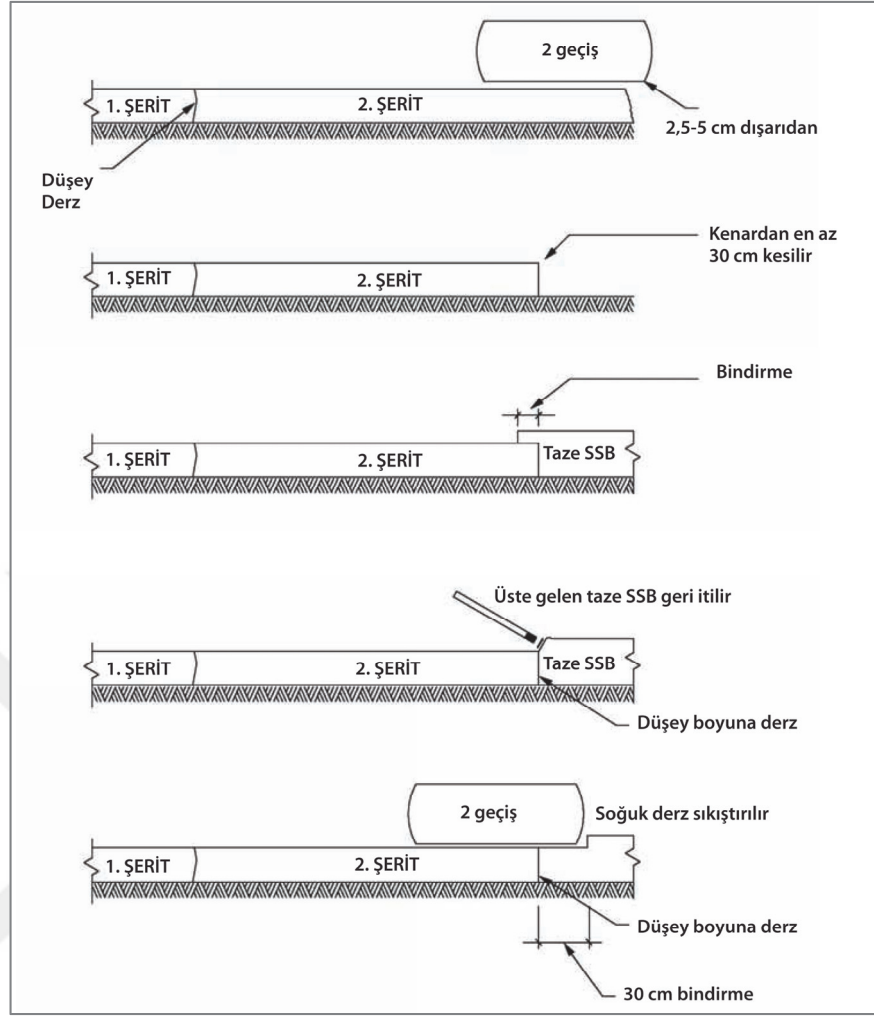
Sıkıştırmada çalışma ağırlığı en az 11 ton, statik çizgisel yükü 30 kg/cm'den büyük, iki frekanslı vibrasyon sistemli düz çelik bandajlı silindirler ve/veya lastik başına düşen yükü, en az 3,5 ton olan lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılır. Kullanılan malzeme ve çevresel faktörlere bağlı olarak serilen tabaka kalınlığına uygun olan sıkıştırma tekniği ve uygun pas sayısı, imalat başlangıcında bir deneme kesimi yapılarak belirlenmelidir. Sıkıştırma yol eksenine paralel olarak yapılır ve düşük kotlu kenardan başlayarak eksene doğru kayan bir şablonu takip eder. Yatay kurplarda kurbun içinden başlanır ve kurbun dışına doğru devam edilir. Her geçişte bir önceki geçişte sıkıştırılan kısma silindir tambur genişliğinin %10'u kadar bindirme yapılır. Şekil 1.17-19'de örnek sıkıştırma şablonları verilmiştir.



Şekil 1.17. 1. şeridi sıkıştırmak için sıkıştırma şablonu (Harrington ve diğ., 2010)

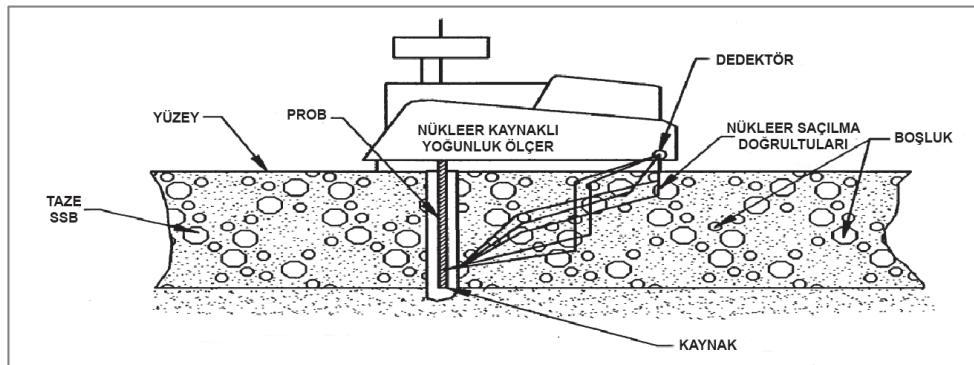


Şekil 1.18. 2. şeridi sıkıştırmak için sıkıştırma şablonu (Harrington ve diğ., 2010)



Şekil 1.19. Son bitirme için sıkıştırma şablonu (Harrington ve diğ., 2010)

Kompaksiyon işlemlerinin akabinde kaplamada yeterli yoğunluğun sağlanıp sağlanmadığının kontrolü amacıyla nükleer yoğunluklu test cihazları kullanılmaktadır (Şekil 1.20). Laboratuvarda elde edilen yoğunluğun %98 düzeyi ve yukarısı için rölatif sıkışma seviyesinin yeterli olduğu kabul edilmektedir (Harrington ve diğ., 2010).



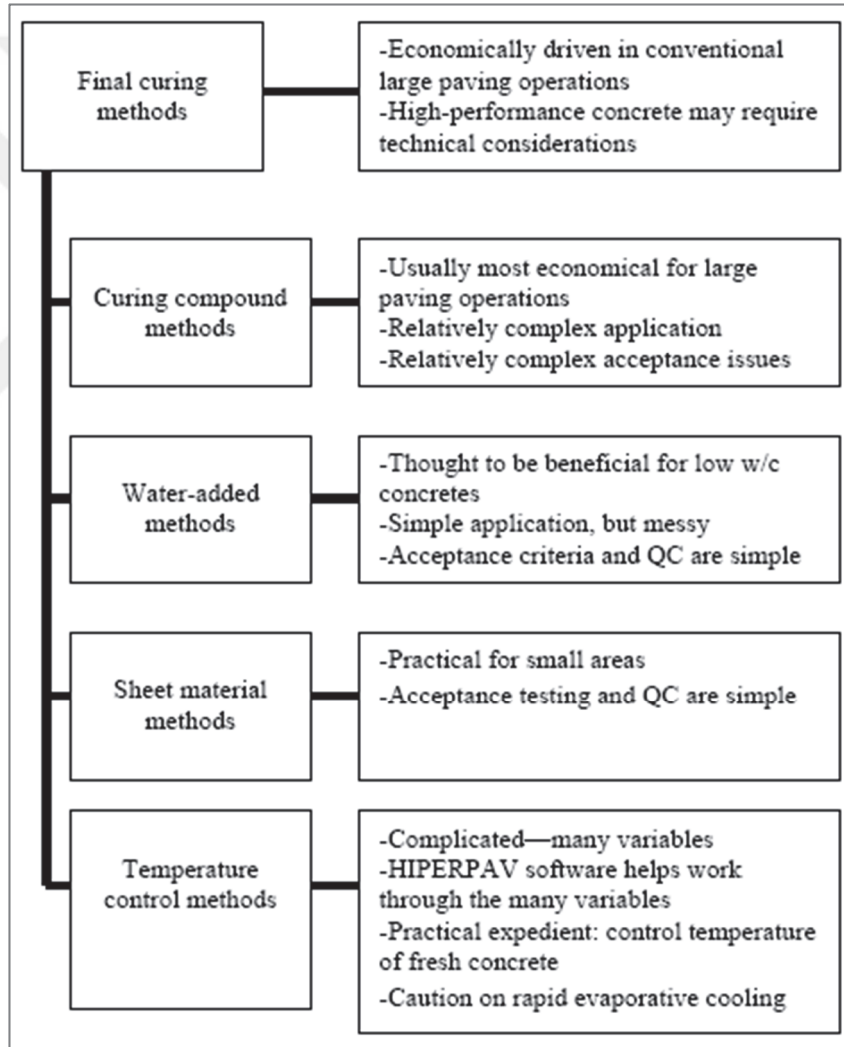
Şekil 1.20. Nükleer kaynaklı yoğunlukölçer cihazı (ACI, 2011)



## 1.8. Derz Kesimi ve Kür

SSB'nin rötreye karşı duyarlılığı geleneksel betonlara göre daha az olduğundan genellikle daha uzun mesafelerde derz kesimi tavsiye edilmektedir. Bakım ve kür uygulamaları ise geleneksel beton yollarda uygulanan süreçlerle benzerdir (PCA, 2004).

Kürleme yöntemleri, kimyasal püskürtme, su ile kürleme ve su tutucu yöntemler olmak üzere üç tipte sınıflandırılabilir. Poole (2005)'e göre tavsiye edilen kürleme yöntemleri Şekil 1.21'de gösterilmektedir.



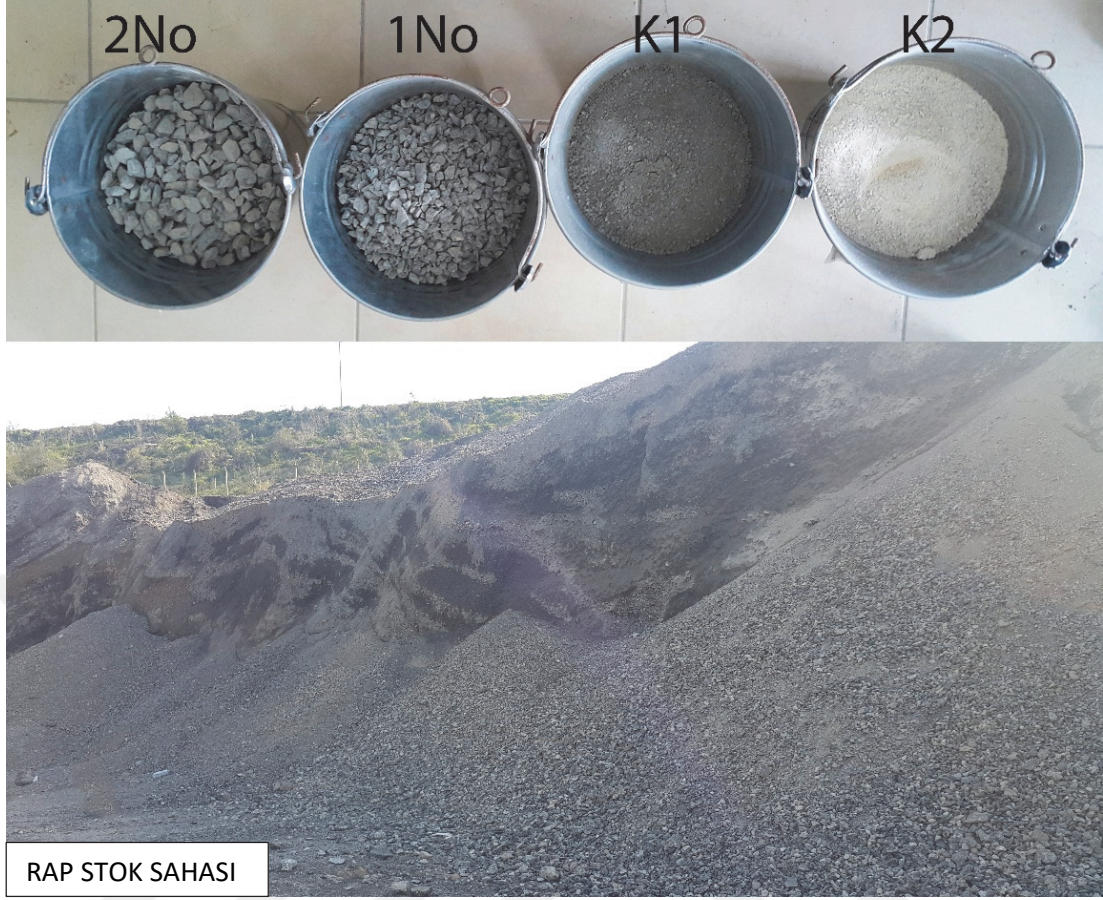
Şekil 1.21. Beton yollar için önerilen kür yöntemleri (Poole, 2005)

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde Kocaeli ili sınırları içerisinde ilk defa uygulaması yapılacak olan SSB test yolu için Laboratuvar ortamında bir karışım tasarımı yapılması hedeflenmiştir. Elde edilen karışım tasarımına göre, SSB test yolu yapılması ve tahribatlı yöntemlerle yol gövdesinden numuneler alınarak test sonuçlarının laboratuvarda üretilenler ile kıyaslanması amaçlanmıştır.

### 2.1. Malzeme

Çalışma kapsamında birinci aşamada, agrega, RAP ve çimento temini konusunda bir dizi araştırma yapılmıştır. Kocaeli bölgesinde birçok geleneksel beton yol projesinde kullanılan Gölcük-Halıdere mevki Aselmaslar taş ocağı (2No, 1No, K1) ile Bilecik-Osmaneli mevki Demirtaş taş ocağı (K2) agregalarının kolay ve hızlı bir şekilde temin edilebilmeleri nedeniyle SSB karışımında da kullanımının uygun olabileceğine karar verilmiştir. RAP malzemesi Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (KBB) Solaklar Asfalt Şantiyesi stok sahasından 19–4,75 mm elekler arasından elenerek temin edilmiştir (Şekil 2.1). Agregalara ve RAP malzemeye ait özgül ağırlık ve su emme deneyleri EN 1097-6'ya uygun yapılarak Tablo 2.1'de, iri agregaya ait fiziksel özellikler Tablo 2.2'de, tane boyut dağılımları da AASHTO T27'e uygun tespit edilerek Tablo 2.3'de verilmiştir. Bağlayıcı olarak Nuh Çimento'dan temin edilen EN 197-1'e uygun CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler üretici tarafından sağlanmış olup Tablo 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.1. Karışım tasarımında kullanılan agrega grupları ve RAP stok sahası

Tablo 2.1. Agrega ve RAP'e ait fiziksel özellikler

Kodu	Tipi	Boyutu (mm)	Temin Edildiği Yer	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Su emme (%)	Gevşek Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
2No	Kırmataş	9,5-25	Aselmaslar Taş Ocağı	2,72	0,8	1421
1No	Kırmataş	4,75-19	Aselmaslar Taş Ocağı	2,70	0,8	1445
K1	Kırmakum	0-4,75	Aselmaslar Taş Ocağı	2,63	1,1	1614
K2	Kırmakum	0-4,75	Demirtaş Taş Ocağı	2,65	1,2	1689
RAP	Geri Dönüşüm	4,75-19	KBB Solaklar Asfalt Şantiyesi	2,53	0,5	1323

Tablo 2.2. İri agregaya ait diğer fiziksel özellikler

DENEY	SONUÇ	STANDART
Cilalanma Değeri (%)	58,6	EN 1097-8
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO <sub>4</sub> ile kayıp) (%)	1,0	EN 1367-2
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	10,0	EN 1097-2
Yassılık İndeksi, (%)	8,0	BS 812-105
Metilen Mavisini Deneyi (%)	1,0	EN 933-9

Tablo 2.3. Agregaya ve RAP'e ait yüzde geçen değerleri

Elek Açıklığı (mm)	2No	1No	K1	K2	RAP
25	1in.	100,0	100,0	100,0	100,0
19	3/4in.	87,4	100,0	100,0	100,0
12,5	1/2in.	20,4	91,9	100,0	100,0
9,5	3/8in.	8,2	68,3	100,0	100,0
4,75	No. 4	1,4	0,9	99,7	99,5
1,18	No. 16	0,0	0,0	54,0	49,8
0,15	No. 100	0,0	0,0	22,0	16,3
0,075	No. 200	0,0	0,0	18,0	12,7

Tablo 2.4. Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve mekanik özellikler	
İçerik (%)			
SiO <sub>2</sub>	20,5	Spesifik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	3,14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,65	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4015
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	Le Chatelier Genleşme (mm)	1
CaO	62,7	Priz başlangıcı (dk)	158
Free CaO	1,71	Priz sonu (dk)	222
MgO	1,65	90 µ geçen (%)	0,3
SO <sub>3</sub>	2,94	45 µ geçen (%)	14,5
Na <sub>2</sub> O	0,18	2 günlük dayanım (MPa)	27,8
K <sub>2</sub> O	0,41	7 günlük dayanım (MPa)	49,2
Cl-	0,01	28 günlük dayanım (MPa)	57,6
Çözünmeyen Kalıntı	0,5		
Kızdırma Kaybı	3,36		

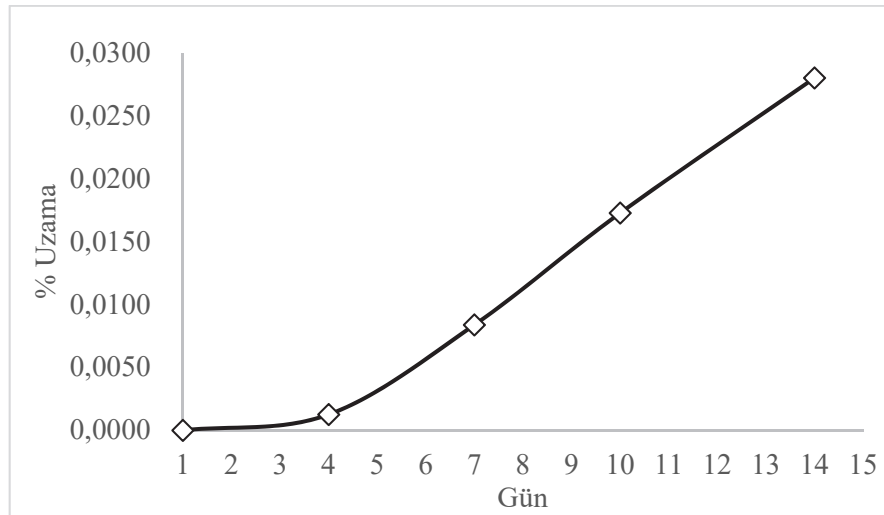
Saha betonlarında agrega ile çimento hamuru arasında, nemin de ortamda bulunması sonucunda oluşması muhtemel Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) tespitinin mutlaka yapılması gerekmektedir (Harrington ve diğ., 2010). Bu bağlamda, ASTM C1260'a uygun, 25 x 25 x 285 mm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanarak, hızlandırılmış ASR testleri yapılmıştır. İki adet prizmatik numune için 293 g çimento, 138 g su, 660 g

kırma kum (%50 K1 ve %50 K2) kullanılmıştır. Agrega karışımı için deneye alınacak her elek üstü malzeme miktarı ilgili standarda uygun olarak Tablo 2.5’te verilmiştir.

Tablo 2.5. Her elek üstü malzeme miktarı

Geçen Elek	Kalan Elek	Malzeme (g)
No.4	No.8	66
No.8	No.16	165
No.16	No.30	165
No.30	No.50	165
No.50	No.100	99
Toplam		660

Numunelerin şartlandırılma süreçlerinde NaOH çözeltisi kullanılmıştır (1350 g su + 60 g NaOH). Prizmatik çubuklar, 13 lt kapasitesindeki polipropilen bir kap içerisindeki NaOH çözeltisine batırılmıştır. 80 °C’de su banyosu içerisinde daldırılan kap içerisindeki numunelerin 4, 7, 10 ve 14. günlerdeki boy okumaları ASTM C490’a uygun olarak yapılmıştır. Boy ölçümleri için 0,002 mm hassasiyetinde ve adım aralığı 0,001 mm olan dijital boy ölçer kullanılmıştır. Prizmatik numuneler üzerindeki boy uzama miktarı 14. gün sonunda ortalama %0,028 olarak tespit edilmiştir (Şekil 2.2). ASTM C1260’ta 14. gün sonunda boy uzama miktarının %0,1’den daha az olması durumunda, agreganın ASR açısından “zararsız” olduğu bildirilmiştir.



Şekil 2.2. Harç çubuğunda günlere göre boy değişimi

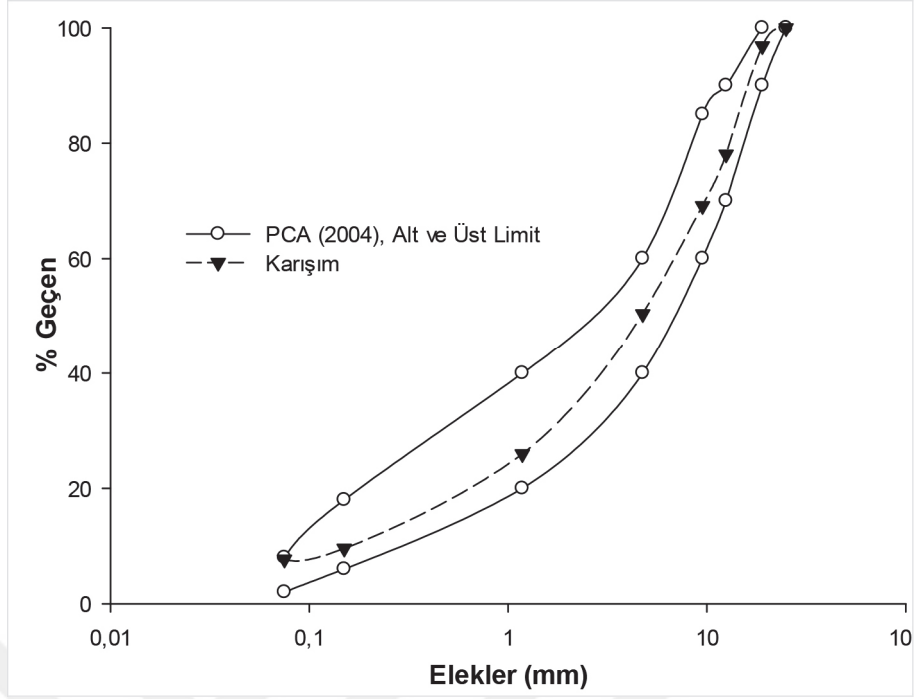
## 2.2. Karışım Tasarımı

Literatürde SSB karışım tasarımında standart bir test prosedürü bulunmadığından, optimizasyonda zemin kompaksiyon modelinin uygulanabileceği ve sıkıştırma enerjisinin hesaplanmasında da ASTM D1557'e uygun Proctor Enerjisi'nin kullanılabileceği belirtilmiştir (ACI, 2011; PCA, 2004; USACE, 2000; Harrington ve diğ., 2010).

Karışım tasarımı, sırasıyla aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır;

- Çimento düzeyi sabit ( $300 \text{ kg/m}^3$ ) alınarak, farklı S/Ç seviyelerinde karışımların hazırlanması,
- Karışımların titreşimli tokmak yardımıyla  $\text{Ø}150\text{mm}$ ,  $h=300\text{mm}$  boyutundaki kalıplara üç tabaka halinde 20 s süreyle sıkıştırılması,
- Numunelerin 24 saat sonra kalıplarından çıkartılarak 28 gün süreyle suda kür edilmesi,
- Kür periyodunun sonunda, ASTM C642'ye uygun olarak her S/Ç seviyesi için kuru birim ağırlık ve kütlece su içeriğinin belirlenmesi,
- Elde edilen kuru birim ağırlık ve kütlece su içeriği değerleri arasındaki ilişki denkleminin (Proctor eğrisi) kullanılması ile maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su içeriğinin belirlenmesi,
- Tespit edilen bu kuru birim ağırlık ve su içeriğinin hedeflenerek, deneme karışımlarının üretilmesi ve kür periyodunun sonunda gerekli eşleşmenin sağlanıp sağlanmadığının kontrolü.

KONTROL (K) karışımları hazırlamak amacıyla, PCA (2004) gradasyon limitlerine uygun olacak şekilde her bir agrega grubunun (2No, 1No, K1, K2) %25 oranında kullanılmasıyla, Şekil 2.3'deki gibi bir gradasyon eğrisi elde edilmiştir. Çimento içeriği sabit ( $300 \text{ kg/m}^3$ ) ve S/Ç oranı; 0,30, 0,35, 0,40, 0,45 düzeylerinde karışımların hazırlanması için her S/Ç oranında 3'er numune olacak şekilde toplamda 12 adet numune üretilmiştir. Numunelerin sıkıştırılmasında titreşimli tokmak metodu (ASTM C1435) referans alınarak, sıkıştırma işlemlerinde 11 kg ağırlık ve 900 W kapasiteye sahip, dakikada 2000 darbe vurma özelliği olan bir tokmak kullanılmıştır (Şekil 2.4a). Cihaz milinin uç kısmına takılıp çıkartılabilen, çapı  $140 \pm 3 \text{ mm}$  ve ağırlığı 3,2 kg olan dairesel bir sıkıştırma plakası monte edilmiştir.



Şekil 2.3. K karışımına ait tane boyut dağılımı



Şekil 2.4. Titreşimli tokmak (a), titreşimli plakalı zemin sıkıştırıcısı (b)

Malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılması için, efektif karıştırma kapasitesi 56 litre olan laboratuvar tipi bir pan-mikser kullanılmıştır. Karışım sırası agrega, çimento ve karma suyu düzeninde ve her bir karışım süresi de 75 s olacak şekilde belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlar Ø150mm, h=300mm boyutundaki kalıplara 3 tabaka şeklinde dökülmüş ve 20 s süreyle sıkıştırılmıştır. Her tabakada 15'er defa bir sonraki tabakaya geçecek şekilde şişleme yapılmıştır. Sıkıştırma plakası etrafında dairesel harç oluştuğu durumlarda sıkıştırma işlemine 20 s'den önce son verilmiştir. Eğilme dayanımında kullanılacak prizmatik numunelerin sıkıştırılmasında ise titreşimli plakalı zemin sıkıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 2.4b). 1 m<sup>3</sup> beton için karışıma girecek olan teorik ve gerçek malzeme miktarları Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. 1 m<sup>3</sup> karışım için teorik ve gerçek malzeme miktarları

	No	Çimento (kg)	2 No (kg)	1 No (kg)	K1 (kg)	K2 (kg)	Su (kg)	Boşluk (%)	Toplam (kg)	S/Ç
TEORİK	1	300	553,8	549,8	535,5	539,6	90,0	0	2569	<b>0,30</b>
	2	300	543,6	539,6	525,6	529,6	105,0	0	2544	<b>0,35</b>
	3	300	533,4	529,5	515,8	519,7	120,0	0	2518	<b>0,40</b>
	4	300	523,2	519,4	505,9	509,8	135,0	0	2493	<b>0,45</b>
GERÇEK	1	285,2	526,6	522,7	509,1	513,0	85,6	4,92	2442	<b>0,30</b>
	2	293,9	532,6	528,7	515,0	518,9	102,9	2,03	2492	<b>0,35</b>
	3	298,7	531,1	527,2	513,5	517,4	119,5	0,43	2507	<b>0,40</b>
	4	299,5	522,3	518,5	505,1	508,9	134,8	0,17	2489	<b>0,45</b>

Numunelerin 28 günlük kür sonucunda ASTM C642'ye uygun, kuru birim ağırlık ve kütlece su içeriği değerleri belirlenmiştir (Şekil 2.5), (Tablo 2.7). Her set için 3 adet numunenin ortalaması olarak verilen bu değerler yardımıyla Şekil 2.6'daki gibi bir ilişki (Proctor eğrisi) tespit edilmiş ve regresyon denklemi yardımıyla maksimum kuru birim ağırlık = 2402 kg/m<sup>3</sup> ve optimum su içeriği = % 4,06 olarak hesaplanmıştır.

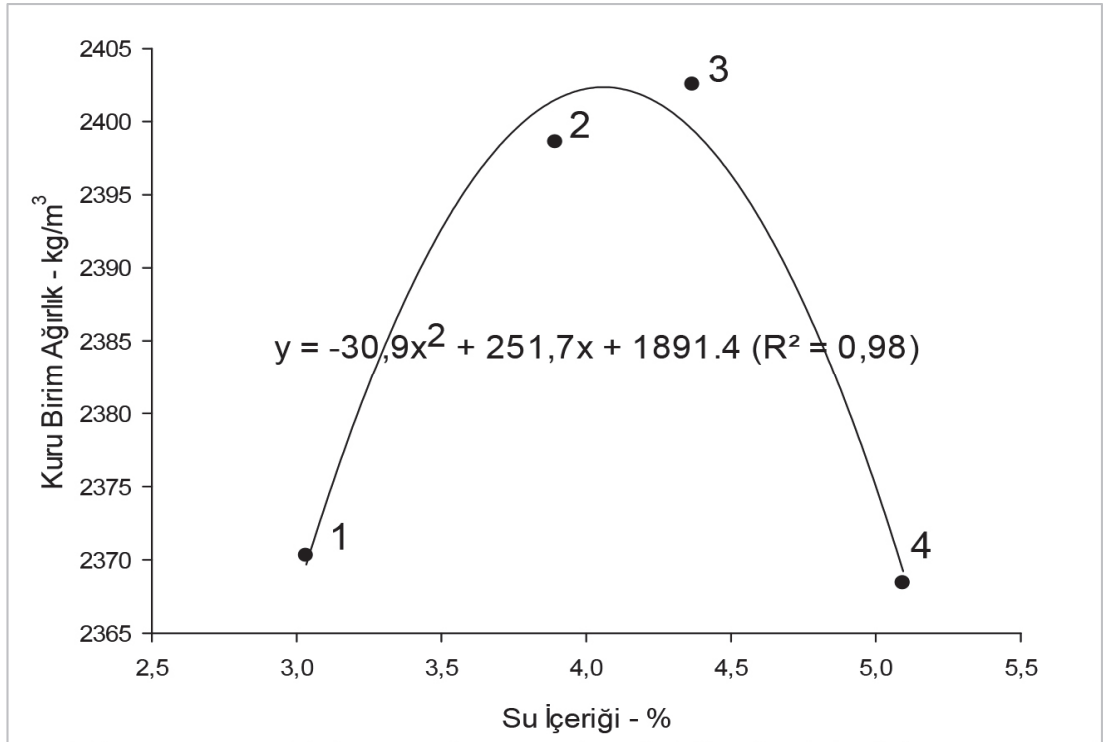




Şekil 2.5. Kuru birim ağırlık ve kütlece su içeriğinin belirlenmesi (ASTM C642)

Tablo 2.7. Kür periyodu sonunda belirlenen kuru birim ağırlık ve su içeriği değerleri

No	110 °C Fırın Kurusu Kütle (kg)	Doygun Kütle (kg)	Su İçerisindeki Kütle (kg)	Kütlece Su İçeriği (%)	Kuru Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
	A	B	C	$[(B-A)/A] \times 100$	$[A/(B-C)]$
1	12,941	13,333	7,873	3,03	2370
2	13,201	13,719	8,215	3,92	2398
3	13,287	13,867	8,335	4,37	2402
4	13,189	13,861	8,291	5,10	2368



Şekil 2.6. Kuru birim ağırlığın su içeriği ile değişimi (Proctor eğrisi)

Proctor eğrisi yoluyla belirlenen bu maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri hedeflenerek, Tablo 2.8’de verilen malzeme miktarları ile bir “deneme karışımı” hazırlanmıştır. Bu deneme karışımında 28 günlük kür periyodunun sonunda (ASTM C642 prosedürüne göre) kuru birim ağırlık = 2410 kg/m<sup>3</sup> ve su içeriği = % 4,01 değerleri ile Proctor eğrisi yoluyla elde edilen değerlere yakın seviyeler elde edildiğinden, K karışımlarında 1 m<sup>3</sup> beton için bu oranların kullanılabilirliğinin mümkün olabileceği saptanmıştır.

Tablo 2.8. 1 m<sup>3</sup> K karışımı için malzeme miktarları

Karışım Tipi	Çimento (kg)	2 No (kg)	1 No (kg)	K1 (kg)	K2 (kg)	Su (kg)	Toplam (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç
<b>K</b>	300	540,0	536,0	522,1	526,1	110,4	2535	<b>0,368</b>

K karışımları için belirlenen S/Ç oranının kullanılmasıyla, toplam agregadan %15 ve %20 oranında eksiltme yapılarak RAP ilave edilmiş, sırasıyla RAP15 ve RAP20 karışımları hazırlanmıştır. RAP içerikli karışımlarda 1 m<sup>3</sup> beton için karışıma girecek olan malzeme miktarı ve yüzde oranları Tablo 2.9’da verilmiştir.

Tablo 2.9. 1 m<sup>3</sup> RAP katkılı karışım için malzeme miktarı ve yüzde oranları

Karışım	Çimento (kg)	2 No (kg)	1 No (kg)	K1 (kg)	K2 (kg)	RAP (kg)	Su (kg)	Toplam (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç
<b>RAP15</b>	300	540,0	214,4	522,1	526,1	301,3	110,4	2514	<b>0,368</b>
<b>RAP20</b>	300	540,0	107,2	522,1	526,1	401,8	110,4	2508	<b>0,368</b>
<b>RAP15</b>	(%)	25	10	25	25	15			
<b>RAP20</b>	(%)	25	5	25	25	20			

### 2.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Tablo 2.8 ve Tablo 2.9’da verilen oranlara göre K, RAP15 ve RAP20 karışımları hazırlanarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Her setten 6’şar adet EN 12390-3’e uygun basınç dayanımı, 3’er adet de EN 12390-6-Part 3’e uygun yarmada çekme dayanımı tespiti için toplamda 27 adet Ø150mm, h=300mm silindirik numune hazırlanmış ve 7 ile 28 günlük kür sonucunda test edilmiştir.

Elastisite Modülü ve Poisson oranı tayini için ASTM C469'a uygun olacak şekilde her setten 3, toplamda 9 adet Ø150mm, h=300mm silindirik numune hazırlanmıştır. Şekil değiştirme miktarının tespitinde, silindirik olarak hazırlanan numunelere monte edilen dairesel çerçeveler ve 2 adet (yatay ve düşey) analog komparatör saatinden faydalanılmıştır. Yükleme 2000 kN'luk test presinde, hızı ASTM C469'da belirtildiği gibi yaklaşık olarak 241 kPa/s'ye yakın olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Elastisite Modülü test düzeneği

Eğilme dayanımı kontrolü için EN 12390-6-Part 4'e uygun olacak şekilde 9 adet 150 x 150 x 600 mm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanmış ve eğilme dayanımının tespitinde dört nokta eğilme prosedürü uygulanmıştır. Numunelere ait mekanik test sonuçları Tablo 2.10'da toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 2.10. Mekanik deneylerde test sonuçları

Karışım Tipi	Numune No	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	28 Günlük 4 Nokta Eğilme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
K	1	32,4	40,9	6,01	6,20	43,3	0,204
	2	31,7	39,3	5,98	5,91	41,9	0,201
	3	33,6	35,9	6,16	6,78	41,1	0,201
<b>Ortalama (MPa)</b>		<b>32,6</b>	<b>38,7</b>	<b>6,05</b>	<b>6,30</b>	<b>42,1</b>	<b>0,202</b>
COV (%)		3,0	6,6	1,6	7,0	2,6	0,0
RAP15	1	28,4	33,8	5,67	5,64	30,3	0,240
	2	30,2	35,1	5,23	5,12	31,1	0,239
	3	29,2	34,9	5,20	5,96	33,1	0,241
<b>Ortalama (MPa)</b>		<b>29,3</b>	<b>34,6</b>	<b>5,37</b>	<b>5,57</b>	<b>31,5</b>	<b>0,240</b>
COV (%)		3,1	2,0	4,9	7,6	4,6	0,0
RAP20	1	24,5	29,5	4,87	4,97	29,1	0,241
	2	28,1	30,1	5,12	5,55	27,1	0,243
	3	25,5	28,6	5,03	5,72	31,3	0,240
<b>Ortalama (MPa)</b>		<b>26,0</b>	<b>29,4</b>	<b>5,01</b>	<b>5,41</b>	<b>29,2</b>	<b>0,241</b>
COV (%)		7,1	2,6	2,5	7,3	7,2	0,0

Tablo 2.10'a göre, Sachet ve diğ. (2013)'de bildirildiği gibi RAP yüzeyindeki asfalt filmi nedeniyle mekanik özellikler üzerinde azaltıcı etkilerin geliştiği tespit edilmiştir. Bu etki Elastisite Modülü üzerinde en fazla, RAP15 ve RAP20 için sırasıyla %25 ve %31 düzeyindedir. 28 günlük basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarındaki azalma miktarları RAP15 için sırasıyla %11, %11, %12 ve RAP20 için sırasıyla %24, %17 ve %14 düzeyindedir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasındaki dayanım gelişmesi bütün karışımlarda %84 ve üzerindedir.

RAP malzemenin 4,75-19 mm eleklerden elenerek SSB içeriğinde kullanıldığı bir çalışmada, 267 kg/m<sup>3</sup> çimento düzeyi ve doğal agrega ile hazırlanan numunelerin 14 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımları sırasıyla 38,3 MPa ve 4,16 MPa olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %16 oranında RAP içeren karışımlarda ise 14. gün sonunda sırasıyla 28,1 MPa ve 3,50 MPa dayanım seviyeleri elde edilmiştir. Dolayısıyla, SSB karışımında ağırlıkça %16 oranında RAP kullanılması durumunda, basınç dayanımında %26,7, yarmada çekme dayanımında ise %15,9 düzeyinde bir azaltıcı etki saptanmıştır (Ferrebee ve diğ., 2014). Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ise, %15 oranında RAP kullanılması durumunda, Ferrebee ve diğ. (2014)'e kıyasla, basınç ve yarmada çekme dayanımındaki azaltıcı etkinin daha düşük olduğu görülmektedir.

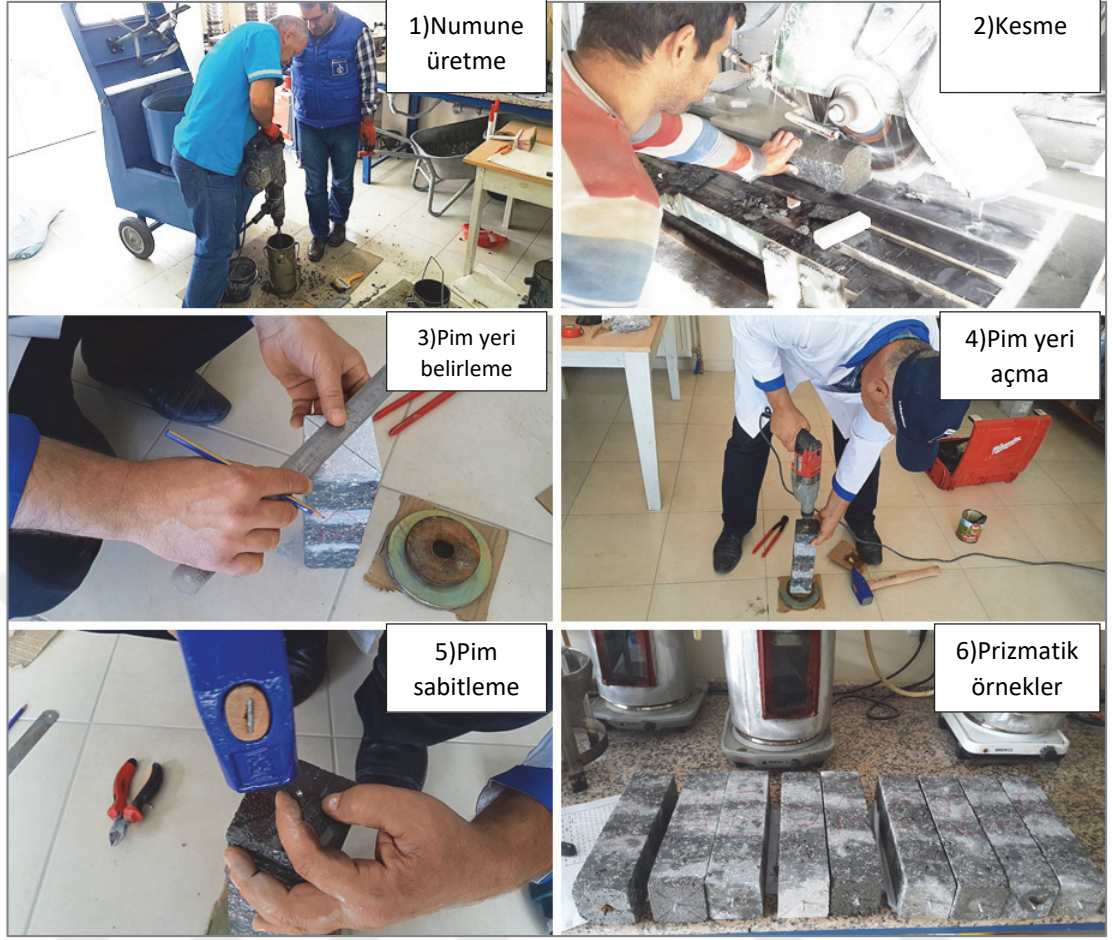
RAP içerikli SSB karışımları ile yapılan çalışmalarda, herhangi bir eleme prosesinden geçirilmeden elde edilen RAP malzemesinin, ağırlıkça %50 seviyelerine kadar karışım içeriğinde kullanılması durumunda, mekanik özelliklerde ciddi oranlarda azaltıcı etkiler tespit edilmiştir. Bu nedenle, RAP malzemesinin SSB içeriğinde sadece granüler temel veya alttemel düzeyinde kullanılabileceği bildirilmiştir (Courard ve diğ., 2010; Sachet ve diğ., 2011; Settari ve diğ., 2015). Bu çalışmada ise, ekonomik göstergelerin birbirine yakın olması istenen durumlarda, karışım içeriğinde %15 oranında RAP kullanılması halinde, mekanik özelliklerde bir azalma gerçekleşse bile, BYŞ (2016)'e göre 35 MPa düzeyinde bir beton için yeterli basınç ve çekme gerilmeleri ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasında yeterli dayanım gelişmesi elde edilmiştir. RAP20 karışımlarının ise basınç dayanımı istenilen düzeyde olmamasına karşın, uygun optimizasyonlarla ve benzer ekonomik şartlarda daha düşük hacimli yollarda kullanılması uygun olabilir.

RAP'in iyi derecelendirilmesi durumunda, uygun basınç ve çekme dayanımlarının sağlanabileceği ve SSB üstyapısında kaplama tabakalarında da ağırlıkça %20 düzeyine kadar kullanılabileceği tespit edilmiştir. RAP içerikli SSB yolun tekrarlı dingil yükleri altında yapısal ve ekonomik yönden analizi Kısım 2.5'te ele alınmıştır.

#### **2.4. Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi**

Çevresel etkiler altında sertleşmiş betonun durabilite özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla, sırasıyla aynı öreklere kuruma rötresi, ultrasonik ses dalgası hızı (UPV), donma/çözülme direnci ve dört nokta eğilme dayanımı testleri uygulanmıştır. Bu testlerin uygulanabilmesi için 75 x 75 x 285 mm boyutlarında numuneler üretilmesi gerekmektedir. Fakat SSB karışımı kuru olduğundan ve bu boyutlardaki bir kalıba bu malzemenin sıkıştırılması için standart bir prosedür bulunmadığından aşağıdaki gibi bir yol izlenmiştir;

Her karışımdan 3'er adet olmak koşuluyla toplamda 9 adet silindirik ( $\text{Ø}150\text{mm}$ ,  $h=300\text{mm}$ ) numune hazırlanmıştır. İlk etapta titreşimli tokmak kullanılarak numuneler üretilmiş, 24 saat sonra kalıplarından sökülmüş ve 28 gün boyunca standart koşullarda kür edilmiştir. Kür periyodunun sonunda, mermer tezgâhında 75x75x285 mm boyutlarında kesilerek prizmatik numuneler elde edilmiştir. Son aşamada ise, prizmatik örneklerin uç noktalarına matkap ve çekiç yardımıyla pimler (gage studs) yerleştirilerek deneyler için uygun geometrik koşullar sağlanmıştır (Şekil 2.8). Numuneler, Tablo 2.11'de gösterildiği sıra, belirtilen standartlara göre deneye tabi tutulmuş ve test sonuçları numune set ortalamaları olarak verilmiştir.



Şekil 2.8. Prizmatik numune üretilmesi süreci

Tablo 2.11. Prizmatik numuneler için deney planlaması

Set	Numune	Karışım Tipi	Kuruma Rötresi	UPV	Donma/Çözülme Direnci	Dört Nokta Eğilme Dayanımı
			ASTM C157	ASTM C597	ASTM C666	EN 12390-6
1	1	K	✓	✓	✓	✓
	2	K	✓	✓	-	✓
	3	K	✓	✓	-	-
2	4	RAP15	✓	✓	✓	✓
	5	RAP15	✓	✓	-	✓
	6	RAP15	✓	✓	-	-
3	7	RAP20	✓	✓	✓	✓
	8	RAP20	✓	✓	-	✓
	9	RAP20	✓	✓	-	-

### 2.4.1. Kuruma rötresi tayini

Kuruma rötresi tayini, 28 gün boyunca  $23\pm 2$  °C suda kürlenmiş numunelerin, kür periyodu bittikten sonra laboratuvar ortamında bekletilmesi ve açık havada belirli periyotlarda boy ölçümlerinin yapılmasını kapsamaktadır. Bu deneyin yürütülmesinde, 0,002 mm hassasiyetinde ve adım aralığı 0,001 mm olan dijital komparatör kullanılmıştır (Şekil 2.9). Numunelerin 1, 4, 7, 28, 56 ve 112. gün sonundaki boy okumaları ve ağırlık değişimleri tespit edilmiş (ASTM C157), Tablo 2.12, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de verilmiştir. Boy değişimini veren ifade için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$L_C = \frac{L_2 - L_1}{G} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada,

$L_C$  : Boy değişimi (%) (n. günde)

$L_1$  : Komparatör okuması (0. günde)

$L_2$  : Komparatör okuması (n. günde)

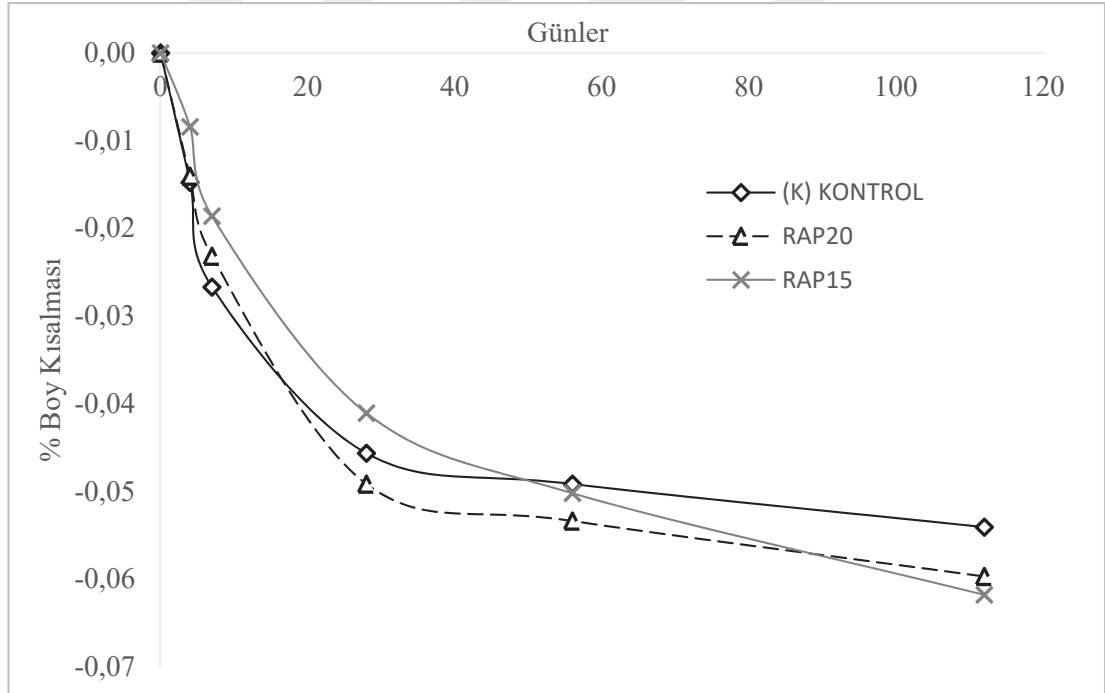
$G$  : Numune boyu [285 mm]



Şekil 2.9. Kuruma rötresi tayininde kullanılan numuneler ve test düzeneği

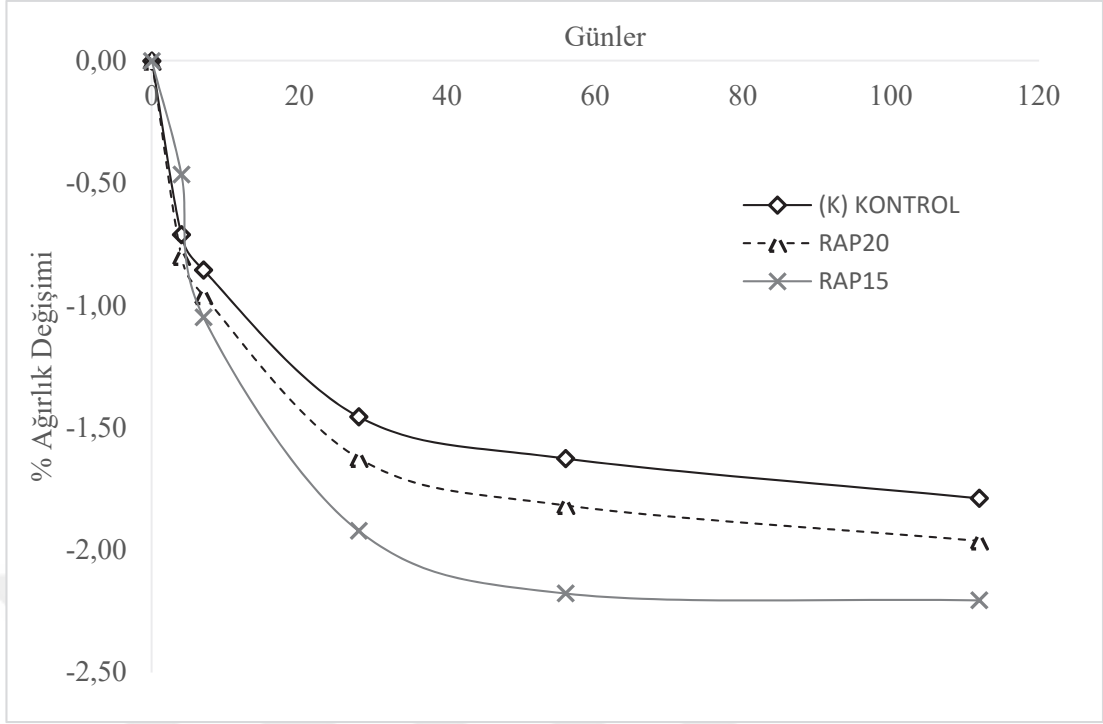
Tablo 2.12. Numunelerin belirli günlerde yapılan boy ve ağırlık ölçümleri

Günler (28+)	K		RAP15		RAP20	
	Ağırlık (g)	Komparatör Okuması	Ağırlık (g)	Komparatör Okuması	Ağırlık (g)	Komparatör Okuması
1.	3890,30	6,602	3826,50	5,454	3744,71	3,550
4.	3862,67	6,560	3808,74	5,430	3714,81	3,510
7.	3857,04	6,526	3786,40	5,401	3708,80	3,484
28.	3833,70	6,472	3752,98	5,337	3683,87	3,410
56.	3827,06	6,462	3743,19	5,311	3676,66	3,398
112.	3820,73	6,448	3742,12	5,278	3671,22	3,380
Boy ve Ağırlık Değişimi (%)						
1.	0	0	0	0	0	0
4.	-0,71	-0,015	-0,46	-0,008	-0,80	-0,014
7.	-0,85	-0,027	-1,05	-0,019	-0,96	-0,023
28.	-1,45	-0,046	-1,92	-0,041	-1,62	-0,049
56.	-1,63	-0,049	-2,18	-0,050	-1,82	-0,053
112.	-1,79	-0,054	-2,21	-0,062	-1,96	-0,060



Şekil 2.10. Numune boylarının günlere göre değişimi





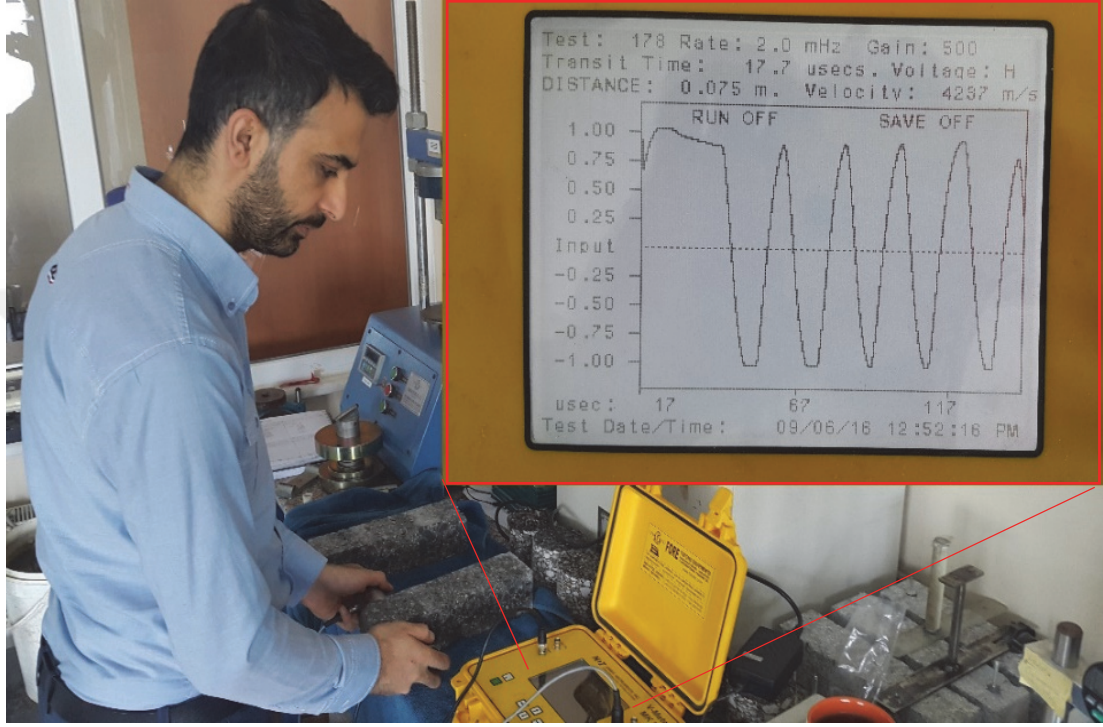
Şekil 2.11. Numune ağırlıklarının günlere göre değişimi

K karışımlarında 112. gün sonunda boy değişimi %0,050 (500 microstrain), RAP15 ve RAP20 karışımlarında ise %0,060 (600 microstrain) düzeyindedir. Ağırlık kayıpları ise her 3 numunede %2 seviyesindedir. Elde edilen rötre miktarının, Ghafoori ve Cai (1998), Pittman ve Ragan (1998), Jingfu ve diğ. (2009) ile kıyaslandığında fazla olduğu görülmektedir (28. gün sonunda 250-300 microstrain). Kaba agrega miktarı ve çimento düzeyinin sonuçlar üzerinde bu denli farklılıklar ortaya çıkarabileceği tahmin edilmektedir. Ancak Damrongwiriyanupap ve diğ. (2012)'e göre SSB test yolu gövdesinden alınan numunelerle benzer sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir (112. gün sonunda 500 – 700 microstrain).

RAP içerikli SSB karışımlarında kuruma rötresinin tayini ile elde edilen bulgular ise, bu karışımlar için hacim sabitliği özelliklerinin belirlenmesinde literatüre katkıda bulunacaktır. Zira literatürde RAP içerikli SSB karışımları kapsamında kuruma rötresi çalışmaları oldukça sınırlıdır. RAP karışımlarında kuruma rötresi miktarının bir miktar fazla çıkması ise, RAP içeriğinde bitümlle kaplı yüzeylerin bir rezervuar oluşturması, bu sayede de büzülme esnasında çimento hamurunun daha kolay deformasyon yapabileceği alanların oluşması ile açıklanabilir.

#### 2.4.2. Ultrasonik ses dalgası hızı tayini

UPV değerlerinin hesaplanmasında, numunelerin uzun kenar düzlemlerinde 3 farklı noktada okuma yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır (ASTM C597) (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Prizmatik numunede UPV ölçümü

Dinamik Elastisite Modülü'nün hesaplanmasında Denklem (2.2) kullanılmıştır (ASTM C597);

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (2.2)$$

Burada,

$E_d$  : Dinamik Elastisite Modülü (Pa)

$\mu$  : Poisson oranı

$\rho$  : Birim hacim ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ ) (ASTM C642)

$V$  : Ultrasonik ses dalgası hızı (m/s)

Tablo 2.13’de test sonuçları verilmiştir. UPV değeri betonun birçok karakteristik özelliğinden (yaş, su içeriği, boşluk yapısı, agrega tipi, agrega ile çimento arasındaki faz) etkilenmektedir. Deneysel çalışmalarda durabilite özellikleri bakımından UPV değerinin 4500 m/s yukarısı için çok iyi, 4500-3500 m/s arasında iyi, 3500-3000 m/s arasında orta, 3000 m/s altında ise zayıf beton olarak derecelendirilebileceği belirtilmiştir (IS 13311-1, 1992; Ryall, 2001). Karışımlarda UPV değerleri 4600-4900 m/s arasında değişmekte, RAP içeriğindeki bitümlü kaplı agrega yüzeyinin karışım içeriğinde boşlukları artırması nedeniyle UPV değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Tablo 2.13. UPV test sonuçları

Karışım Tipi	Birim Hacim Ağırlık (ASTM C642) (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı	Ultrasonik Ses Dalgası Hızı Ortalaması (m/s)	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)
K	2384	0,202	4923	51,9
RAP15	2333	0,240	4702	43,8
RAP20	2291	0,240	4660	42,2

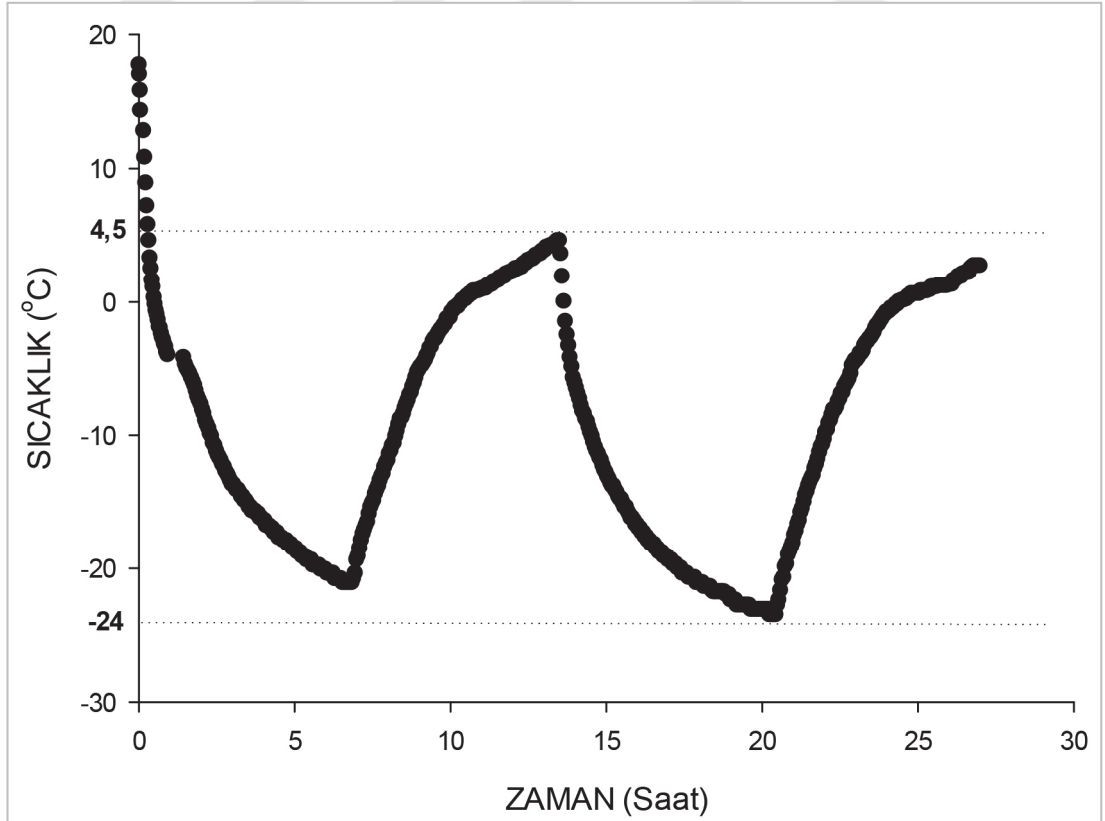
#### 2.4.3. Donma/çözülme direnci tayini

ASTM C666’ya uygun donma/çözülme testi için, 230 lt kapasiteli bir derin dondurucu kullanılmıştır. Derin dondurucuya 6 saat süreyle çalışıp kapanmasını sağlayan bir zaman saati (elektrik rölesi) monte edilmiştir. Numunelerin iç noktalarındaki sıcaklıkların ölçülmesi için numunelerle aynı boyut ve özelliklere haiz “dummy” numune içerisine bir termal sensör yerleştirilmiş ve sıcaklık değerleri bir yazılım sayesinde sürekli kayıt altına alınmıştır (Şekil 2.13). Dummy numune içerisindeki 1 günlük sıcaklık değerleri Şekil 2.14’te verilmiştir. Numunelere 300 döngü donma/çözülme tatbik edilmiş ve her 60 döngüde bir okuma yapılmıştır. Zaman saati sayesinde 6 saat donma ve 6 saat çözülme (On/Off) otomatik olarak uygulanarak, numunelerin iç noktalarındaki sıcaklıkları dummy numune sayesinde sürekli kayıt altına alınmıştır. Her 60 döngüde bir aşağıdaki ölçüm ve hesaplamalar yapılarak kaydedilmiştir;

- Ağırlık değişimi (%)
- Boy değişimi (%) (ASTM C157)
- UPV (m/s) (ASTM C597)
- Dinamik Elastisite Modülü ( $E_d$ ), (ASTM C597)
- Durabilite Faktörü ( $D_f$ )



Şekil 2.13. Donma/çözülme döngüsü için kurulan sistem



Şekil 2.14. Dummy numune içerisinde sıcaklığın zamana bağlı değişimi

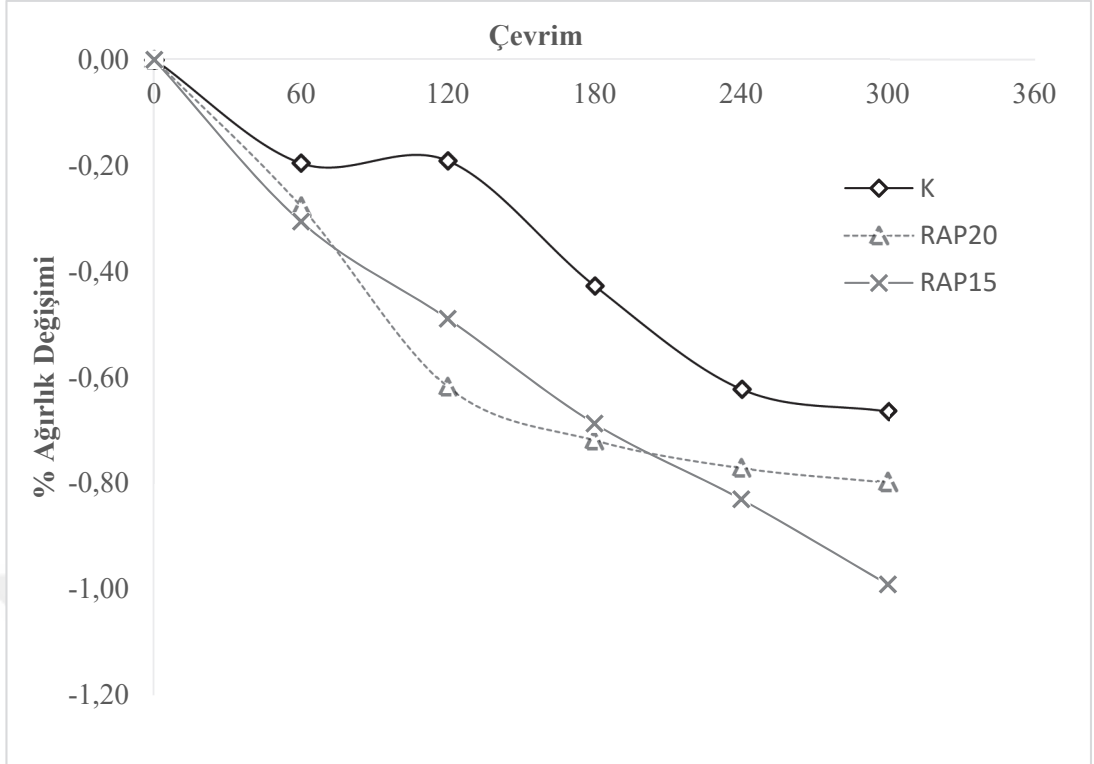
Donma/çözülme deneyi sonuçları Tablo 2.14, Tablo 2.15 ve Şekil 2.15-18'de verilmiştir.

Tablo 2.14. Donma/çözülme deneyi test okumaları

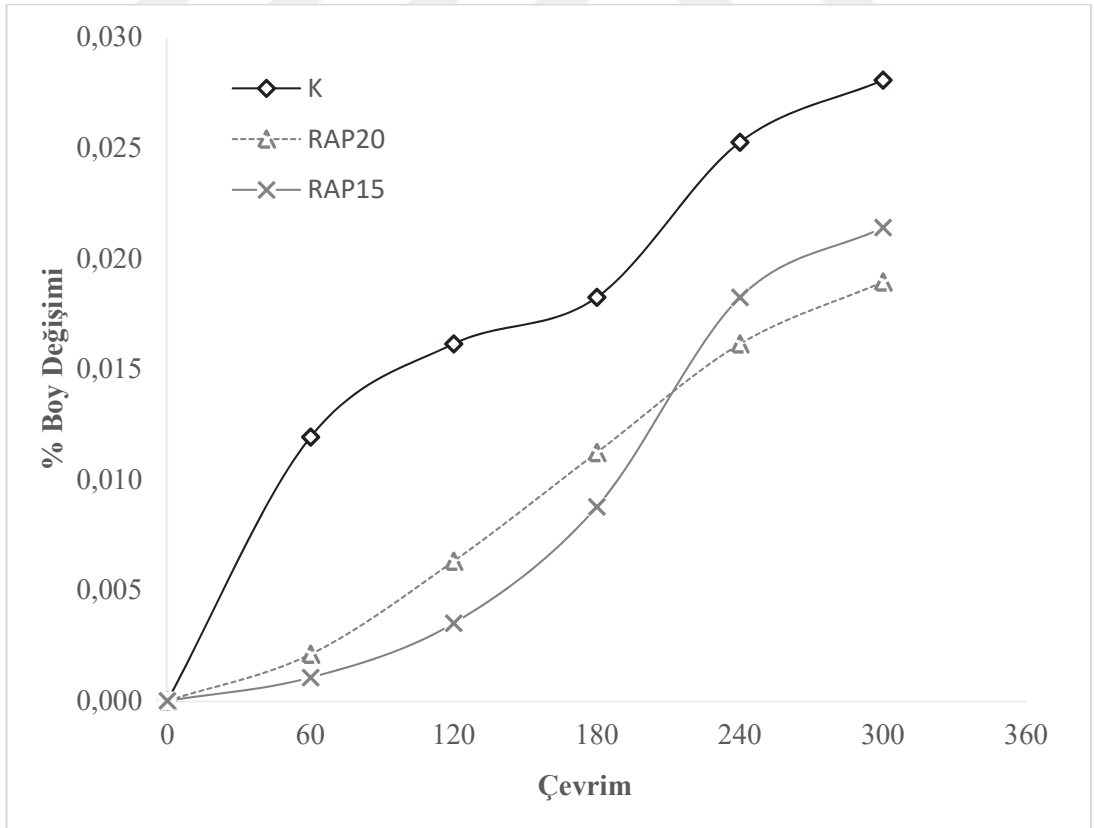
<b>K</b>						
Çevrim	Test Tarihi	Ağırlık (g)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı	Komparatör Okuması	UPV (m/s)
0	01.06.2016	3822,35	2384	0,202	0,888	4923
60	01.07.2016	3814,87	2380	0,202	0,922	4678
120	01.08.2016	3815,04	2380	0,202	0,934	4538
180	01.09.2016	3806,03	2374	0,202	0,940	4232
240	01.10.2016	3798,60	2369	0,202	0,960	4246
300	01.11.2016	3797,00	2368	0,202	0,968	4205
<b>RAP15</b>						
Çevrim	Test Tarihi	Ağırlık (g)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı	Komparatör Okuması	UPV (m/s)
0	01.06.2016	3741,42	2334	0,240	2,315	4702
60	01.07.2016	3729,98	2327	0,240	2,318	4686
120	01.08.2016	3723,12	2322	0,240	2,325	4532
180	01.09.2016	3715,71	2318	0,240	2,340	4331
240	01.10.2016	3710,36	2314	0,240	2,367	4109
300	01.11.2016	3704,34	2311	0,240	2,376	4012
<b>RAP20</b>						
Çevrim	Test Tarihi	Ağırlık (g)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı	Komparatör Okuması	UPV (m/s)
0	01.06.2016	3673,90	2292	0,240	3,402	4660
60	01.07.2016	3663,72	2285	0,240	3,408	4547
120	01.08.2016	3651,21	2278	0,240	3,420	4301
180	01.09.2016	3647,52	2275	0,240	3,434	4238
240	01.10.2016	3645,60	2274	0,240	3,448	4038
300	01.11.2016	3644,60	2273	0,240	3,456	3946

Tablo 2.15. Donma/çözülme deneyi test sonuçları

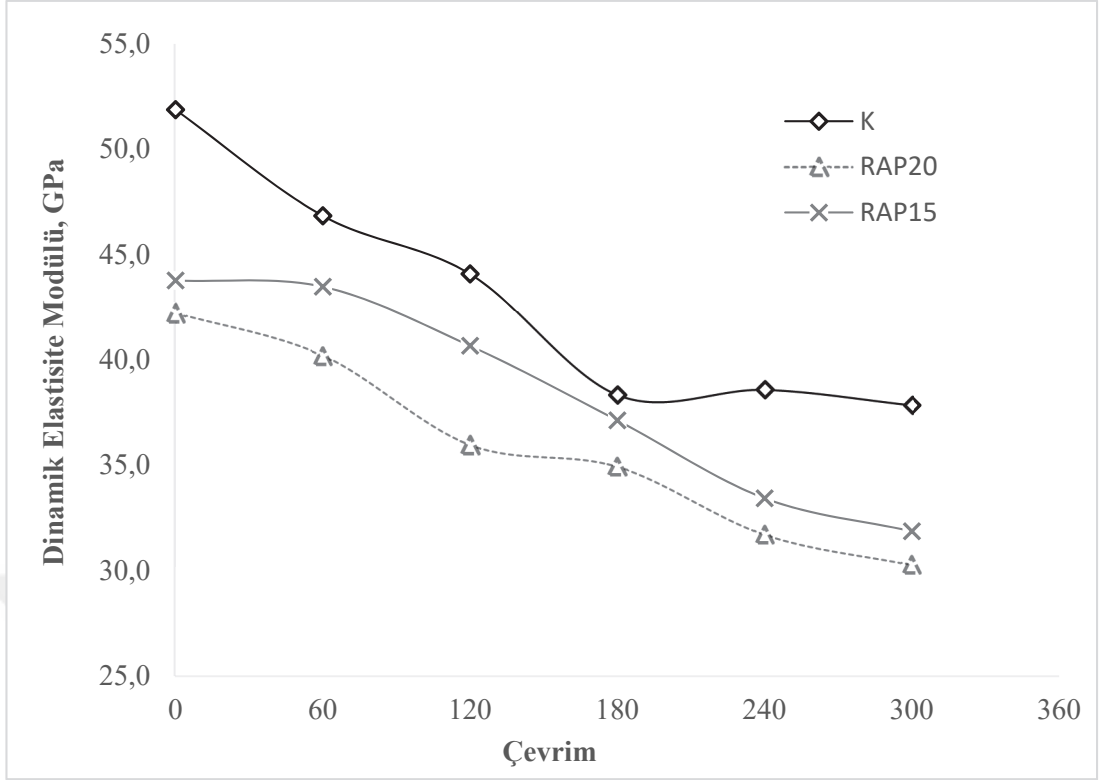
<b>K</b>					
Çevrim	Test Tarihi	% Ağırlık Değişimi	% Boy Değişimi	Dinamik Elastisite Modülü ( $E_d$ ) (GPa)	$E_d$ Değişimi (%)
0	1.06.2016	0,00	0,000	51,9	0
60	1.07.2016	-0,20	0,012	46,8	-10
120	1.08.2016	-0,19	0,016	44,1	-15
180	1.09.2016	-0,43	0,018	38,3	-26
240	1.10.2016	-0,62	0,025	38,6	-26
300	1.11.2016	-0,66	0,028	37,8	-27
<b>RAP15</b>					
Çevrim	Test Tarihi	% Ağırlık Değişimi	% Boy Değişimi	Dinamik Elastisite Modülü ( $E_d$ ) (GPa)	$E_d$ Değişimi (%)
0	1.06.2016	0,00	0,000	43,8	0
60	1.07.2016	-0,31	0,001	43,5	-1
120	1.08.2016	-0,49	0,004	40,7	-7
180	1.09.2016	-0,69	0,009	37,1	-15
240	1.10.2016	-0,83	0,018	33,4	-24
300	1.11.2016	-0,99	0,021	31,9	-27
<b>RAP20</b>					
Çevrim	Test Tarihi	% Ağırlık Değişimi	% Boy Değişimi	Dinamik Elastisite Modülü ( $E_d$ ) (GPa)	$E_d$ Değişimi (%)
0	1.06.2016	0,00	0,000	42,2	0
60	1.07.2016	-0,28	0,002	40,2	-5
120	1.08.2016	-0,62	0,006	36,0	-15
180	1.09.2016	-0,72	0,011	34,9	-17
240	1.10.2016	-0,77	0,016	31,7	-25
300	1.11.2016	-0,80	0,019	30,3	-28



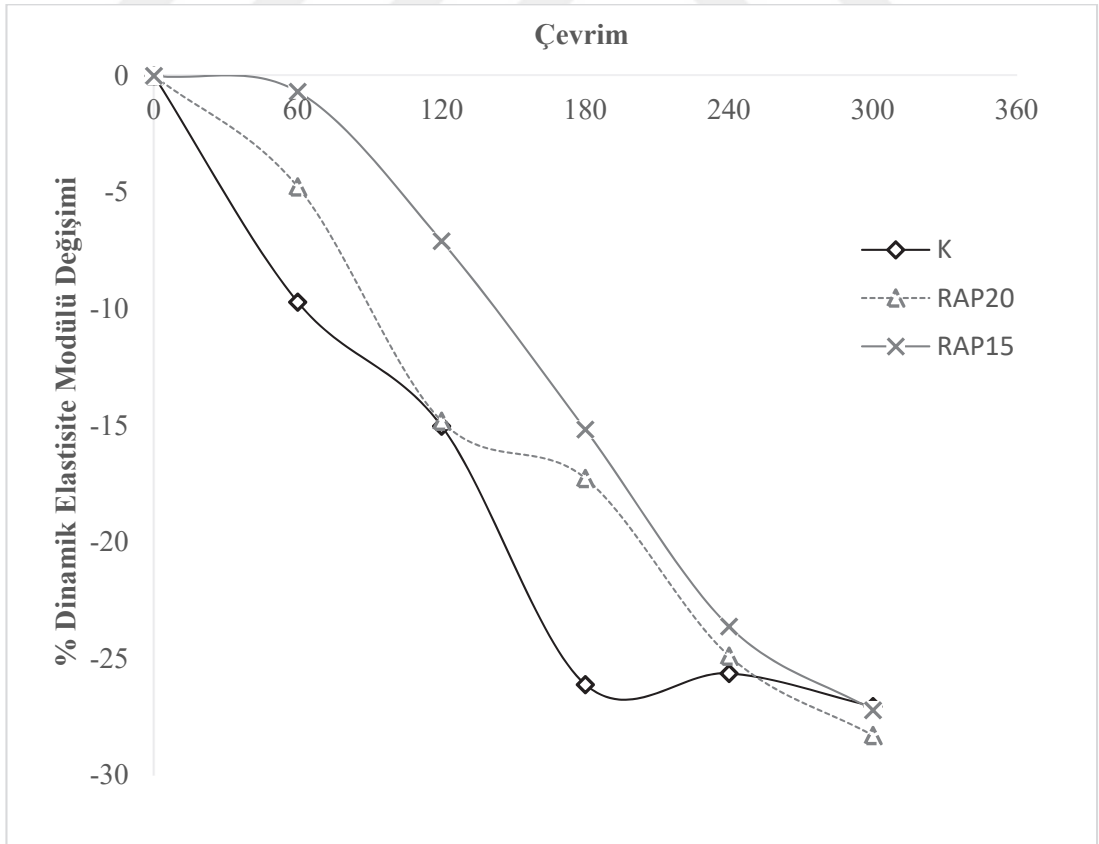
Şekil 2.15. 300 döngüde ağırlık değişimi



Şekil 2.16. 300 döngüde boy değişimi



Şekil 2.17. 300 döngüde Dinamik Elastisite Modülü değişimi



Şekil 2.18. 300 döngüde Dinamik Elastisite Modülü değişimi (%)



Neville (2010), Durabilite Faktörü'nü ( $D_f$ ) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$D_f = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times \frac{n}{3} \quad (2.3)$$

Burada,

$E_{dn}$  : 300 döngü sonrası Dinamik Elastisite Modülü (MPa)

$E_{d0}$  : Başlangıç Dinamik Elastisite Modülü (MPa)

$n$  : 300 döngü

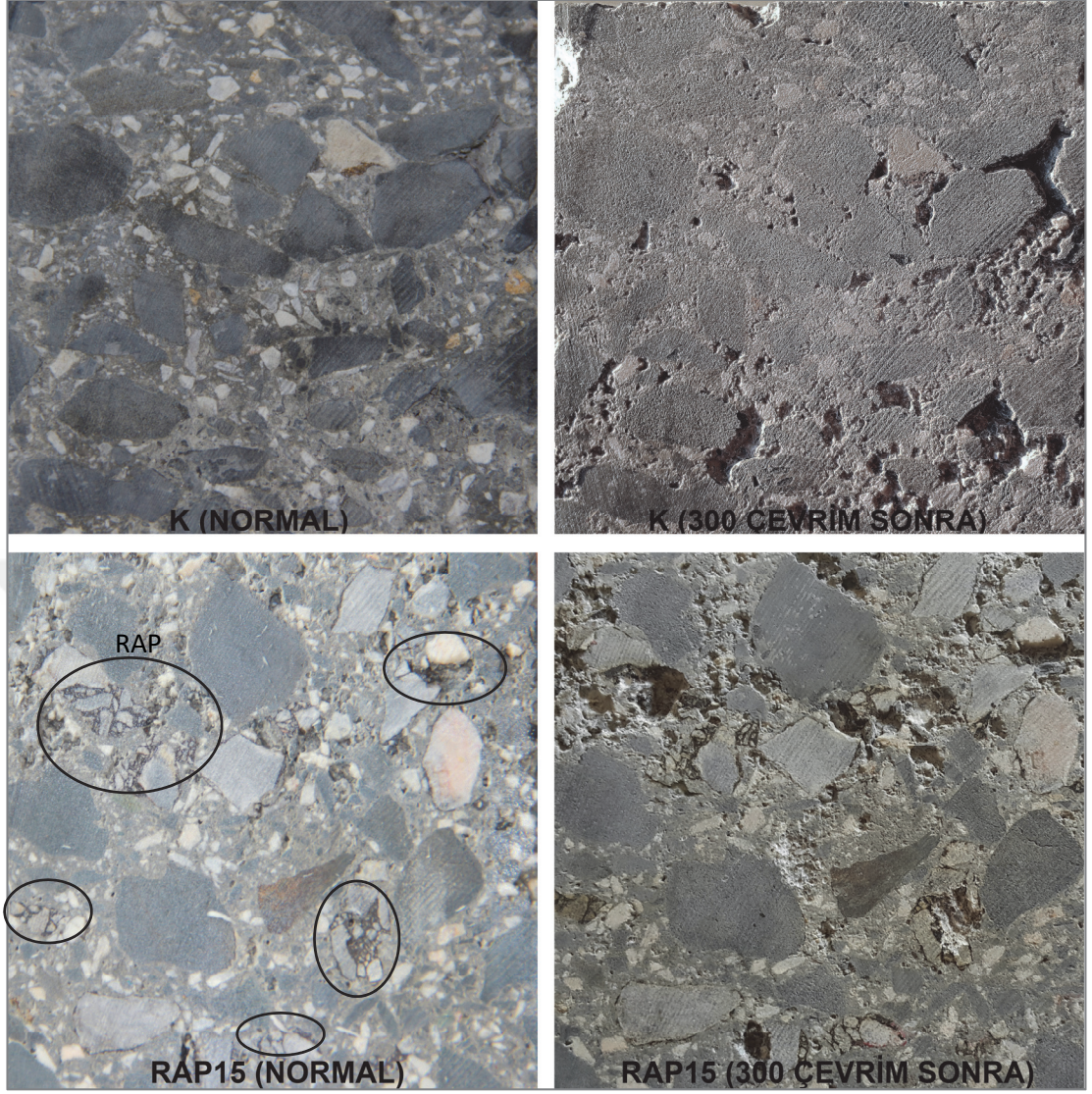
Sertleşmiş betonda Durabilite Faktörü'nün 40'ın altında olması yetersiz, 40 ile 60 arasında şüpheli, 60 yukarısında ise tatmin edici olduğu bildirilmiştir (Neville, 2010).

Hazaree (2007) ile Mardani-Aghabeglou ve diğ. (2013)'e göre, içeriğinde hava sürüklenmemiş ve çimento düzeyi  $250-300 \text{ kg/m}^3$  ve yukarısı olan SSB karışımlarında Durabilite Faktörü'nün 300 döngü sonunda %65 veya yukarısı seviyesinde olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada ise bütün karışımlarda yaklaşık %73 düzeyinde bir Durabilite Faktörü tespit edilmiştir (Tablo 2.16). Bu temel farklılığın numune üretme konusunda farklı sıkıştırma prosedürlerinin uygulanması ve farklı boyutlarda numunelerin kullanılması etkili olmuştur.

Donma/çözülme test sonuçları, RAP içerikli malzemelerin SSB karışım içeriğinde ağırlıkça %20 düzeyine kadar kullanılması durumunda, donma/çözülme direnci açısından önemli bir farklılık ortaya çıkarmadığını göstermiştir. K ve RAP15 numunelerine ait normal ve 300 çevrim sonrasına ait yüzey görüntüsü Şekil 2.19'da verilmiştir.

Tablo 2.16. Durabilite Faktörü'nün karışım tipine göre değişimi

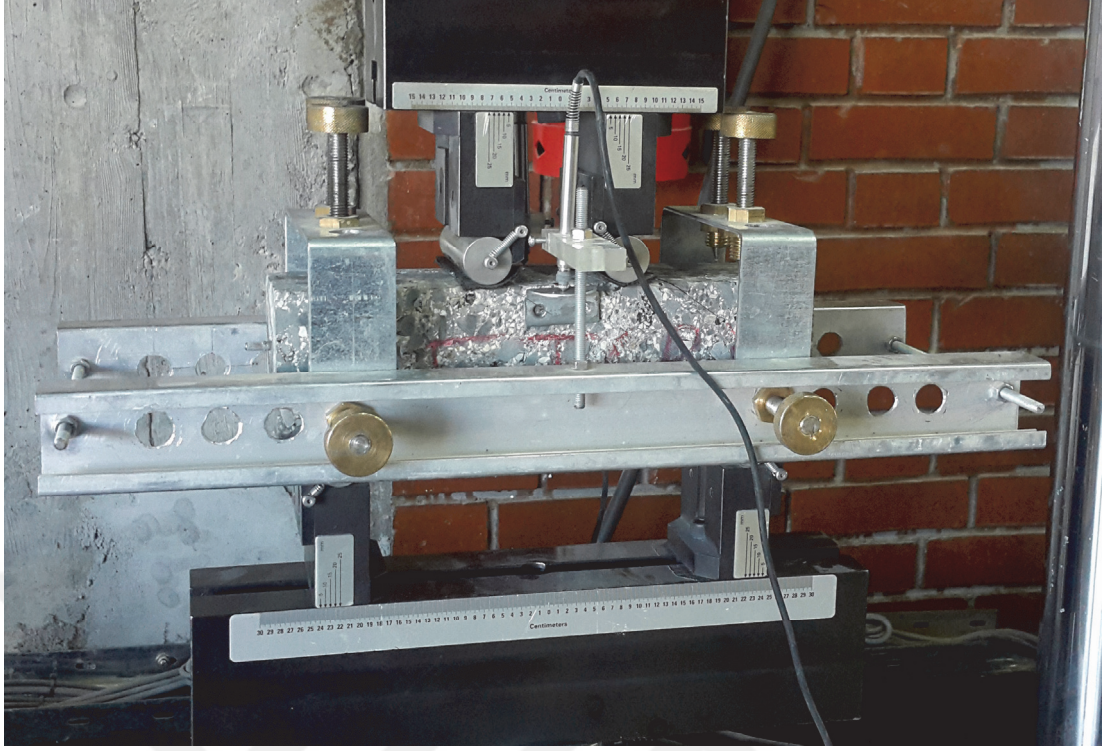
Karışım Tipi	Başlangıç Dinamik Elastisite Modülü (GPa)	300 Döngü Sonrası Dinamik Elastisite Modülü (GPa)	n	Durabilite Faktörü ( $D_f$ )
K	51,9	37,8	300	72,8
RAP15	43,8	31,9	300	72,8
RAP20	42,2	30,3	300	71,8



Şekil 2.19. K ve RAP15 için deney önce ve sonrasına ait yüzey görüntüsü

#### 2.4.4. Eğilme dayanımı tayini

Prizmatik numunelerin dört nokta eğilme altındaki gerilme ve şekil değiştirme deneyleri, ODTÜ Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda MTS-793 cihaz ile numunelerin iki yüzeyine monte edilen LVDT'ler yardımıyla, sehim kontrollü olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.20). Donma/çözülme deneyi sonunda elde edilen numuneler ile laboratuvar ortamında bekletilen numuneler olmak üzere iki grup arasında bir kıyaslama yapılmıştır. Bu sayede donma/çözülme etkisinin eğilmede çekme dayanımına olan azaltıcı etkisinin farklı karışım tiplerinde gözlemlenebilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 2.20. MTS-793 yükleme çerçevesi

Prizmatik örneklerle ait test sonuçları Tablo 2.17’de verilmiştir. Tabloda, donma/çözülme etkilerine maruz kaldıktan sonra test edilen numunelere “D/Ç” kodu eklenmiştir.

Tablo 2.17. Eğilme deneyi test sonuçları

Karışım Tipi	Ağırlık (kg)	Max. Yük (kN)	Max. Yükteki Sehım (mm)	Eğilme Dayanımı (MPa)	300 Döngü Sonunda Eğilme Dayanımındaki Azalma (%)
K	4,057	16,72	0,032	9,34	6,9
K(D/Ç)	3,914	15,57	0,021	8,69	
RAP15	3,786	10,46	0,037	5,84	22,4
RAP15(D/Ç)	3,701	8,11	0,031	4,53	
RAP20	3,749	7,13	0,045	3,98	17,6
RAP20(D/Ç)	3,786	5,88	0,029	3,28	

Donma/çözülme olayının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, eğilme dayanımı için K karışımlarında yaklaşık %7, RAP içerikli karışımlarda ise %17-22 düzeyinde bir azaltıcı etki saptanmıştır (Tablo 2.17). Numunelerin deney sonrasındaki görüntüleri Şekil 2.21’de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Numunelerin eğilme deneyinden sonrasındaki görüntüleri

## 2.5. RAP İçerikli SSB Yolun Yapısal ve Ekonomik Analizi

Bu bölümde, karışım içeriğinde RAP kullanılması durumunda ekonomik ve yapısal kayıpların göz ardı edilip edilmeyeceği, farklı zemin koşullarında bir yolun yapısal tasarımı çerçevesinde incelenmiştir.

SSB yolların yapısal tasarımında birtakım dizayn prosedürleri kullanılmaktadır (PCA, 1987, 2002, 2005). Bu tasarım rehberlerinde dingil yüklerinde bağlı olarak, kaplama tabakasının eğilme dayanımı ve yorulmaya dayalı birtakım amprik bağıntılar sayesinde üstyapı kalınlıkları tespit edilebilmektedir. KENPAVE, 1985'te Huang tarafından sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir yazılım olarak geliştirilmiştir (Huang, 1993). Dingil yükleri ve zemin reaksiyonları düşey yük olarak sisteme girilerek, gerilme, şekil değiştirme ve sehim gibi parametreler hesaplanabilmektedir. Taban zemininin likit veya katı olarak tanımlanabildiği bu yazılımda, beton kaplamalar bağlı (bonded) veya bağısız (unbonded) olarak köşe, kenar ve orta yük etkileri altında analiz edilebilmektedir. Sonlu elemanlara bölünen rijit plak için, aşağıdaki veriler KENPAVE'e veri olarak girilmektedir (Huang, 1993);

- Tabaka sayısı ve yükseklikleri,
- Malzeme esneklik modülü, eğilme dayanımı ve Poisson oranları,

- Etki eden dingil yükü sayısı,
- Tekerlek konumu, yarıçapı, kuvveti ve basıncı,
- Gerilme ve şekil değiştirme değeri istenen koordinatlar,
- Performans kriterleri (yorulma, tekerlek izi, deplasman seviyesi vb.).

Packard ve Tayabji (1985) tarafından aşağıda beton plaktaki yorulmayı ifade eden eşitliklerden kritik olanının, kaplama için performans kriteri olarak seçilmesi tavsiye edilmektedir.

$$\frac{\sigma}{S_c} \geq 0,55 \text{ ise } \log N_f = 11,737 - 12,077 \left( \frac{\sigma}{S_c} \right) \quad (2.4)$$

$$0,45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0,55 \text{ ise } N_f = \left( \frac{4,2577}{\frac{\sigma}{S_c} - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (2.5)$$

$$\frac{\sigma}{S_c} \leq 0,45 \text{ ise } N_f = \text{sınırsız (unlimited)} \quad (2.6)$$

Burada,

$N_f$  : Kabul edilebilir dingil yükü tekerrür sayısı

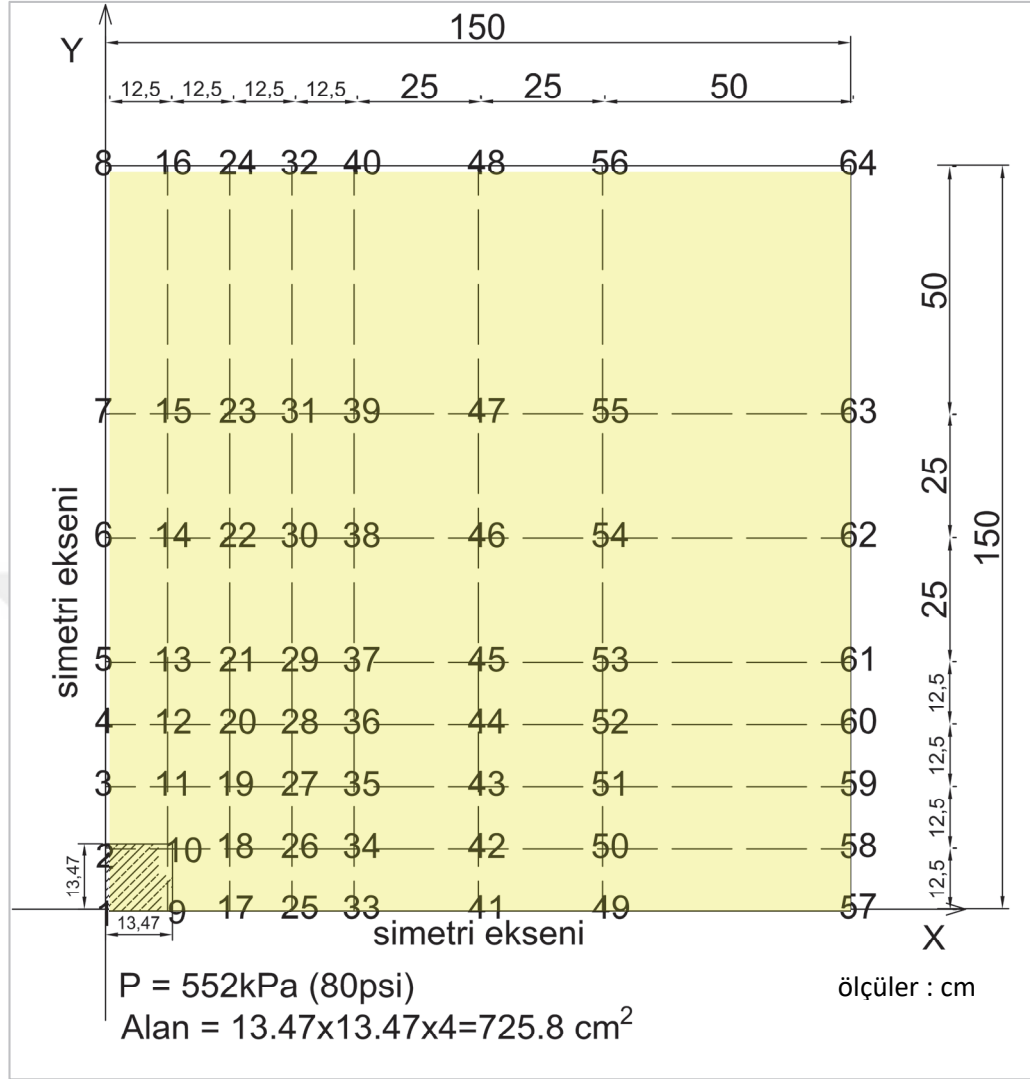
$\sigma$  : Kaplamada oluşan eğilme gerilmesi (MPa)

$S_c$  : Betonun eğilmede çekme mukavemeti (MPa)

Rijit üstyapıların tasarımında beton plak, elastik zemine oturan bir kaplama olarak düşünülür ve sonlu elemanlara bölünerek yük yoğunlukları kaplamanın tamamına dağıtılır. Kaplama kesiti bir bütün olarak sisteme aktarabileceği gibi, sadece x, y veya hem x hem y eksenine göre simetrisi alınarak da tanıtılabilir (Huang, 1993).

### 2.5.1. Yapısal tasarım için bir uygulama

3 x 3 m boyutundaki rijit plak, x - y eksenine simetri olacak şekilde (1,5 x 1,5 m) Şekil 2.22'de gösterildiği gibi 64 nokta ve 49 dikdörtgen elemana bölünerek KENPAVE yazılımına tanıtılmıştır.

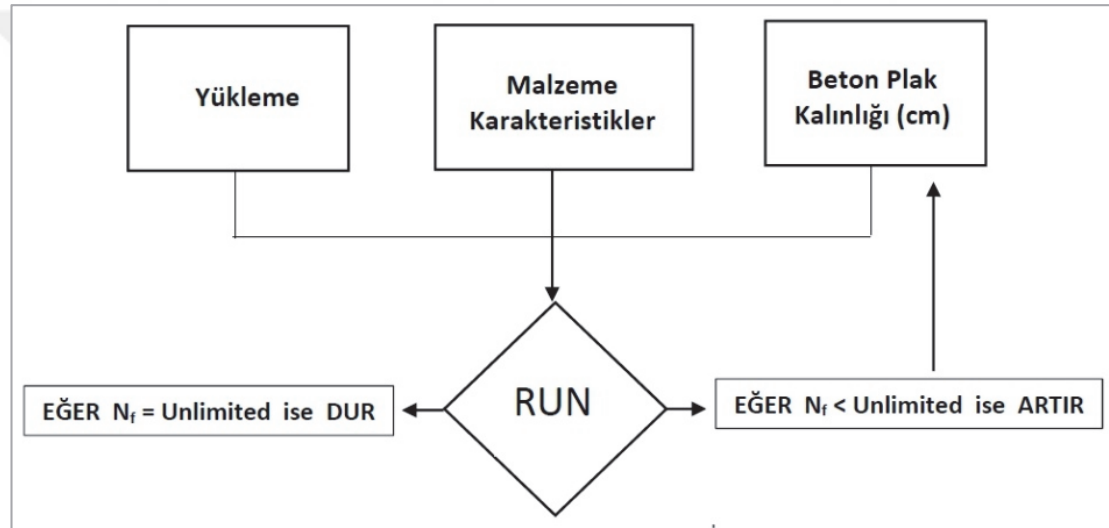


Şekil 2.22. Plak üzerindeki yük konsantrasyonu ve düğüm noktaları

Tasarımda 3 farklı zemin ihtimali göz önüne alınmıştır. Bütün zemin sınıfları için Poisson oranı sabit ve 0,4 olarak, temel Esneklik Modülü ( $M_R$ ) değerleri Düşük Zemin: 34,5 MPa (5000 psi), Orta Zemin: 69 MPa (10000 psi) ve Yüksek Zemin: 138 MPa (20000 psi) olacak şekilde kabul edilmiştir. Tekerlek basıncı ve alanı, Kenis (1978)'e uygun olarak sırasıyla 552 kPa (80 psi) ve 725,8 cm<sup>2</sup> (kare şeklinde) alınmıştır. Performans kriterinde ise, kaplama üzerinde “sınırsız” bir dingil yükü tekrerrü arzu edildiğinden Denklem (2.6) esas alınmıştır. Kullanılacak veri setinde, deneysel çalışmalarda K, RAP15 ve RAP20 karışımları için tespit edilen dayanım değerleri kullanılmıştır. Giriş verisi 9 run olacak şekilde Tablo 2.18’de, izlenilecek işlem algoritması ise Şekil 2.23’te gösterilmektedir. Ek A’da 9. sıradaki kombinasyon için programın işleyişi hakkında görseller verilmiştir.

Tablo 2.18. Programa girilen bağımsız değişkenler

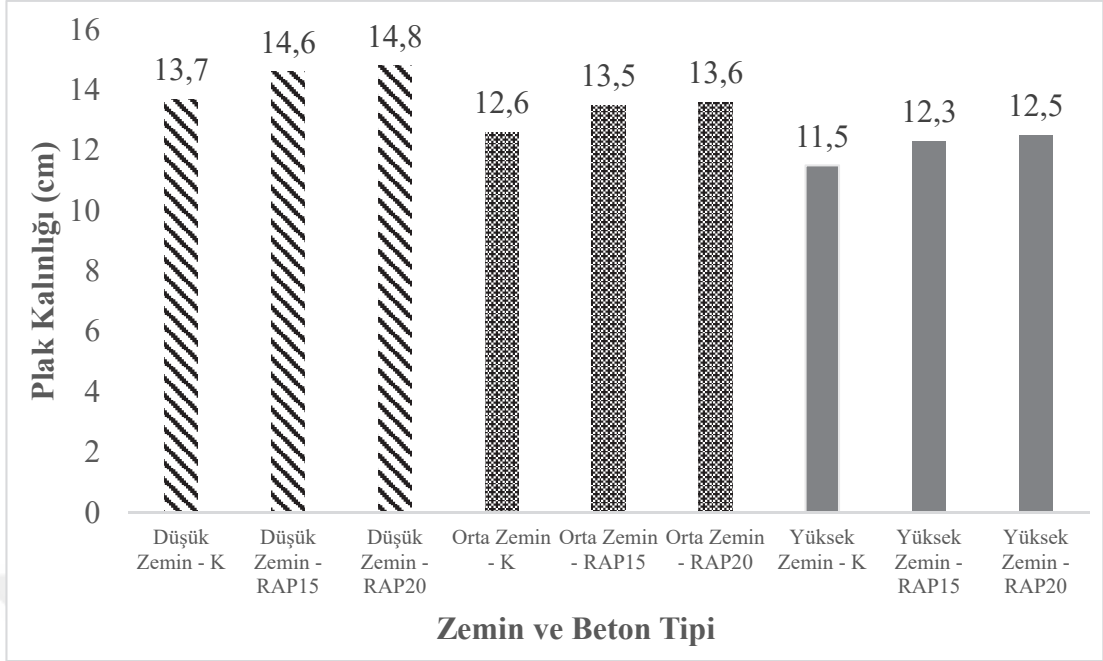
Run	Karışım Tipi	Temel Esneklik Modülü ( $M_R$ ), MPa	Beton Elastisite Modülü ( $E_c$ ), GPa	Poisson Oranı ( $\nu$ )	Betonun Eğilmede Çekme Mukavemeti ( $S_c$ ), MPa
1	K	34,5	42,1	0,202	6,30
2	K	69	42,1	0,202	6,30
3	K	138	42,1	0,202	6,30
4	RAP15	34,5	31,5	0,240	5,57
5	RAP15	69	31,5	0,240	5,57
6	RAP15	138	31,5	0,240	5,57
7	RAP20	34,5	29,2	0,240	5,41
8	RAP20	69	29,2	0,240	5,41
9	RAP20	138	29,2	0,240	5,41



Şekil 2.23. Program için kullanılan işlem algoritması

### 2.5.2. Analiz sonuçları

RAP15 ve RAP20 karışımlarında beton plak kalınlığı her zemin koşulu için yaklaşık 1 cm artırıldığında servis ömrü (dingil yükü tekrür sayısı) K karışımlarındaki gibi “sınırsız” olmaktadır. Bir başka deyişle, aynı tasarım ömrünün sağlanabilmesi için RAP15 ve RAP20 karışımlarında beton plak kalınlığı Düşük, Orta, Yüksek dayanımlı zeminler için sırasıyla %6,6, %7,1 ve %6,9 oranında artırılmalıdır. Zemin sınıfına göre bir değerlendirme yapıldığında ise, düşük dayanımlı zemin yerine orta dayanımlı bir zemin kullanımı bütün karışımlarda beton plak kalınlığında yaklaşık 1 cm’lik bir ekonomiklik kazandırmıştır. Bu oran düşük dayanımlı zeminden yüksek dayanımlı zemine geçişte yaklaşık 2 cm düzeyindedir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Farklı zeminler için beton tipine göre kaplama kalınlığı değişimi

Bu analizlere göre, K karışımlarında zemin durumu ne olursa olsun belirlenen yorulma ömrüne göre (örneğin 15 cm plak kalınlığı tespit edilirse) RAP15 ve RAP20 kullanıldığı durumda aynı yorulma ömrünün sağlanabilmesi için yaklaşık olarak 16 cm plak kalınlığı gerekli olur. Beton karışımında agrega maliyeti Türkiye şartlarında 2017 verilerine göre 20TL/ton civarındadır. İki kaplama arasında ekonomik bir değerlendirme yapıldığında, RAP kullanılması durumunda 1 km x 6,5 m yol için (1000 x 6,5 x 0,6) 3900 TL'lik bir kazanç elde edileceği anlaşılmaktadır (Tablo 2.19).

Tablo 2.19. RAP kullanılması durumunda ortaya çıkan fayda maliyet

AGREGA TİPİ	K	RAP	FAYDA & ZARAR
2No (ton/m <sup>3</sup> )	0,540	0,540	0
1No (ton/m <sup>3</sup> )	0,536	0,214	+ 0,322
K1 (ton/m <sup>3</sup> )	0,522	0,522	0
K2 (ton/m <sup>3</sup> )	0,526	0,526	0
Agrega Maliyeti (TL/ton)	20,0	20,0	0
Agrega Maliyeti (TL/m <sup>3</sup> )	42,48	36,05	+ 6,43
1 m <sup>2</sup> Yol Hacmi (m <sup>3</sup> )	0,15	0,16	- 0,01
1 m <sup>2</sup> Yol Maliyeti (TL)	6,37	5,77	+ 0,6

Deneysel çalışmalardan edinilen bilgiler ışığında RAP içerikli SSB yol uygulaması ile ilgili aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir:



SSB içeriğinde RAP'in kullanımı, ekonomik getirisinin yanında doğal kaynakların korunması, enerji ve kaynak verimliliğinin sağlanması, atık yönetimi, daha düşük karbon ve sera gazı emisyonu gibi belirgin faydaları ile yol kaplaması uygulamalarında verimliliğin artmasında etkin rol oynayabilmektedir. RAP'in istenen boyutlarda elenmesi ve nakliyesi için yol yapım otoriterleri tarafından uygun fırsat ve teşvikler sağlandığı takdirde, çeşitli saha uygulamalarının yapılabilmesi mümkün olacak ve kaplamaların uzun dönem saha performansı gözlemlenebilecektir. İşletme yetersizliği, yasal mevzuatın olmaması, şartname limitleri, RAP içeriğindeki agrega/bitüm oranındaki değişkenlik ve ülkemizde bu konuda geçmiş deneyimlerin olmaması gibi nedenler, bu malzemelerin kullanılması konusundaki handikapları oluşturmaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde, gerekli bu şart ve yasal mevzuatlar sağlandığı takdirde, RAP'in iyi derecelendirildiği sürece daha pahalı olan doğal agreganın yerini alabilecek düzeyde iyi bir alternatif malzeme haline dönüşebileceği, dayanım / dayanıklılık testleri ve tekrarlı yükler altında yapılan mekanistik bir analiz sonucunda tespit edilmiştir.

### **3. TEST YOLU ÜZERİNDE LABORATUVAR VE SAHA ÇALIŞMALARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

#### **3.1. Kocaeli İlinde Mevcut Durumun Tespiti**

##### **3.1.1. Konum ve nüfus dağılımı**

Kocaeli ili, Marmara Bölgesi'nin Çatalca-Kocaeli Bölümü'nde, 29° 22'—30° 21' doğu boylamı, 40° 31'—41° 13' kuzey enlemi arasında yer alır. Doğu ve güneydoğusunda Sakarya, güneyinde Bursa illeri, batısında Yalova ili, İzmit Körfezi, Marmara Denizi ve İstanbul ili, kuzeyde de Karadeniz'le çevrilidir. İl merkezi İzmit'in doğusundan geçen 30° doğu boylamı Türkiye saati için esas kabul edilir.

2015 yılı Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi sonuçlarına göre nüfusu 1.780.055 olup, yıllık nüfus artış hızı binde 32,7'dir. Büyükşehir sınırlarının il mülki sınırları olarak değiştirilmesi ve 6360 ve 6447 sayılı Kanunlar uyarınca, köy tüzel kişiliğinin kalkması ve köylerin mahalleye dönüşmesi nedeniyle nüfusun tamamı şehirlerde yaşamaktadır. İlde, 1'i Büyükşehir 12'si ilçe belediyesi olmak üzere 13 belediye, 472 mahalle bulunmaktadır. 1993 yılından itibaren büyükşehir belediyesi olarak faaliyet gösteren İzmit Büyükşehir Belediyesi'nin ismi, 2004 yılında çıkarılan 5216 sayılı Kanun ile Kocaeli Büyükşehir Belediyesi olarak değiştirilmiş ve aynı Kanun ile KBB'nin sınırları il mülki sınırı olarak kabul edilmiştir (KBB, 2016).

Kocaeli, 1/50000 ölçekli Çevre Düzeni Planı araştırma raporundaki arazi kullanım verilerine göre 350500 hektar alana sahiptir. Toplam alanın büyük bir bölümünü % 52'lik oranla Gebze ilçesinin kuzeyinde ve doğusunda, İzmit, Gölcük ve Karamürsel ilçelerinin güneyinde kalan orman alanları oluşturmaktadır. Bunu %29,4'lük bir oranla tarım alanları ve meralar izlemektedir. İl genelinde tarım alanları dağılımında en büyük payı 29449 ha ile Kandıra ilçesi almaktadır. Yollar için arazi kullanımı ise %1,13 seviyesindedir (Demirel, 2015).

### 3.1.2. İklim ve meteoroloji

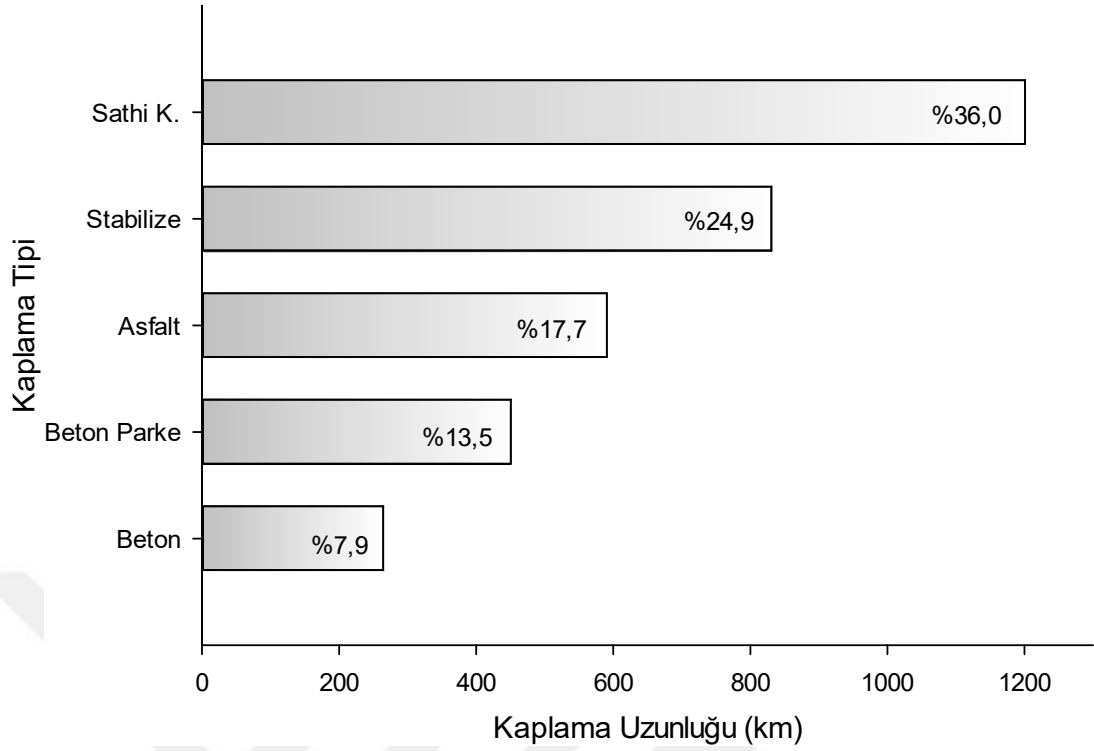
İklim; Karadeniz ve Akdeniz iklimlerinin tesiri altındadır. İlde yazlar sıcak ve az yağışlı, kışlar ise yağışlı ve görece ılık geçer. Yağışlar her mevsim görülmekle birlikte düzensiz olup, kuzeyden güneye doğru inildikçe azalmaktadır ve yaz ile kış aylarında rutubet derecesi yüksektir. Yılın en soğuk ayları olan Ocak ve Şubat aylarında sıcaklıklar  $-5\text{ C}^{\circ}$ 'yi geçmez. 1982-2015 yılları arasında Marmara bölgesindeki  $0\text{ C}^{\circ}$ 'nin altındaki gün sayısı analizlerine göre, ortalama yıllık donma/çözülme olayının 12 defa gerçekleştiği tespit edilmiştir (URL-2).

### 3.1.3. Trafik altyapısı

Kocaeli, İstanbul'un İç Anadolu, doğu ve güney bölgelerle bağlantısının sağlandığı önemli bir karayolu kavşak noktasıdır. Kocaeli merkez ilçesi olan İzmit, Derince, Körfez ve Gebze ilçeleri ile birleşmiş bir yapıda İzmit Körfezinin kenarında doğrusal bir kent formunda İstanbul sınırlarına kadar uzanan bir kıyı kentidir. Kent merkezi kentin güneyinde deniz kıyısını izleyen İstanbul-Ankara D-100 Karayolu ile kuzeydeki yamaçlar arasında sıkışmış bir konumdadır. Bu yamaçların daha kuzeyinden E-6 (TEM) Otoyolu geçmektedir. D-100 Karayolunun güneyinden, karayoluna paralel olarak devam eden demiryolu ise, kentin denizle bağlantısını kısıtlayan bir konumdadır. D-100 Karayoluna paralel uzanan ve kent merkezinin omurgasını oluşturan ana caddelerden İstasyon, Hürriyet, Cumhuriyet ve İnönü Caddeleri doğu-batı doğrultusunda ana damarları oluşturmaktadır (Demirel, 2015).

Kocaeli ili, 486 km'si KGM, 3334 km'si ise KBB sorumluluğunda olmak üzere toplamda 3820 km dolaylarında bir karayolu ağına sahiptir. Otoyollar, devlet yolu ve il yolları, Karayolları 17. ve 1. Bölgelerine bağlıdır. Kaplama tipi 1,6 km'lik Karamürsel kent geçişindeki beton yolun dışında asfalt kaplamadır. Yol sınıfına göre karayolu dağılımı Tablo 3.1'de, toplam ulaşım ağına ait genel bir görünüm ise Şekil 3.1'de verilmektedir.





Şekil 3.2. KBB sorumluluğundaki yol ağının kaplama tipine göre değişimi (KBB, 2010-2016)

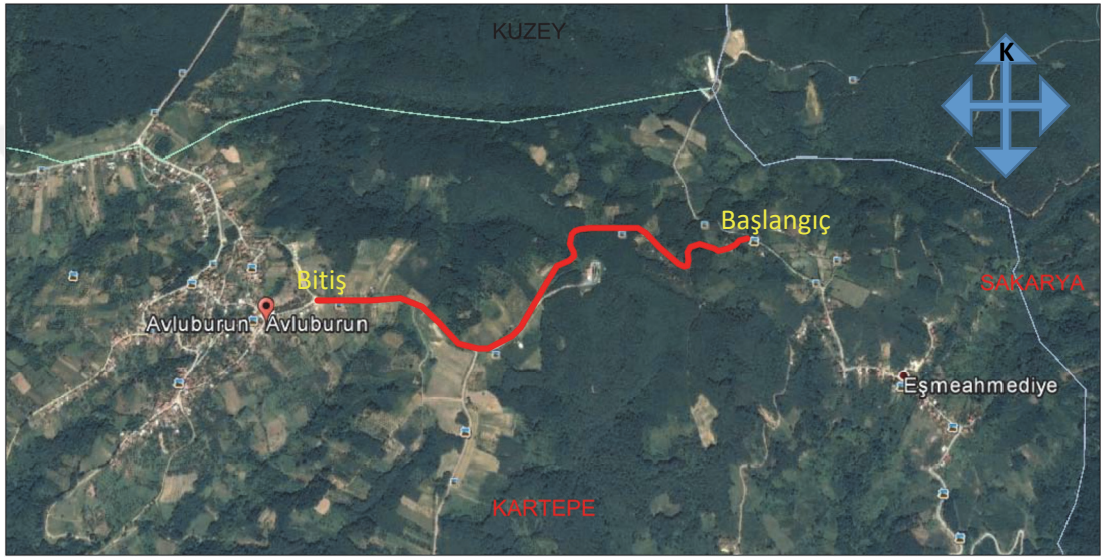
Beton kaplamalı yol imalatlarının ilerleyen dönemlerde sathi kaplamalı yol güzergâhlarında kullanılacağı, bu sayede iki kaplama tipi arasındaki bu farkın da zamanla azalacağı beklenmektedir (Abut ve Cankaya, 2016).

Dolayısıyla SSB test yolunun yapılmasından sonraki süreçte, bu test yolundan alınacak mühendislik verileri ve oluşacak mali tabloların değerlendirilmesi hem Kocaeli kenti, hem de Türkiye için önem taşımaktadır. Bu vesileyle Kocaeli İlinde yol yapımı süreçlerinde yaşam döngüsü maliyet analizlerinin yapılarak kaplama tipleri arasındaki mukayeseler ile ekonomik faydaların ortaya konması hedeflenmiştir.

Ayrıca, test yolunun yapılması ile SSB karışımlarında literatürdeki saha ve laboratuvar çalışmalarının mukayesesine katkı sağlanabilecektir. Aynı zamanda, mevsim döngüleri sonucunda gelişen ıslanma-kuruma, soğuma-ısınma, donma-çözülme gibi reel etkilerin sebep olabileceği muhtemel zararlar, kaplama üzerinde eş zamanlı olarak gözlemlenebilecek, bu sayede ilerleyen zamanlarda gerçek zamanlı bakım ve onarım stratejilerinin geliştirilmesine imkân sağlanacaktır.

### 3.2. Test Yolu İçin Güzergâh Seçimi

Kocaeli İli, Kartepe İlçesi'nde Avluburun - Eşmeahmediye mahallelerini birbirine bağlayan eski sathi kaplama yol gövdesi üzerine inşa edilen SSB yolun plan görüntüsü Şekil 3.3'te verilmektedir (Başlangıç, Enlem: 40°46'26,9"K - Boylam: 30°13'37,6"D ve Bitiş, Enlem: 40°46'18,2"K - Boylam: 30°12'27,4"D). Boyuna ve enine eğimlerin sıklıkla değiştiği platform, yoğun kar alan bir bölge üzerinde yaklaşık olarak 450 m rakımda konumlanmaktadır. Yolun boy profilini gösterir grafik Ek B'da verilmiştir.



Şekil 3.3. Yolun plan görüntüsü

### 3.3. Zemin Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi

Arazi jeolojik yapısı sert kayalardan oluşmaktadır ve platform gövdesinde yer yer bozulmuş sathi kaplama olmasına rağmen hizmet sağlamaktadır. 2,2 km'lik güzergâh boyunca zemin taşıma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla CBR (California Bearing Ratio) araştırması yapılmıştır. Deneysel yollarla elde edilen %CBR değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. %CBR değerlerinin güzergâh boyunca değişimi

Sıra No	km	%CBR
1	0+000	45
2	0+200	50
3	0+400	35
4	0+600	50
5	0+800	63

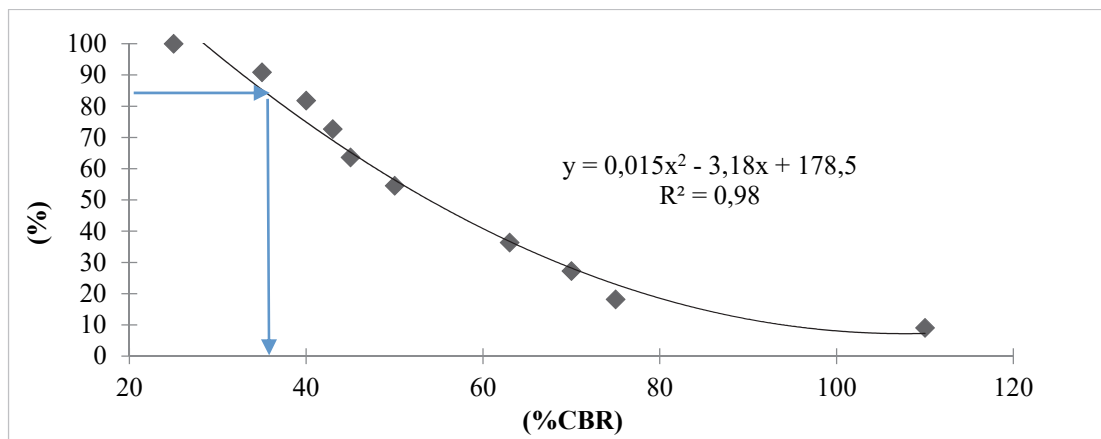
Tablo 3.2. (Devam) %CBR değerlerinin güzergâh boyunca değişimi

Sıra No	km	%CBR
6	1+000	25
7	1+200	40
8	1+400	43
9	1+600	70
10	1+800	75
11	2+000	110

Tespit edilen %CBR değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak ve her birinden büyük veya eşit %CBR sayısı yüzdesi bulunarak Tablo 3.3'teki gibi bir frekans cetveli oluşturulmuştur. Frekans cetveli, Şekil 3.4'teki gibi bir grafik üzerinde gösterildikten sonra, belirlenen güvenilirlik düzeyine göre proje %CBR değeri grafik üzerinden seçilmiştir. Proje kapsamında kırsal bölgelerde yapılan düşük hacimli yollar için önerilen %85 güvenilirlik düzeyi seçilmiş ve proje %CBR değeri 35 olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.4) (AASHTO, 1993).

Tablo 3.3. %CBR frekans tablosu

%CBR	Eşit Veya Büyük Değer Sayısı	Eşit Veya Büyük Değer %'si
110	1	9
75	2	18
70	3	27
63	4	36
50	6	55
45	7	64
43	8	73
40	9	82
35	10	91
25	11	100



Şekil 3.4. %CBR dağılımı yüzde değişimi

### 3.4. Yolun Yapısal Tasarımı

Hesap yönteminde elastik zemine oturan rijit plak davranışı göz önüne alınarak AASHTO (1993) Tasarım Metodu kullanılmıştır. Bu ampirik metotta, Derzli Donatısız Beton Kaplama (JPCP, Jointed plain concrete pavements) kalınlığının bulunmasında AASHTO yol deneyinden yararlanılarak hazırlanan ve üstyapıya etkileyen faktörleri içeren aşağıdaki “AASHTO Deney Yolu Denklemi” kullanılmıştır.

$$\log_{10} W_{18} = Z_R S_0 + 7,35 \log_{10} (d+1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4,5-1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(d+1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 P_T) \log_{10} \left[ \frac{S_c C_d (d^{0,75} - 1,132)}{215,63 J \left[ d^{0,75} - \frac{18,42}{\left[ \frac{E_c}{k} \right]^{0,25}} \right]} \right] \quad (3.1)$$

Burada,

$W_{18}$ : Eşdeğer Dingil Yüğü Tekerrür Sayısı (EDYTS)

d: Kaplama Kalınlığı (inc)

$S_c$ : Beton Eğilme Dayanımı (psi)

$E_c$ : Betonun Elastisite Modülü (psi)

k: Zemin Reaksiyon Modülü (lb/inc<sup>3</sup>)

R: Güvenilirlik (%)

$Z_R$ : Normal Standart Sapma

$S_0$ : Toplam Standart Sapma

$\Delta PSI$ : Servis Yeteneği Kaybı

$P_1$ : İlk Servis Yeteneği

$P_T$ : Son Servis Yeteneği

$C_d$ : Drenaj Katsayısı

J: Yüğü Transfer Katsayısı

Tasarım için aşağıdaki işlem algoritması takip edilir;

- Son servis yeteneği indeksi ( $P_T$ ) seçilir,
- Trafik analiz süresi (T) seçilir,
- Proje trafiği hesaplanır,
- Betonun eğilmede çekme emniyet gerilmesi ( $S_c$ ) seçilir,
- Taban zeminin reaksiyon modülü (k) belirlenir,



- $P_T$ ,  $T$ ,  $S_c$ ,  $k$ , ve proje trafiği değerlerine karşılık gelen beton plak kalınlığı, Denklem (3.1) yardımıyla tespit edilir.

### 3.4.1. Servis yeteneği

Bir üstyapının yüksek hız ve hacimdeki trafiğe hizmet edebilme yeteneğine servis yeteneği denmektedir. Servis yeteneği, servis yeteneği derecesi ile servis yeteneği indeksinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (AASHTO, 1993).

Servis yeteneği derecesi, karayolu mühendisliği konularında uzun süreli deneyimi olan seçme uzmanlardan oluşan bir kurulun, karayolundan yararlanan kimseler sıfatı ile yola verdikleri bireysel değerlendirmelerin ortalamasıdır. Servis yeteneği derecesi için (0) ile (5) arasında değişen bir ölçek tespit edilmiştir. Burada (5) değeri en yüksek, (0) değeri ise en düşük servis yeteneği derecesini gösterir.

Servis yeteneği indeksi, yol yüzeyinin belirli fiziksel özelliklerinin (tekerlek izi, çatlak uzunluğu, yama miktarı, boyuna geometrik düzgünlük, vb.) ölçülmesi ile elde edilen amprik bir ifadedir. Bu kavramlar sayesinde, çeşitli istatistiksel analizler yapılarak yolun farklı fiziksel özelliklerinin ölçümü ile konfor arasındaki ilişkiyi ortaya koymak mümkün olmaktadır.

Üstyapı tasarımı için ilk ve son servis yeteneği indekslerinin seçilmesi gereklidir. İlk servis yeteneği indeksi ( $P_I$ ) olup, yapımdan hemen sonra kullanıcı tarafından değerlendirilir. AASHTO deneme yolunda gözlenen ( $P_I$ ) değerleri rijit üstyapılar için 4,2 kabul edilmektedir. Otoyol, ekspres yol gibi yüksek standartlı yollarda ( $P_I$ ) = 4,4–4,5 olarak alınabilir. Son servis yeteneği indeksi ( $P_T$ ) olup, tekrar yapımdan önce veya takviye tabakası yapımından önce kabul edilebilir en düşük değerdir. Bu indeks anayollarda 3,0 – 2,5 ve düşük sınıflı yollarda 2,0 olarak alınabilir. Daha düşük sınıflı yollarda, ekonomik şartların da gerektirmesi durumunda 1,5 alınabilir (AASHTO, 1993).

Proje kapsamında, anayol sınıfı kapasiteleri göze alınarak bu indeks ( $P_T$ ) = 2,5 alınmıştır.

### 3.4.2. Trafik

Üstyapı projelendirmesinde tabaka kalınlıklarına etki eden en önemli faktörlerden biri de kaplamaya etki eden dingil yükleridir. Projelendirmelerde kaplamaya etki eden bu yükler, 8,2 tonluk standart dingil yüklerle dönüştürülürler. Bu dönüştürme işlemlerinde Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF) kullanılır. Tablo 3.4'te çeşitli taşıt grupları için TEF verilmiştir (Sağlık ve Güngör, 2008). Bu verilerden hareketle, bir treylerin geçişi sırasında kaplamada oluşacak olan gerilmenin, otomobile kıyasla yaklaşık 6800 kat fazla olduğu söylenebilir.

Tablo 3.4. Tavsiye edilen taşıt eşdeğerlik faktörleri (Sağlık ve Güngör, 2008)

Taşıt Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF)
Treyler	4,10
Kamyon	2,90
Otobüs	3,20
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,60
Otomobil	0,0006

Güzergâh için çeşitli taşıt kategorileri kapsamında yapılan trafik analiz ve araştırmalarına göre, 20 yıllık süre içerisinde gerçekleşmesi tahmin edilen standart dingil yükü tekerrür sayısı yaklaşık 8,6 milyon olarak tespit edilmiştir (Tablo 3.5).

Tablo 3.5. 20 yıllık dingil yükü tekerrür sayısı analizi

Yol Sınıfı	2	Şerit Sayısı (i x j)	2	Güvenilirlik (%)	85	
Son Servis Kabiliyeti ( $P_T$ )	2,5	Yön Sayısı (i)	2	Standart Normal Sapma ( $Z_R$ )	-1,037	
Hesap Şerit Faktörü (n)	0,9	Aynı Yön. Şerit Sayısı (j)	1	Toplam Standart Sapma ( $S_o$ )	0,3	
YOGT (YILLIK ORTALAMA GÜNLÜK TRAFİK)	Treyler	Kamyon	Orta Yüklü Ticari Taşıt	Otobüs	Otomobil	TOPLAM
	0	400	200	100	200	900
Trafik Artış Katsayısı $r$ (%)	4	4	5	5	5	
İlk Trafik $t_0$	0	416	210	105	210	
Son Trafik $T_s = t_0 \times (1+r)^t$	0	912	557	279	557	
Proje Trafiği $T_p = 0,434(T_s - T_0) / \log(T_s / T_0)$	0	632	356	178	356	1521
Taşıt Eşdeğerlik Faktörü (TEF)	4,1	2,9	0,6	3,2	0,0006	

Tablo 3.5. (Devam) 20 yıllık dingil yükü tekerrür sayısı analizi

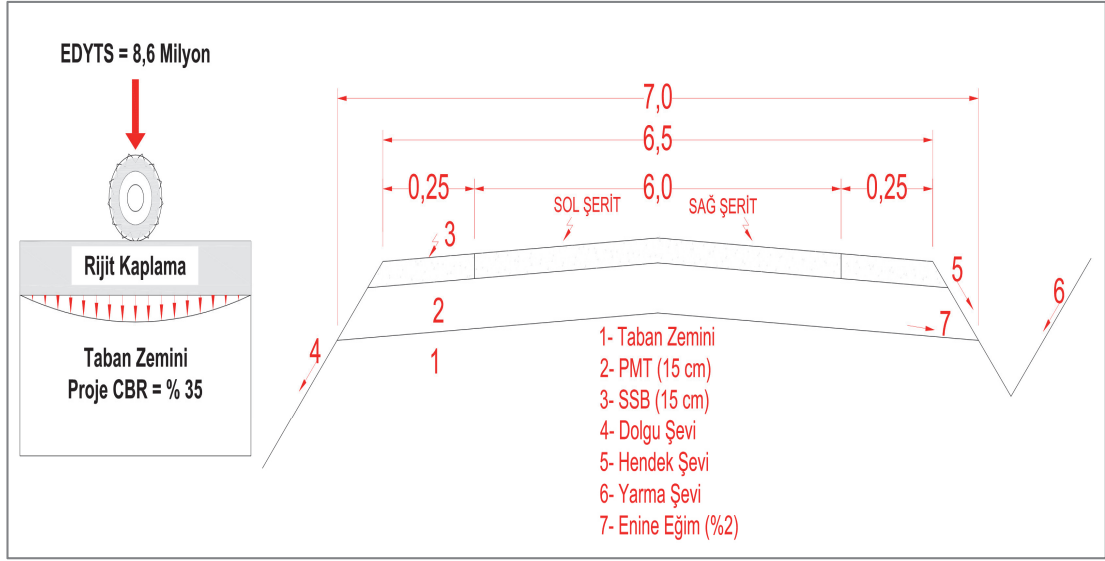
YOGT (YILLIK ORTALAMA GÜNLÜK TRAFİK)	Treyler	Kamyon	Orta Yüklü Ticari Taşıt	Otobüs	Otomobil	TOPLAM
Hesap Şeridine Düşen Günlük Ortalama Standart Dingil Yükü Tekerrür Sayısı ( $W_g = (T_p/i) \times (TEF) \times (n)$ )	0	824	96	256	0,096	1177
$W_{18}$ : Eşdeğer Dingil Yükü Tekerrür Sayısı (EDYTS) $T_{8,2} = W_g \times 365 \times 20$	8.589.992					

### 3.4.3. Gerekli plak kalınlığının bulunması

AASHTO yol denkleminde (Denklem (3.1)) göre plak kalınlığı 14,2 cm olarak tespit edilmiştir. Güvenli yönde kalınması amacıyla proje kesiti 15 cm olarak belirlenmiştir. Proje toplu sonuçları Tablo 3.6'da, proje en kesiti Şekil 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.6. Projede kullanılan veriler

PARAMETRE	DEĞER
Kaplama Kalınlığı (cm)	15,0
Proje Süresi (yıl)	20
20 yıllık Eşdeğer Dingil Yükü Tekerrür Sayısı (EDYTS)	8.600.000
Güvenilirlik (%)	85
Normal Standart Sapma ( $Z_R$ )	-1,037
Toplam Standart Sapma ( $S_0$ )	0,30
Servis Yeteneği Kaybı ( $\Delta PSI$ )	1,7
İlk Servis Yeteneği ( $P_I$ )	4,2
Son Servis Yeteneği ( $P_T$ )	2,5
Drenaj Katsayısı ( $C_d$ )	1,0
Yük Transfer Katsayısı ( $J$ )	2,0



Şekil 3.5. Proje tipik en kesiti

### 3.5. SSB Üretimi

Hazır beton, Kocaeli ilinde Nuh Beton'un Köseköy santralinden sağlanmıştır (Şekil 3.6). Beton santralinde karışım reçetesi olarak Bölüm 2, Tablo 2.8'de  $1 \text{ m}^3$  K karışımı için verilen agrega, su ve çimento miktarları kullanılmıştır. Arazi ve laboratuvar şartlarında reel kıyaslamaların yapılabilmesi için üretim sürecinin tamamında aynı agrega formasyonu, karışım oranları ve su/çimento düzeyinin kullanılması hedeflenmiştir.



Şekil 3.6. Beton santrali ve üretim prosesinden birkaç bölüm

18.11.2016 tarihinde yapımına başlanan SSB test yolu çalışmasının, 2016 yılı içerisinde ilk etapta 625 m'lik kısmı tamamlanmış, kış sezonu nedeniyle ara verilen kaplama imalatı 2017 Mart ayı içerisinde yaklaşık 2,2 km olarak tamamlanmıştır. 2016 yılı içerisinde 4, 2017 yılı içerisinde de 9 gün olmak üzere toplamda 13 gün süreyle SSB yol imalatı yapılmıştır. İmalat miktarlarının günlere göre değişimi ve gece ile gündüz hava sıcaklık farkları Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. İmalat miktarlarının günlere göre değişimi

Gün No	Uygulama Tarihi	km	Uzunluk [6,5 x 0,15 m en kesit için] (m)	SSB Hacmi (m <sup>3</sup> )	SICAKLIK (°C)	
					En Yüksek	En Düşük
1	18.11.2016	0+120	120	119	(17)	(2)
2	20.11.2016	0+300	180	176	(16)	(3)
3	22.11.2016	0+450	150	143	(17)	(7)
4	24.11.2016	0+650	200	187	(15)	(5)
5	08.03.2017	0+780	130	132	(21)	(2)
6	11.03.2017	1+000	220	220	(10)	(7)
7	12.03.2017	1+060	60	55	(8)	(7)
8	16.03.2017	1+300	240	231	(9)	(3)
9	17.03.2017	1+360	60	68	(6)	(-1)
10	18.03.2017	1+700	340	330	(13)	(0)
11	19.03.2017	1+800	100	99	(16)	(-1)
12	20.03.2017	2+090	290	275	(16)	(3)
13	21.03.2017	2+200	110	110	(10)	(2)
TOPLAM			2200	2145		

Agrega tartımlarında doygun kuru yüzey ağırlıklar baz alınmış ve gerekli nem düzeltmeleri yapılmıştır. Karıştırma işleminin Tek Milli Mikser (Single Shaft Mixer) ile gerçekleştirildiği üretim prosesinde, SSB karışımının kuru olması nedeniyle geleneksel beton ile kıyaslandığında saatlik kapasitede %50 oranında azalma tespit edilmiştir. Bu azalmada, geleneksel betonda 30s / 2m<sup>3</sup> (15 s/m<sup>3</sup>) olan karıştırma süresinin, SSB harmanında 50s / 1,75m<sup>3</sup> (28,6 s/m<sup>3</sup>) ile %90 oranında artması etkili olmuştur.

Hazır beton saatte yaklaşık 50-60 m<sup>3</sup> üretimle, 11 m<sup>3</sup>'lük sevkiyatlar halinde proje toplamında 195 sefer ve günlük ortalama 165 m<sup>3</sup> üretim yapılarak, 21 km uzaklıktaki şantiye sahasına damperli kamyonlarla ulaştırılmıştır.

### 3.6. Test Yolunun Yapılması

Sonbahar ve ilkbahar aylarında hava sıcaklıklarının ortalama 13 °C'de seyretmesi nedeniyle karışımın taşınması sırasında nem kayıpları gözlemlenmemiştir. Rüzgar etkisi gibi nedenlerden ötürü karışımın kurumaması için, tır dorseleri koruyucu membranla kapatılmış ve yolculuk boyunca sürekli kapalı kalması sağlanmıştır. Çift dingilli ve istihap haddi 25-30 ton olan tırlar vasıtasıyla inşaat sahasına nakledilen

malzeme, asfalt serici ile projesinde verilen kotlara göre serilmiş ve 2 farklı silindir yardımıyla sıkıştırılmıştır. Önce 11 ton ağırlığındaki vibrasyon sistemli düz çelik bandajlı silindir, hemen arkasından da tekerlek başına düşen yükü 3,5 ton olan lastik tekerlekli silindir kullanılmıştır. 6,5 m genişliğindeki beton yol gövdesi, trafiği aksatmamak adına sağ ve sol şerit olmak üzere iki fazda serilip sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma, yol eksenine paralel olarak yapılmış ve düşük kotlu kenardan başlayarak eksene doğru kayan bir şablon takip edilmiştir. Yatay kurplarda ise, kurbun içinden başlanmış ve kurbun dışına doğru devam edilmiştir. Her geçişte bir önceki geçişte sıkıştırılan kısma, silindir tambur genişliğinin %10'u kadar bindirme yapılmıştır. Aliyman kısımlarının sıkıştırılmasında ise Şekil 1.17-19'da verilen sıkıştırma paternleri kullanılmıştır. AASHTO T238 prosedürüne göre, malzemenin sıkışma derecesi ve su muhtevası günlük imalatlar bazında kontrol edilmiş olup Tablo 3.8'de verilmiştir. Titreşimli tokmak metodu ile laboratuvarında daha önceden tespit edilen maksimum kuru birim ağırlığın ( $2402 \text{ kg/m}^3$ ) %98'i düzeyinde sıkışma sağlanmadan bir sonraki tabakaya geçilmemiştir.

Tablo 3.8. Sıkışma testi sonuçları

Gün No	Uygulama Tarihi	km	Nükleer Cihaz İle Ölçülen Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	Laboratuvarında Tespit Edilen Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	Rölatif Sıkışma Mertebesi
1	18.11.2016	0+120	2380	2402	99,08%
2	20.11.2016	0+300	2376	2402	98,92%
3	22.11.2016	0+450	2404	2402	100,08%
4	24.11.2016	0+650	2398	2402	99,83%
5	08.03.2017	0+780	2375	2402	98,88%
6	11.03.2017	1+000	2356	2402	98,08%
7	12.03.2017	1+060	2379	2402	99,04%
8	16.03.2017	1+300	2396	2402	99,75%
9	17.03.2017	1+360	2345	2402	97,63%
10	18.03.2017	1+700	2376	2402	98,92%
11	19.03.2017	1+800	2354	2402	98,00%
12	20.03.2017	2+090	2342	2402	97,50%
13	21.03.2017	2+200	2378	2402	99,00%

İki şerit arasındaki imalatın zaman farkı ortalama 0,5-1 saat arasında değişmektedir. Yapımdan itibaren 6 saat sonra arazöz ile su kürü uygulanmış ve 5 gün boyunca kürlenme devam etmiştir. Derzler ise yapımdan itibaren 1 gün sonra kesitin 1/3'ü

oranında ve 6 m aralıklarla elmas uçlu disk testere ile teşkil edilmiştir. Kaplama bir gün sonra hafif trafiğe açılmış ve herhangi bir segregasyon gözlemlenmemiştir. Ek C’de test yolu ile ilgili yapım süreçlerini gösterir resimler verilmiştir.

### 3.7. Laboratuvar Çalışmaları

Saha ve laboratuvar gibi iki farklı ortamdan elde edilen numunelerin, mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla kaplama gövdesinden numuneler alınmıştır. Bu sayede serme ve sıkıştırma etkisi, kür koşulları, boyut etkisi gibi faktörlerin görece mukayesesi amaçlanmıştır. Deney planlamasındaki hedeflerden biri de, sağ ve sol şerit olmak üzere iki fazda serilip sıkıştırılan kaplamanın orta bölgesinde meydana gelen soğuk derzden dolayı mekanik özellikler üzerinde oluşacak olan etkilerin tespit edilmesidir.

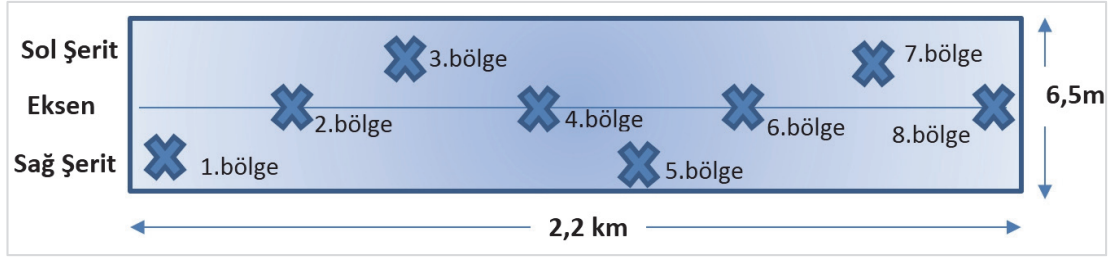
Bu amaçla yapımı tamamlanmış kaplamadan, 28 gün sonra 90 mm çapında silindir ve bir kenarı 70 mm olan küp numuneler alınmış, deneyler için uygun geometrik koşulların sağlanabilmesi için laboratuvar tipi disk testere kullanılmıştır (Şekil 3.7).

Kaplama gövdesinde 8 bölge belirlenerek (çift sayılar eksen), Şekil 3.8’de gösterildiği gibi bir doğrultu izlenmiş ve Tablo 3.9’da verilen sıra ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bölgeden 3 adet silindir, 1 adet küp numune olmak koşuluyla toplamda 24 adet silindir, 8 adet küp numune kesilerek çıkarılmıştır. Silindir numunelerde test sonuçları 3 adet numunenin ortalaması olarak verilmiştir.



Şekil 3.7. Numune alma ve deneye hazırlama





Şekil 3.8. Numune alma planlamasında belirlenmiş bölgeler

Tablo 3.9. Numune özellikleri ve uygulanan deneyler

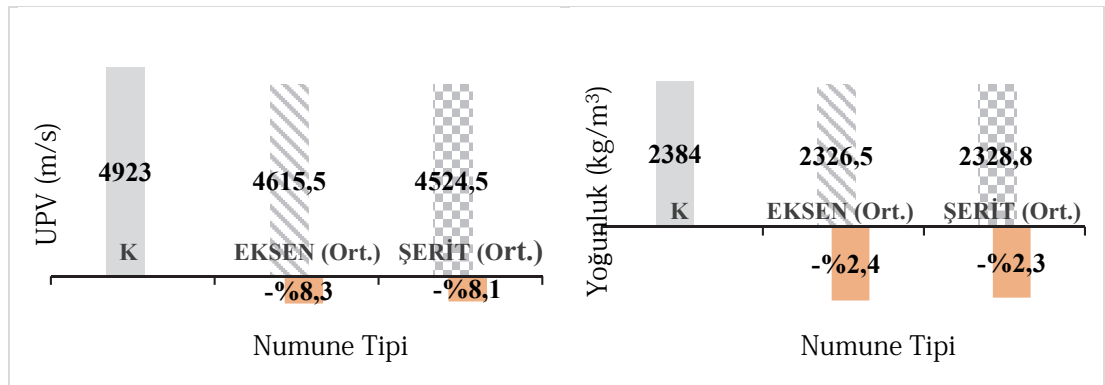
NUMUNE ÖZELLİKLERİ						UYGULANAN DENEYLER					
Bölge No	Kaplamanın Yapıldığı Tarih	km	Alındığı Yer	Tip	Boyut (mm)	UPV	Kılcalık	Yoğunluk, Su Emme ve Porozite	Basınç Deneyi	Yarmada Çekme Deneyi	Aşınma Direnci
1	18.11.2016	0+000	Sağ Şerit	Silindir	90 x 90	✓	✓	✓	✓		
			Sağ Şerit	Küp	70 x 70 x 70						✓
2	22.11.2016	0+400	Eksen	Silindir	90 x 90	✓	✓	✓	✓		
			Eksen	Küp	70 x 70 x 70						✓
3	11.03.2017	0+800	Sol Şerit	Silindir	90 x 90	✓	✓	✓	✓		
			Sol Şerit	Küp	70 x 70 x 70						✓
4	16.03.2017	1+200	Eksen	Silindir	90 x 90	✓	✓	✓	✓		
			Eksen	Küp	70 x 70 x 70						✓
5	18.03.2017	1+400	Sağ Şerit	Silindir	90 x 90	✓	✓	✓		✓	
			Sağ Şerit	Küp	70 x 70 x 70						✓
6	18.03.2017	1+600	Eksen	Silindir	90 x 90	✓	✓	✓		✓	
			Eksen	Küp	70 x 70 x 70						✓
7	19.03.2017	1+800	Sol Şerit	Silindir	90 x 90	✓	✓	✓		✓	
			Sol Şerit	Küp	70 x 70 x 70						✓
8	21.03.2017	2+200	Eksen	Silindir	90 x 90	✓	✓	✓		✓	
			Eksen	Küp	70 x 70 x 70						✓
K	LABORATUVAR			Silindir	90 x 90	✓	✓	✓	✓		
K	LABORATUVAR			Silindir	90 x 90	✓	✓	✓		✓	
K	LABORATUVAR			Küp	70 x 70 x 70						✓

### 3.7.1. Ultrasonik ses dalgası hızı

UPV değerlerinin hesaplanmasında silindir numunelerin karşılıklı yüzeylerinden 3 defa hız okuması yapılmış ve bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Dinamik Elastisite Modülü değeri için Denklem (2.2) kullanılmıştır. Test sonuçları, Tablo 3.10'da verilmektedir. UPV açısından şerit ve eksen bölgelerinden alınan numunelerde Laboratuvarda üretilen numunelere kıyasla, yaklaşık olarak %8,2 oranında azaltıcı bir etki tespit edilmiştir. Burada araziden alınan örneklerin daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Eksen ve şerit bölgelerinde ise anlamlı bir farklılık olmadığı görülmektedir. Benzer ilişki yoğunluk üzerindeki %2,3 oranındaki azaltıcı etki ile de görülmüştür (Şekil 3.9). Laboratuvar ve yapım metodolojisindeki %2'lik bu fark, kabul edilebilir bir sınır merteye olarak değerlendirilmektedir (ACI, 2011; PCA, 2004; Harrington ve diğ., 2010).

Tablo 3.10. UPV test sonuçları

No	Alındığı Yer	Boyut (mm)	UPV (m/s)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)
1	Sağ Şerit	90 x 90	4543	2342	0,202	43,4
2	Eksen	90 x 90	4564	2309	0,202	43,2
3	Sol Şerit	90 x 90	4557	2360	0,202	44,0
4	Eksen	90 x 90	4502	2379	0,202	43,3
5	Sağ Şerit	90 x 90	4113	2282	0,202	34,7
6	Eksen	90 x 90	4125	2289	0,202	35,0
7	Sol Şerit	90 x 90	4885	2331	0,202	49,9
8	Eksen	90 x 90	4875	2329	0,202	49,7
K	LABORATUVAR	90 x 90	4923	2384	0,202	51,9



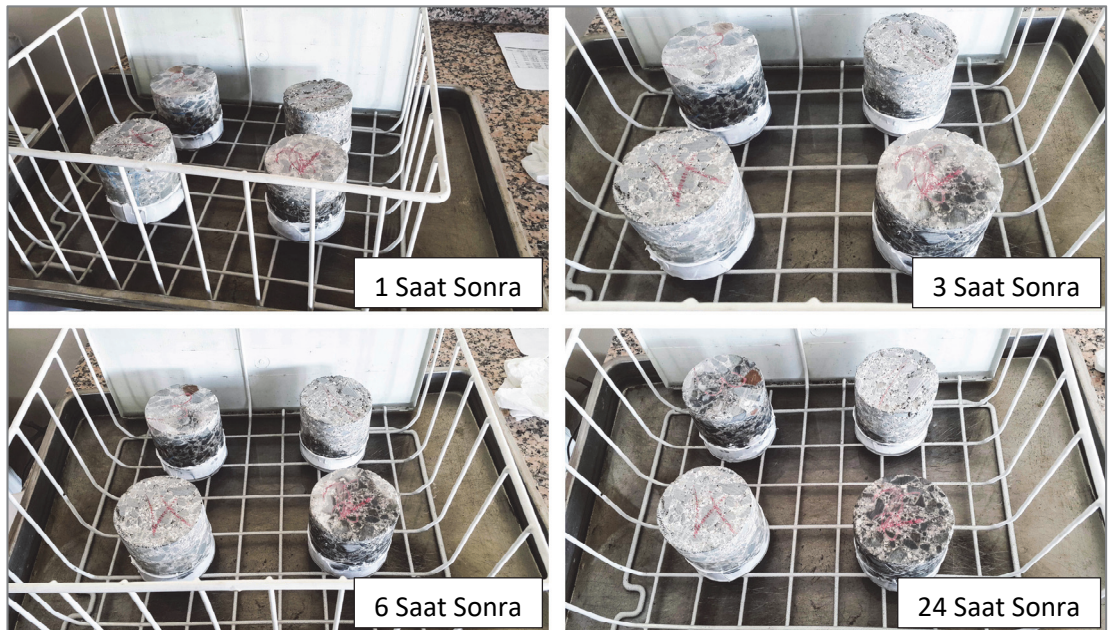
Şekil 3.9. Numunelerde UPV ve yoğunluk değişimi

### 3.7.2. Kılcallık (Kapilarite)

Kılcallık olayı, temas anından itibaren suyun zamanla beton içeriğindeki kılcal boşluklar vasıtasıyla iç bölgelere yayılması olarak ifade edilebilir ve bu yayılma zamanın bir fonksiyonu şeklinde ifade edilebilir. ASTM C1585 standardına göre kılcallık deneyi, 100 mm çap ve 50 mm yüksekliğinde olan silindirik numunelere uygulanmaktadır.

Silindirik örnekler uygun geometrik koşullara getirildikten sonra bir desikatörün içinde 3 gün boyunca 50 °C'lik bir etüvde bekletilmiştir. Bu periyodun sonunda, desikatörden çıkarılan numuneler 15 gün boyunca laboratuvar şartlarında (25 °C) açık havada bekletilmiştir. Numune çapı dört farklı noktadan 0,1 mm hassasiyetle ölçülerek kaydedilmiştir. Numune yan yüzeylerine sıvı geçişi olmaması için silikon uygulaması ile su yalıtımı sağlanmış ve bu aşamadan sonra ilk ağırlıklar 0,01 g hassasiyetli teraziyile belirlenerek kaydedilmiştir.

Su işleme derinliğinin zamana bağlı değişimini tespit edebilmek amacıyla, üst seviyesine kadar (yaklaşık 3 mm) 23 °C su ile dolu olan plastik ızgaralı bir tepsi kullanılmıştır (Şekil 3.10). Numuneler, su ile temas anından itibaren 1., 5., 10., 20., 30. dakika, 1., 2., 3., 4., 5., 6. saat ve 1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., 8. günlerde tepside alınarak ağırlık artışları tespit edilmiştir. Periyodik tartımlar yapılırken, ızgara üzerinden alınan numunelerin alt yüzeylerindeki serbest sular kâğıt bir havlu ile kurulanmıştır.



Şekil 3.10. Su ile temas anından itibaren gelişen kılcallık olayı

Su işleme derinliğinin hesaplanmasında Denklem (3.2)'de verilen eşitlikten faydalanılmıştır;

$$I = \frac{\Delta m}{a \times \rho} \quad (3.2)$$

Burada,

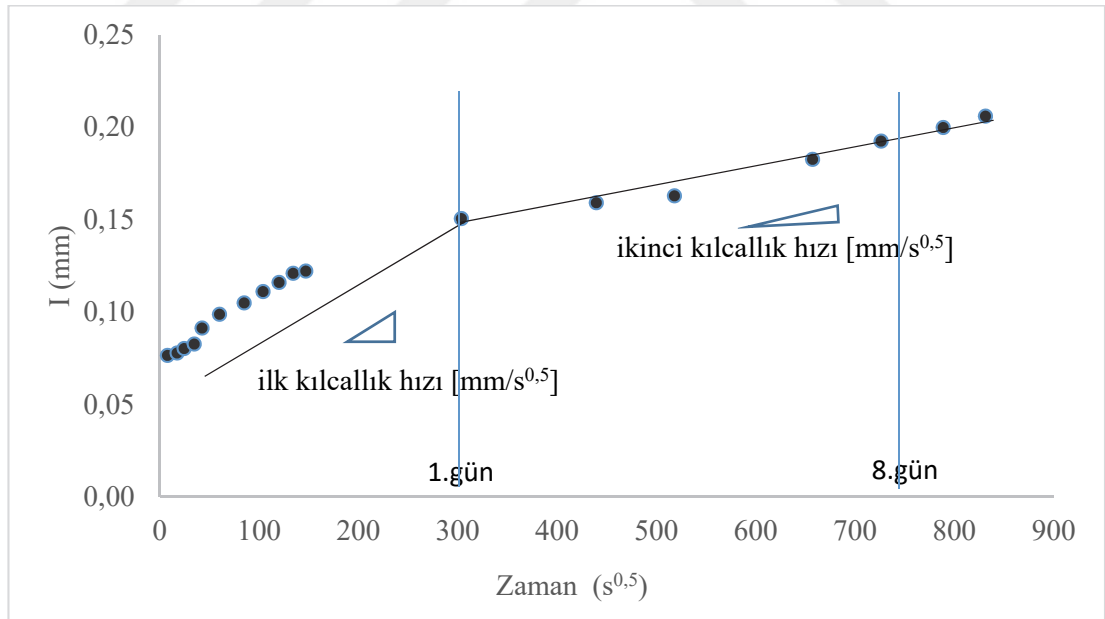
I : Su işleme derinliği (mm)

$\Delta m$  : Ağırlık farkı (g)

a : Numune temas alanı (mm<sup>2</sup>)

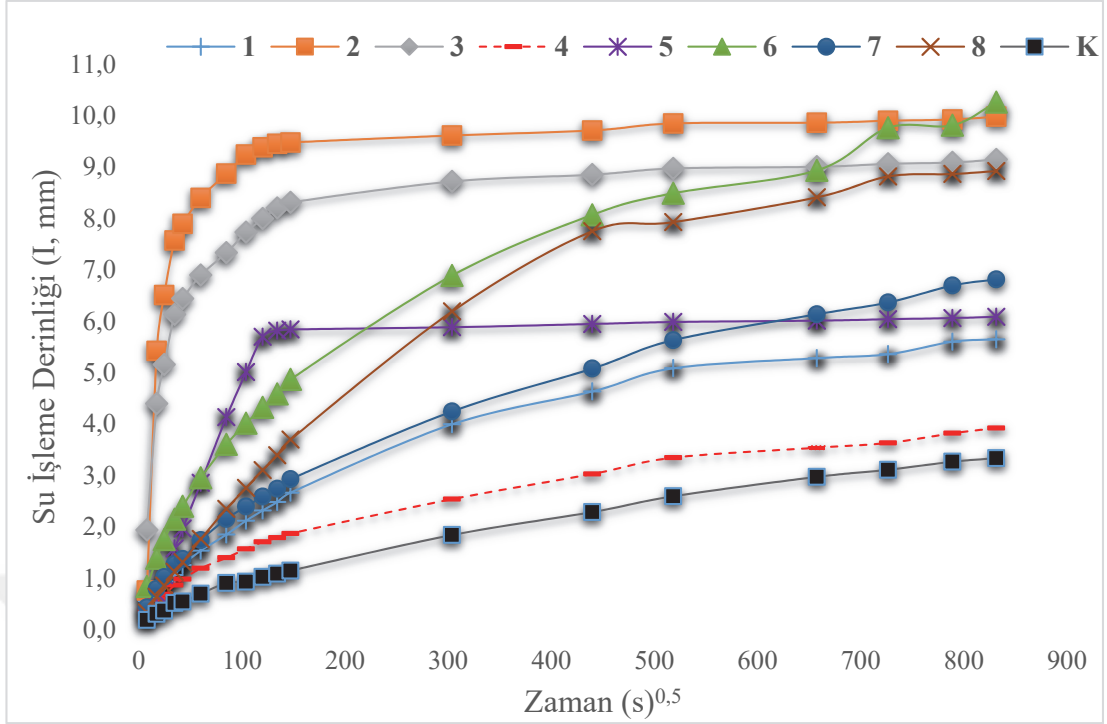
$\rho$  : Suyun yoğunluğu (g/mm<sup>3</sup>)

Su işleme derinliğinin zamana bağlı değişimi tipik olarak Şekil 3.11'de verilmiştir. Elde edilen bu grafik yardımıyla 1. gün sonuna kadar olan doğrunun eğimi ile ilk kılcallık hızı (initial sorptivity rate, [mm/s<sup>0,5</sup>]) ve 1. ile 8. gün arasında kalan doğrunun eğimi ile de ikinci kılcallık hızı (secondary sorptivity rate, [mm/s<sup>0,5</sup>]) değerleri hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.11. Su işleme derinliğinin zamana bağlı değişimi

Kılcallık deneyinde (s<sup>0,5</sup>) cinsinden zamana bağlı ölçülen su işleme derinliği değerleri EK D, Tablo D.1'de verilmiştir. 8 günlük su işleme derinliğinin zamana bağlı değişimi ise Şekil 3.12'de verilmektedir.

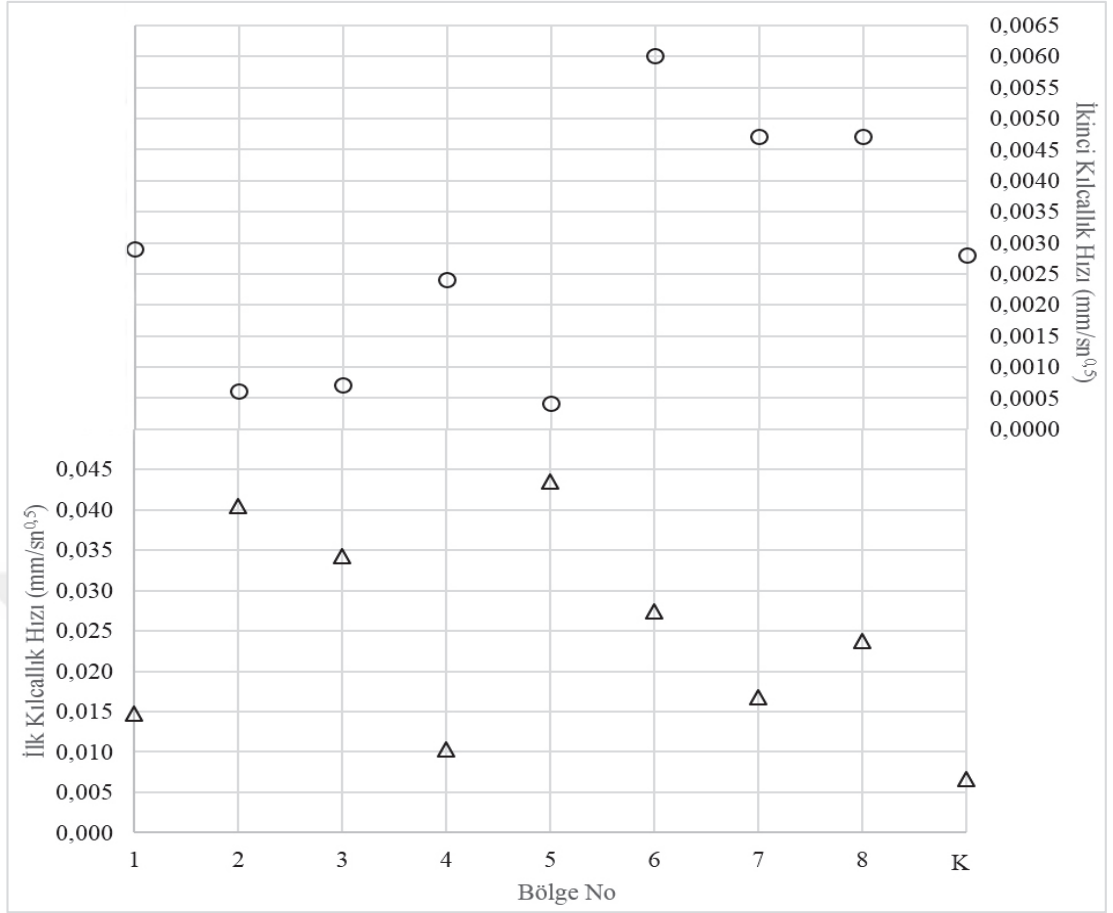


Şekil 3.12. Numunelere su işleme derinliğinin zamana bağlı değişimi

0-1 ve 1-8 günler arasında kalan doğru denklemleri kullanılarak, sırasıyla birinci ve ikinci kılcallık hızı ( $\text{mm/s}^{0,5}$ ) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 3.11). Tespit edilen kılcallık hızları, Şekil 3.13'te grafik şeklinde gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Kılcallık hızı tespitinde kullanılan doğru denklemleri

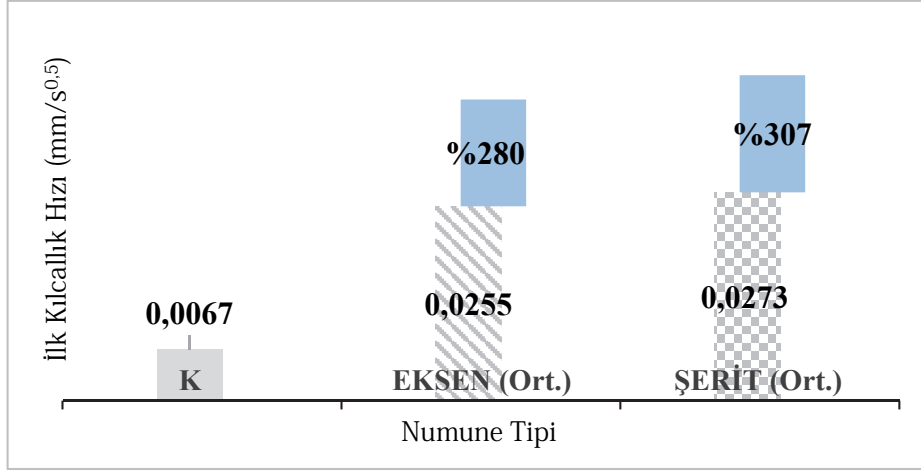
No	1. kılcallık hızı denklemi ( $\text{mm/s}^{0,5}$ )	2. kılcallık hızı denklemi ( $\text{mm/s}^{0,5}$ )
1	$y = 0,0147x + 0,5635$ ( $R^2=0,99$ )	$y = 0,0029x + 3,3007$ ( $R^2 = 0,93$ )
2	$y = 0,0405x + 4,6851$ ( $R^2 = 0,59$ )	$y = 0,0006x + 9,4493$ ( $R^2 = 0,93$ )
3	$y = 0,0342x + 4,0037$ ( $R^2 = 0,76$ )	$y = 0,0007x + 8,5277$ ( $R^2 = 0,95$ )
4	$y = 0,0103x + 0,4578$ ( $R^2 = 0,97$ )	$y = 0,0024x + 1,9183$ ( $R^2 = 0,96$ )
5	$y = 0,0435x + 0,1024$ ( $R^2 = 0,98$ )	$y = 0,0004x + 5,7858$ ( $R^2 = 0,98$ )
6	$y = 0,0274x + 1,0525$ ( $R^2 = 0,97$ )	$y = 0,006x + 5,253$ ( $R^2 = 0,97$ )
7	$y = 0,0168x + 0,5795$ ( $R^2 = 0,97$ )	$y = 0,0047x + 2,9648$ ( $R^2 = 0,98$ )
8	$y = 0,0237x + 0,2676$ ( $R^2 = 0,99$ )	$y = 0,0047x + 5,2498$ ( $R^2 = 0,89$ )
K	$y = 0,0067x + 0,2315$ ( $R^2 = 0,97$ )	$y = 0,0028x + 1,0468$ ( $R^2 = 0,99$ )



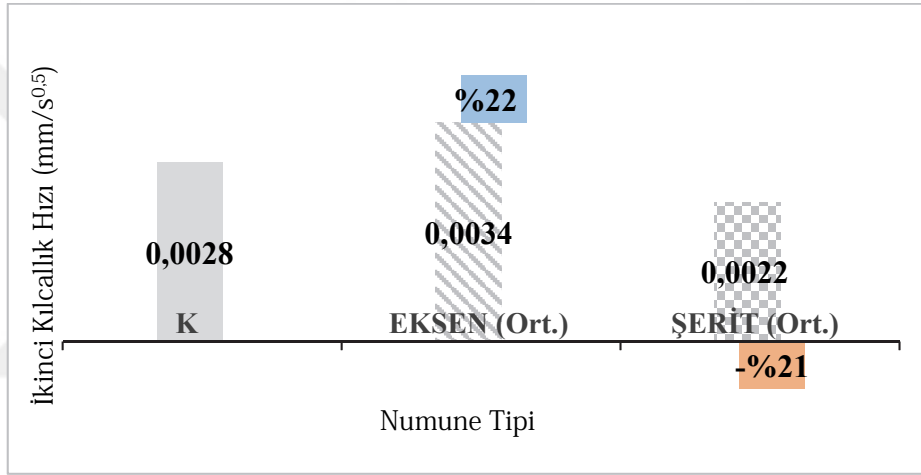
Şekil 3.13. Numunelerde kılcallık hızı değişimi

Sahadan alınan örnekler incelendiğinde, en yüksek ilk kılcallık hızı  $0,0435 \text{ mm/s}^{0,5}$  ile 5 nolu numunede, en düşük ilk kılcallık hızı ise  $0,0103 \text{ mm/s}^{0,5}$  ile 4 nolu numunede tespit edilmiştir. Ortalamada ise,  $0,0242 \text{ mm/s}^{0,5}$  düzeyinde ilk kılcallık hızı hesaplanmıştır. İkinci kılcallık hızında ise en yüksek değer 6 nolu numunede  $0,006 \text{ mm/s}^{0,5}$ , en düşük değer ise 5 nolu numunede  $0,0004 \text{ mm/s}^{0,5}$  düzeyinde gerçekleşmiştir. Ortalamada ise  $0,0028 \text{ mm/s}^{0,5}$  düzeyinde ikinci kılcallık hızı saptanmıştır.

Laboratuvar ortamında üretilen SSB numunelerinin ilk kılcallık hızınının  $0,0067 \text{ mm/s}^{0,5}$  ile eksen ve şerit bölgelerinden alınan numunelere kıyasla %280-307 oranında daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3.14). Numunelerdeki zamana bağlı doyumluk dereceleri arttıkça 1. gün sonundan itibaren bu seviyeler azalma eğilimine geçmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.14. Numunelerde ilk kılcallık hızı değişimi



Şekil 3.15. Numunelerde ikinci kılcallık hızı değişimi

Hazaree (2007)'e göre, farklı çimento seviyeleri ile Laboratuvarda üretilen SSB numunelerinde ilk kılcallık hızının 0,01-0,002 mm/s<sup>0,5</sup> arasında değiştiği belirlenmiş ve kompaksiyon karakteristiğine ve kür koşullarına göre bu seviyelerin değişebileceği bildirilmiştir. Çimento düzeyinin 300 kg/m<sup>3</sup> ve s/ç oranının 0,60 olarak seçildiği başka bir geleneksel beton karışımında ise, ilk kılcallık hızı 0,0153 mm/s<sup>0,5</sup> olarak tespit edilmiş ve farklı kür koşullarının kılcallık üzerinde %300 seviyesine kadar etkisinin olabileceği bildirilmiştir (Taşdemir, 2003).

Bu çalışmalarla kıyaslandığında, Laboratuvarda elde edilen SSB numunelerinin geleneksel betona göre daha düşük kılcallık özelliği gösterdiği, ancak kür koşullarının ve sıkıştırma parametrelerinin arazi koşulları ile değişmesi sonucunda sahadan elde edilen SSB numunelerinde ciddi oranlarda kılcallık artışları gözlemlenebileceği tespit edilmiştir.

### 3.7.3. Yoğunluk, su emme ve porozite

Yöntem sertleşmiş betonda yoğunluk, su emme ve porozitenin tespitini kapsamaktadır. Standarda göre test edilen numune hacmi 350 cm<sup>3</sup>'ten az olmamalıdır (ASTM C642).

Deney, sırasıyla yapılan dört ağırlık tartımından oluşmaktadır;

- 24 saat süreyle 110 °C'lik bir etüvde kurumaya bırakılan numune, bu sürecin sonunda etüvden çıkarılarak soğumaya bırakılır ve 20-25 °C'de tartılır. İki tartım arasındaki fark %0,5'i geçmiyor ise ilk tartım kaydedilir (A: Fırın Kuru Kütle, g).
- 48 saat süreyle 21 °C'lik su içerisine daldırılan numuneler, bu sürecin sonunda, sudan çıkarılıp temiz bir havlu ile kurularak ağırlıkları kaydedilir (B: Doygun Kütle, g).
- İkinci aşama tamamlandıktan sonra numuneler 5 saat boyunca kaynayan bir suda şartlandırılır. Bu sürecin sonunda kaynayan sudan çıkarılan numuneler denge sıcaklığına (20-25 °C) gelene kadar 14 saat süreyle açık havada bekletilir ve bu süreç sonunda tartılır (C: Kaynatmadan Sonraki Doygun Kütle, g).
- Numuneler su içerisinde Arşimet prensibine göre tartılarak ağırlıkları kaydedilir (D: Su İçerisindeki Kütle, g).

$\rho$  : Suyun yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>) olmak üzere,

$$\text{Doğal halde kütlece su emme; \% [(B-A)/A] x 100 \quad (3.3)}$$

$$\text{Kaynatmadan sonraki kütlece su emme; \% [(C-A)/A] x 100 \quad (3.4)}$$

$$\text{Kuru yoğunluk; g/cm}^3 [A/(C-D)].\rho \quad (3.5)$$

$$\text{Doygun haldeki yoğunluk; g/cm}^3 [B/(C-D)].\rho \quad (3.6)$$

$$\text{Kaynatmadan sonraki doymuş yoğunluk; g/cm}^3 [C/(C-D)].\rho \quad (3.7)$$

$$\text{Zahiri yoğunluk; g/cm}^3 [A/(A-D)].\rho \quad (3.8)$$

$$\text{Porozite; \% [(C-A)/(C-D)] x 100 \quad (3.9)}$$

Deney sonuçları Tablo 3.12'de verilmiştir.

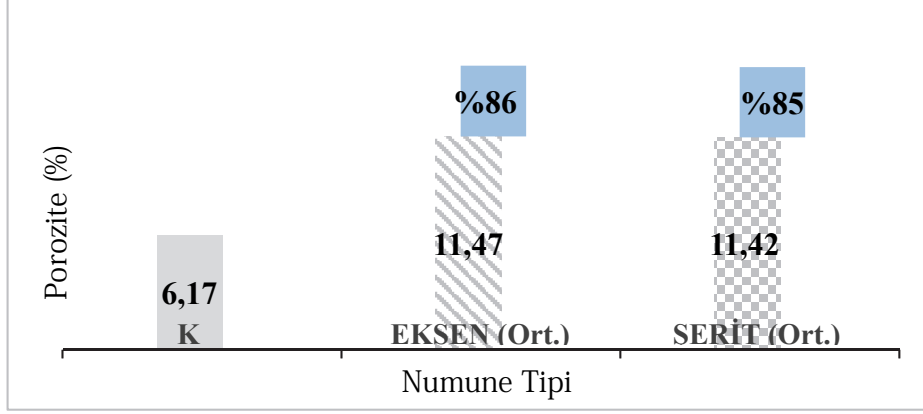


Tablo 3.12. Yoğunluk, su emme ve porozite deney sonuçları

No	Fırın kuru kütle, g	Doğru kütle, g	Kaynatmadan sonraki doğru kütle, g	Su içerisindeki kütle, g	Doğru halde kütlece su emme, %	Kaynatmadan sonraki kütlece su emme, %	Kuru yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Doğru haldeki yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Kaynatmadan sonraki yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Zahiri yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Porozite, %
	A										
1	1328,58	1361,80	1388,57	821,20	2,50	4,52	2,342	2,400	2,447	2,619	10,57
2	1335,48	1386,68	1406,39	828,00	3,83	5,31	2,309	2,397	2,432	2,632	12,26
3	1399,14	1443,33	1464,42	871,47	3,16	4,67	2,360	2,434	2,470	2,652	11,01
4	1431,35	1463,35	1487,32	885,65	2,24	3,91	2,379	2,432	2,472	2,623	9,30
5	1375,06	1431,06	1452,52	849,98	4,07	5,63	2,282	2,375	2,411	2,619	12,86
6	1363,27	1411,00	1438,80	843,20	3,50	5,54	2,289	2,369	2,416	2,621	12,68
7	1428,50	1470,87	1497,33	884,44	2,97	4,82	2,331	2,400	2,443	2,626	11,23
8	1419,63	1465,52	1490,46	880,90	3,23	4,99	2,329	2,404	2,445	2,635	11,62
K	1444,04	1469,03	1481,43	875,62	1,73	2,59	2,384	2,425	2,445	2,540	6,17

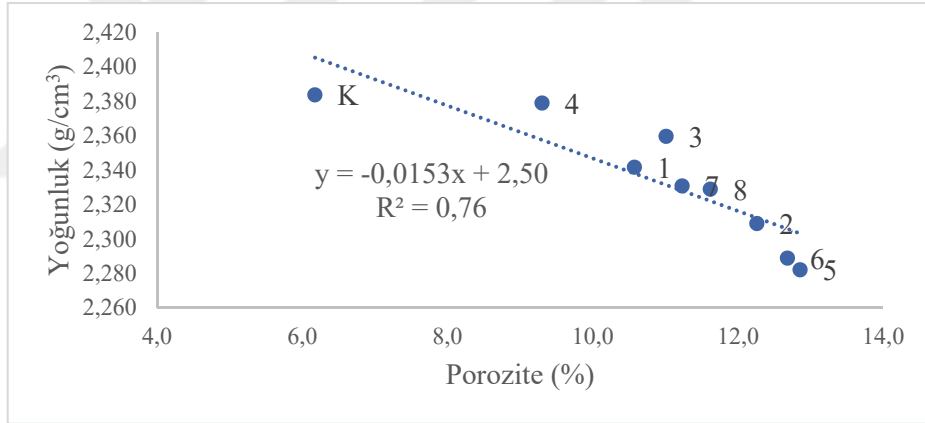
Sahadan alınan ve laboratuvarında üretilen numunelerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, doğru halde kütlece su emme %1,73 ile %4,07 arasında, kaynatmadan sonra ise %2,59 ile %5,63 arasında değişmektedir. Numunelerin kaynayan suda şartlandırılması, geçirgen boşluklarda su işleme derinliğini %1-2 oranında artırmıştır. Sertleşmiş betonda bu seviyelerdeki su emme oranlarının durabilite açısından “iyi” sayılabilecek bir düzeyde olduğu kabul edilmektedir (<%3: Çok iyi, 3-5%: İyi, >%5: Zayıf) (CEB, 1989).

Porozitenin %6,17 ile %12,86 arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlar ile, SSB karışımlarında geçirimsizlik özelliklerinin araştırıldığı diğer çalışmalarla benzer sonuçlar elde edilmiştir (Hazaree, 2007; Lopez-Uceda, 2016; Mardani-Aghabaglou ve diğ., 2013). Sahadan alınan numunelerde %85-86 düzeyinde daha fazla geçirgen boşluk tespit edilmiştir (Şekil 3.16). Burada iki farklı numune grubunda farklı sıkıştırma tekniğinin kullanılması ve tek tabakada farklı kalınlıklarda numune sıkıştırılmasının etkisi görülmektedir.

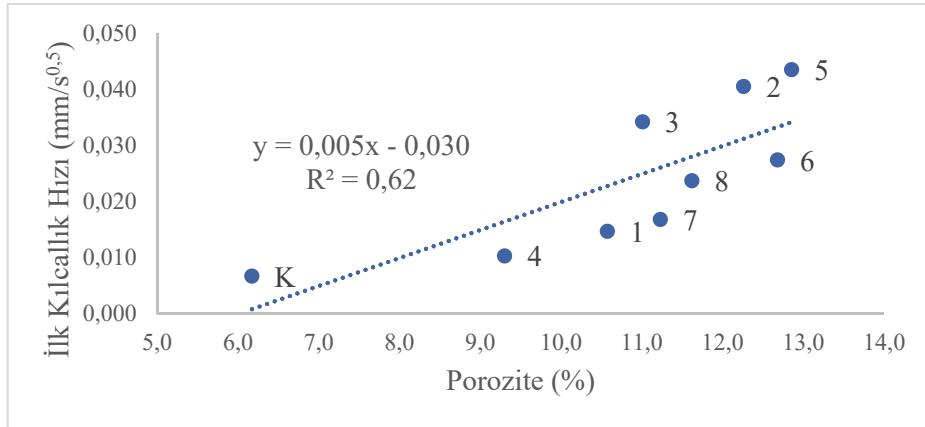


Şekil 3.16. Numunelerde porozite değişimi

Porozitenin, yoğunluk ve ilk kılcılık hızı ile olan değişimi sırasıyla Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de verilmiştir. Burada porozitenin artmasıyla yoğunluk düşmekte ( $R^2=0,76$ ), ilk kılcılık hızı ise artmaktadır ( $R^2=0,62$ ). Geçirgen boşlukların zamanla suyla dolması süreci ile ikinci kılcılık hızında porozite ile olan bu ilişkinin kaybolduğu gözlenmiştir.

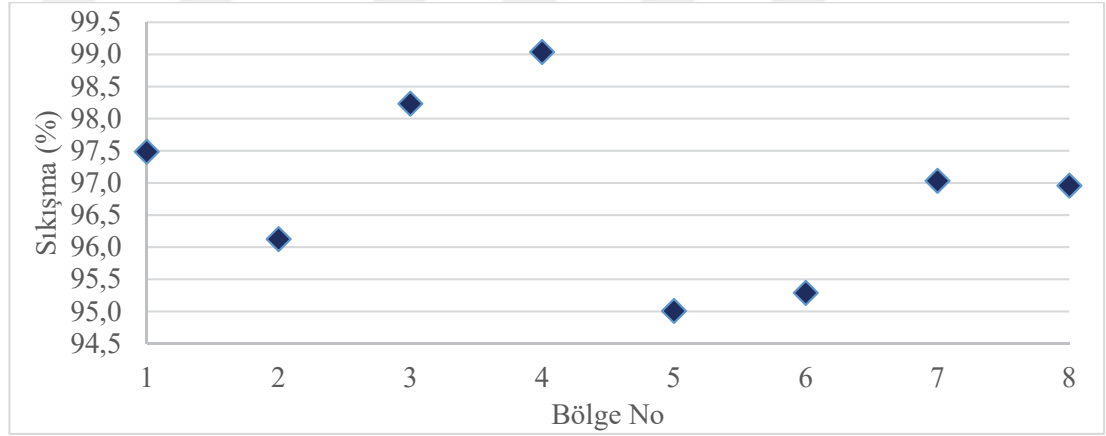


Şekil 3.17. Porozitenin yoğunluk ile değişimi



Şekil 3.18. Porozitenin ilk kılcılık hızı ile değişimi

Sahadan alınan numunelerde kuru yoğunluk ortalama  $2,327 \text{ g/cm}^3$  seviyesindedir. Bölgeler düzeyinde tespit edilen yoğunlukların Bölüm 2’de laboratuvarda titreşimli tokmak ile elde edilen kuru birim ağırlığa ( $2402 \text{ kg/m}^3$ ) oranlanmasıyla elde edilen rölatif sıkışma düzeyleri Şekil 3.19’da verilmiştir. Üstyapı kaplamalarında yerinden kesilerek alınan karot örnekler için tek değerde % 96, ortalama ise % 97-98 aralığında sıkışma düzeyi sağlanmasının yeterli olabileceği belirtilmektedir (KTŞ, 2013). Şekil 3.19’a göre 5. ve 6. bölgelerde sıkışma düzeyinin %96’nın altında olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar nükleer cihazla taze betonda yerinde sıkışma kontrollerinin sağlıklı bir şekilde tespit edilebilmesine karşın, bölgesel farklılıklar nedeniyle aynı noktayı temsil etme konusunda iki test metodunun karşılaştırılmasının her zaman mümkün olmayabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.19. Yoğunluğa göre sıkışma yüzdesi değişimi

#### 3.7.4. Basınç ve yarmada çekme dayanımı

Silindirik numunelere EN 12390-3’e uygun basınç dayanımı ve EN 12390-6’ya uygun yarmada çekme dayanımı testleri uygulanmıştır. Karot örneklerin yüzeyleri aşındırma kullanılarak düzeltilmiştir. Basınç dayanımının tespitinde 2000 kN, yarmada çekme dayanımının tespitinde ise 200 kN’luk test presi kullanılmıştır. Test sonuçları Şekil 3.13’te verilmektedir.

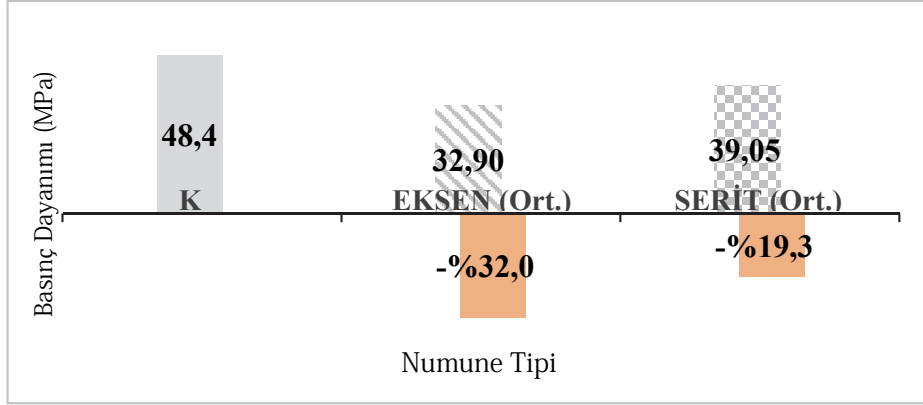
Tablo 3.13. Basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları

No	Alındığı Yer	Boyut (mm)	Basınç Dayanımı (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
1	Sağ Şerit	90 x 90	38,6	-
2	Eksen	90 x 90	34,5	-
3	Sol Şerit	90 x 90	39,5	-
4	Eksen	90 x 90	31,3	-
5	Sağ Şerit	90 x 90	-	3,7
6	Eksen	90 x 90	-	3,1
7	Sol Şerit	90 x 90	-	3,9
8	Eksen	90 x 90	-	2,8
K	LABORATUVAR	90 x 90	48,4	4,2

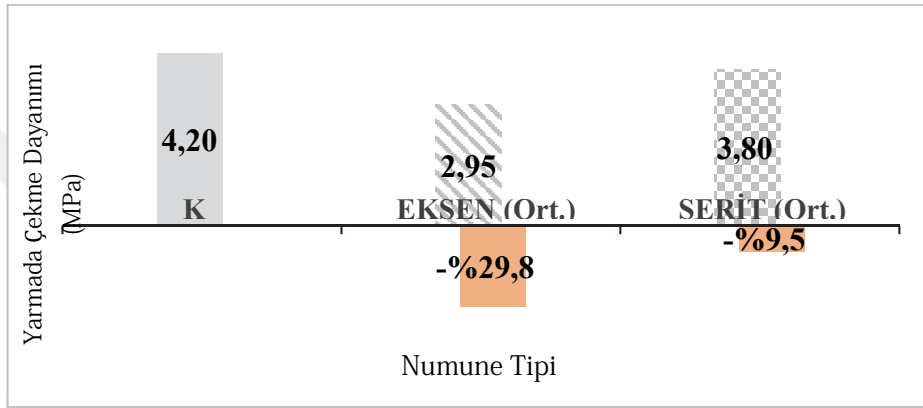
BYŞ (2016)'ya göre C30 sınıfındaki bir yol betonu için, basınç dayanımında ard arda gelen 4 numune test sonucunun 34 MPa'dan ve herhangi bir değer de 26 MPa'dan büyük olması gerekmektedir. Yarmada çekme dayanımında ise ard arda gelen 4 numune ortalamasının 3,5 MPa'dan ve herhangi bir değer de 2,5 MPa'dan büyük olmasının gerektiği bildirilmiştir. Kaplama gövdesinden alınan numunelerde ortalama basınç dayanımında 36 MPa (en düşük 31,3 MPa) ve ortalama yarmada çekme dayanımında 3,4 MPa (en düşük 2,8 MPa) düzeyinin tespit edilmesi ile C30 sınıfı bir beton için uygun seviyelerin elde edildiği anlaşılmaktadır.

Kaplamadan alınan numunelerin laboratuvarda üretilen numunelerle kıyaslanması durumunda, basınç dayanımında eksen bölgelerinde %32 ve şerit bölgelerinde %19 düzeyinde azaltıcı bir etki tespit edilmiştir. Bu oran yarmada çekme dayanımında sırasıyla %30 ve %9,5 seviyesindedir (Şekil 3.20,21). SSB karışımlarında saha ve laboratuvar koşullarında hazırlanan kiriş numuneleri üzerinde yapılan başka bir çalışmada bu azaltıcı etki düzeyi, %20 olarak bildirilmiştir (Şengün ve diğ.,). Test yolundan alınan numunelere ait deney sonuçlarının daha düşük olmasında, iki örnek arasında kür koşulları, sıkıştırma enerjisi, sıkıştırma tipi ve tek seferde sıkıştırılan malzeme miktarlarının farklı olmasının etkili olduğu anlaşılmaktadır.

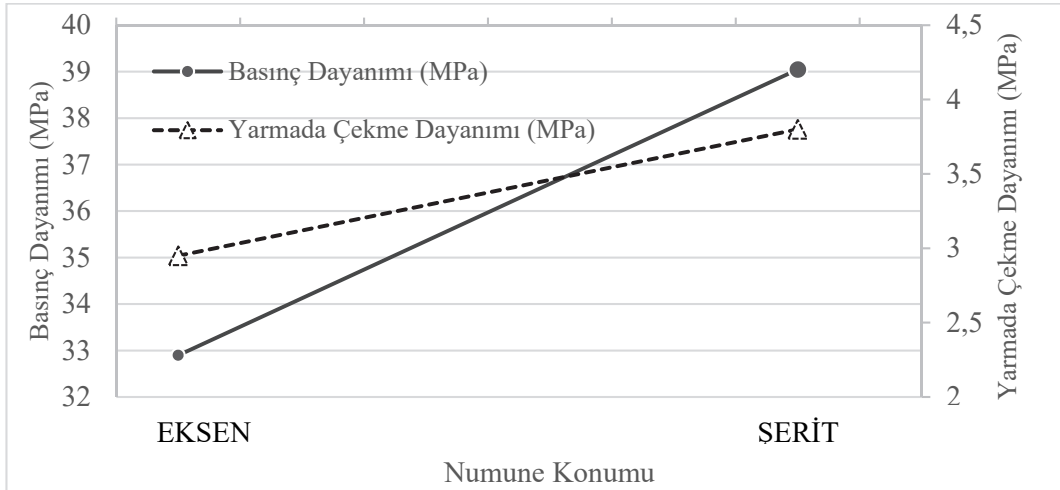
Şerit ve eksen bölgelerinde mekanik özelliklerin rölatif olarak değişimi Şekil 3.22'de gösterilmektedir. Eksen bölgelerinden alınan numunelerin dayanım mertebelerinin şerit bölgelerinden alınanlardan daha düşük olması, iki fazda yapılan şerit imalatları arasında oluşan zaman farkından dolayı meydana gelen soğuk derz ve buna dayalı yapısal süreksizliklerle açıklanabilir. Soğuk derze bağlı düşey faylanma, imalat zaman farkları ve farklı kompaksiyon enerjisinin bu duruma neden olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.20. Numunelerde basınç dayanımı değişimi



Şekil 3.21. Numunelerde yarmada çekme dayanımı değişimi



Şekil 3.22. Basınç ve çekme dayanımının numune konumuna göre değişimi

### 3.7.5. Aşınma direnci

Beton kaplamalarda aşınma kaybı, EN 1338 standardında Böhme cihazı yardımıyla numune hacmindeki azalma olarak tayin edilebilmektedir. Numune,  $(110 \pm 5)$  °C'de

sabit kütleye kadar kurutulur ve yoğunluğu tayin edilir. Deney izine 20 g standart aşındırıcı olarak erimiş alüminyum (suni korundum) konur. Numuneye, her biri 22 dönüşten meydana gelen 16 çevrim uygulanır. 16 çevrim sonunda aşınma miktarı, numune hacmindeki azalma ( $\Delta V$ ) olarak aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanır;

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho r} \quad (3.10)$$

Burada,

$\Delta V$  : 16 çevrimden sonra hacim kaybı, ( $\text{cm}^3$ )

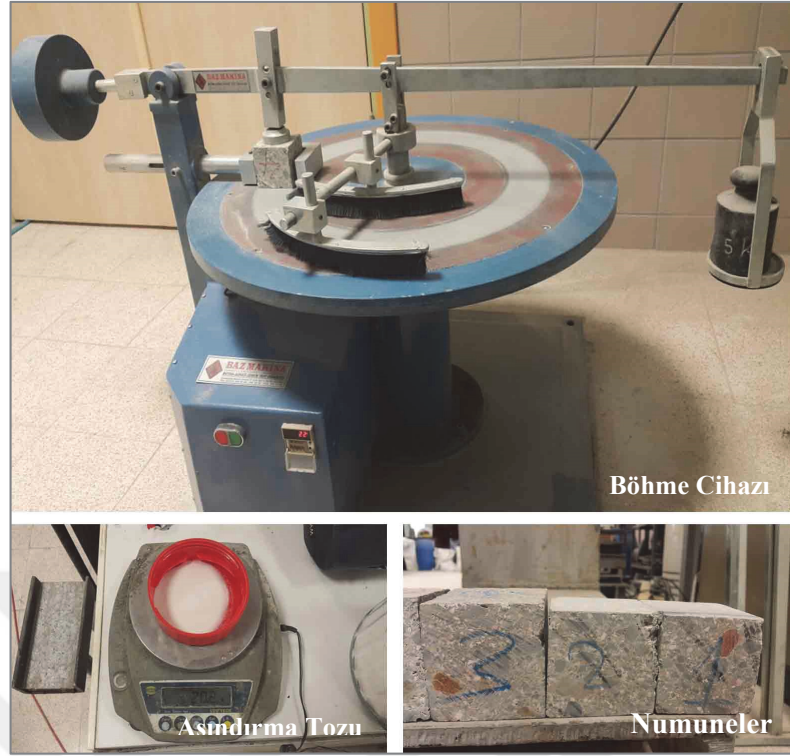
$\Delta m$  : 16 çevrimden sonra kütle kaybı, (g)

$\rho r$  : Numunenin kuru yoğunluğu, ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Test yolu gövdesinden daha önce belirlenmiş 8 bölgeden prizmatik numuneler alınmış ve disk testere ile 70 x 70 x 70 mm olan deney boyutlarına getirilmiştir. Kaplama doğal yüzeyleri, aşındırma deney yüzeyi olarak seçilmiştir. Laboratuvarda üretilen numuneler ise standart silindir numunelerden aynı boyutlarda kesilerek elde edilmiştir. Deneyde kullanılan Böhme cihazı, aşındırma işleminde kullanılan toz ve aşınmış haldeki numuneler Şekil 3.23'te görülmektedir.

Tablo 3.14'e göre, kaplamadan alınan numunelerde aşınan hacim miktarı  $49 \text{ cm}^2$ 'lik yüzeyde  $21,60$  ile  $26,40 \text{ cm}^3$  arasında değişmektedir. Ortalamada  $23,50 \text{ cm}^3$  olan aşınma değeri, EN 1338'de belirtilen minimum 3. Sınıf aşınmaya karşı direnç kategorisi olan  $20 \text{ cm}^3$  değerine yakındır. Laboratuvar ortamında üretilen ve yüzeyleri kesilerek test edilen numunelerde ise 2. Sınıf aşınma direnci,  $18,13 \text{ cm}^3$  ile sağlanmıştır.

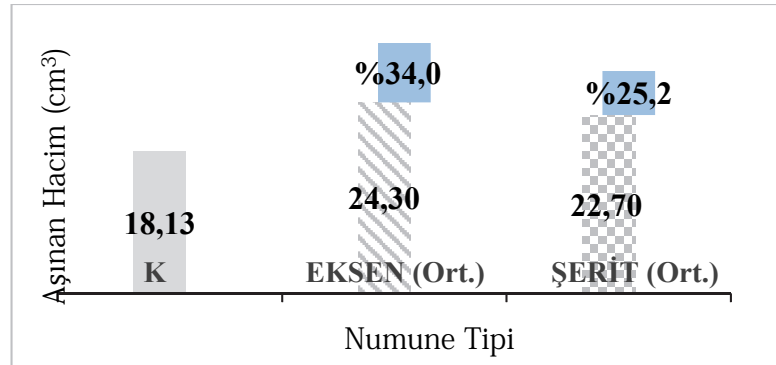
Test yolunda %25-34 arasında değişen oranlarda daha yüksek aşınma kayıplarının yaşandığı görülmektedir (Şekil 3.24). Son bitirme işlemi ve farklı kür koşullarının aşınma direnci üzerinde etkili olduğu bildirilmiştir (Fentress, 1973). Kaplamalarda arazöz ile kütleme dışında başka bir metot uygulandığı takdirde (kimyasal püskürtme, sisleme, telis bezi serme vb.), yüzeyde daha sert bir doku oluşması bu vesileyle de aşınma direncinin artabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.23. Böhme cihazı ve ekipmanları ile test numuneleri

Tablo 3.14. Böhme aşındırma deneyi sonuçları

Bölge No	İlk Ağırlık (g)	16 Çevrimden Sonraki Ağırlık (g)	Fark Ağırlık (g)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Aşınan Hacim (cm <sup>3</sup> )
	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	Δm	ρ <sub>r</sub>	ΔV
1	799,25	743,04	56,21	2,342	24,00
2	856,49	803,38	53,11	2,309	23,00
3	854,58	801,01	53,57	2,360	22,70
4	801,60	745,69	55,91	2,379	23,50
5	787,65	736,31	51,34	2,282	22,50
6	798,25	737,82	60,43	2,289	26,40
7	815,56	765,21	50,35	2,331	21,60
8	827,13	770,54	56,59	2,329	24,30
K	865,34	822,12	43,22	2,384	18,13



Şekil 3.24. Numunelerde aşınma direnci değişimi

#### **4. YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYET ANALİZİ**

Bu bölümde Kocaeli İli'nde ilk defa uygulaması yapılan 2,2 km'lik SSB yol için bir yaşam döngüsü maliyet analizi yapılarak, kaplama yapımı stratejilerinde tercihin asfalt yerine SSB olması durumunda ortaya çıkacak olan ekonomik göstergeler Kocaeli ili özelinde tartışılmıştır. SSB yol için 20 yıllık hizmet süresi boyunca bakım, onarım ve rehabilitasyon planlaması 30 yıllık bir analiz süresi baz alınarak yapılmış, ekonomik parametrelerin belirlenmesinde KBB'nin 5 yıllık stratejik plan ölçeğinde karayolu yapım ve onarımı için yaptığı harcamalar temel alınmıştır.

##### **4.1. İdeal Kaplama Tipinin Seçilmesi**

Kaplama tipi seçimi, otoritelerin karşılaştığı zorlu ve tartışmalı kararlardan biridir (Wathne, 2014). Bu süreç, başlangıç ve yaşam döngüsü maliyetleri kapsamında malzeme, işçilik ve uzun vadeli performans gibi mühendislik faktörlerini içermektedir. Yol yapımı ve rehabilitasyonuna yapılan önemli kamu harcamaları göz önüne alındığında, son yıllarda artan ihtiyaçlar, araç sahipliklerindeki yükselen trend ve kaynakların giderek azalması gibi nedenler, kaplama tipi seçim sürecinin öz sermayesi ve verimliliği hakkında duyulan endişeleri gün yüzüne çıkarmıştır. Vergi mükellefi olan halkın, karayolu harcamalarının tam değerini anlayabilmesini sağlamak için, mümkün olan en uygun yapım, bakım ve onarım stratejilerini içermeye çalışan bir kaplama tipi seçim sürecinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu süreç, kaplama tasarımı eşdeğerliliğinin belirlenmesi, yaşam döngüsü maliyet analizi, şeffaflık ve en önemlisi üstyapı otoriteleri (beton ve asfalt yol) arasındaki sağlıklı rekabetin ortaya çıkaracağı faydalar açısından önem taşımaktadır (Wathne, 2014).

Kaplama tipi seçimi ile ilgili en eski yayınlardan biri, 1960 yılında AASHO tarafından yayımlanmıştır. "Bilgilendirici Proje Prosedürleri Rehberi" adını taşıyan bu belge, ulaşım mühendisleri ve diğer yetkililerin seçilen kaplama türleri hakkında bilinçli ve şeffaf kararlar vermelerine yardımcı olması amacıyla zamanla geliştirilmiştir.



Bu belge, eyalet karayollarının ulus sisteminin inşasına olanak sağlayan ciddi kamu yatırımlarını içermesi nedeniyle önemli sayılmıştır. Kılavuzda, kapsamlı ve gerçekçi bir değerlendirme prosedürünün geliştirilebilmesi için, bir dizi önkoşulun sağlanması gerektiği vurgulanmıştır (AASHO, 1960);

- Benzer trafik ve hava koşullarında karşılaştırılabilir bir hizmet sunabilmek için, rijit ve esnek üstyapılar için geliştirilmiş tasarım yöntemlerinin iyi analiz edilmesi,
- Kaplama türünün bakım masrafları da dahil olmak üzere güvenilir maliyet muhasebesi verilerinin mevcudiyeti,
- 1950'lerin sonunda yapılan yol testleri ile ilgili kaplama performansı ve uygulanan yüklerin daha iyi anlaşılması.

Rehberde üstyapı tasarımcılarının aşına oldukları trafik, zemin parametreleri, hava durumu, geçmiş kaplama performansı ve fayda/maliyet karşılaştırmaları gibi özellikler bulunmaktadır. Bununla birlikte, kaplama tipi seçiminde yer alan ve tasarımcıya tanıdık gelmeyen bazı yabancı faktörler de vardır. Bu faktörlere, agregaların korunması, yerel malzemelerin bulunabilirliği, kaynak verimliliği, sürdürülebilirlik ve rekabet örnek olarak verilebilir. 1960 yılında AASHO Proje Yöntemleri Özel Komitesi tarafından geliştirilen faktörlerin tam listesi ise şu şekilde sıralanabilir; trafik, zemin özellikleri, hava durumu alan içerisindeki benzer kaplama performansı, ekonomi veya maliyet karşılaştırması, bitişik nizam kaplamalar, kademeli inşaat, çukurlu yüzey veya yükseltilmiş tasarım, otoyol sistemi, agregaların korunması, rekabetin teşvik edilmesi, inşaat hususları, belediye tercihi ve yerel sanayinin tanınması, trafik güvenliği, yerel malzemeler ile ticari olarak üretilen karışımların mevcudiyeti ve adaptasyonu.

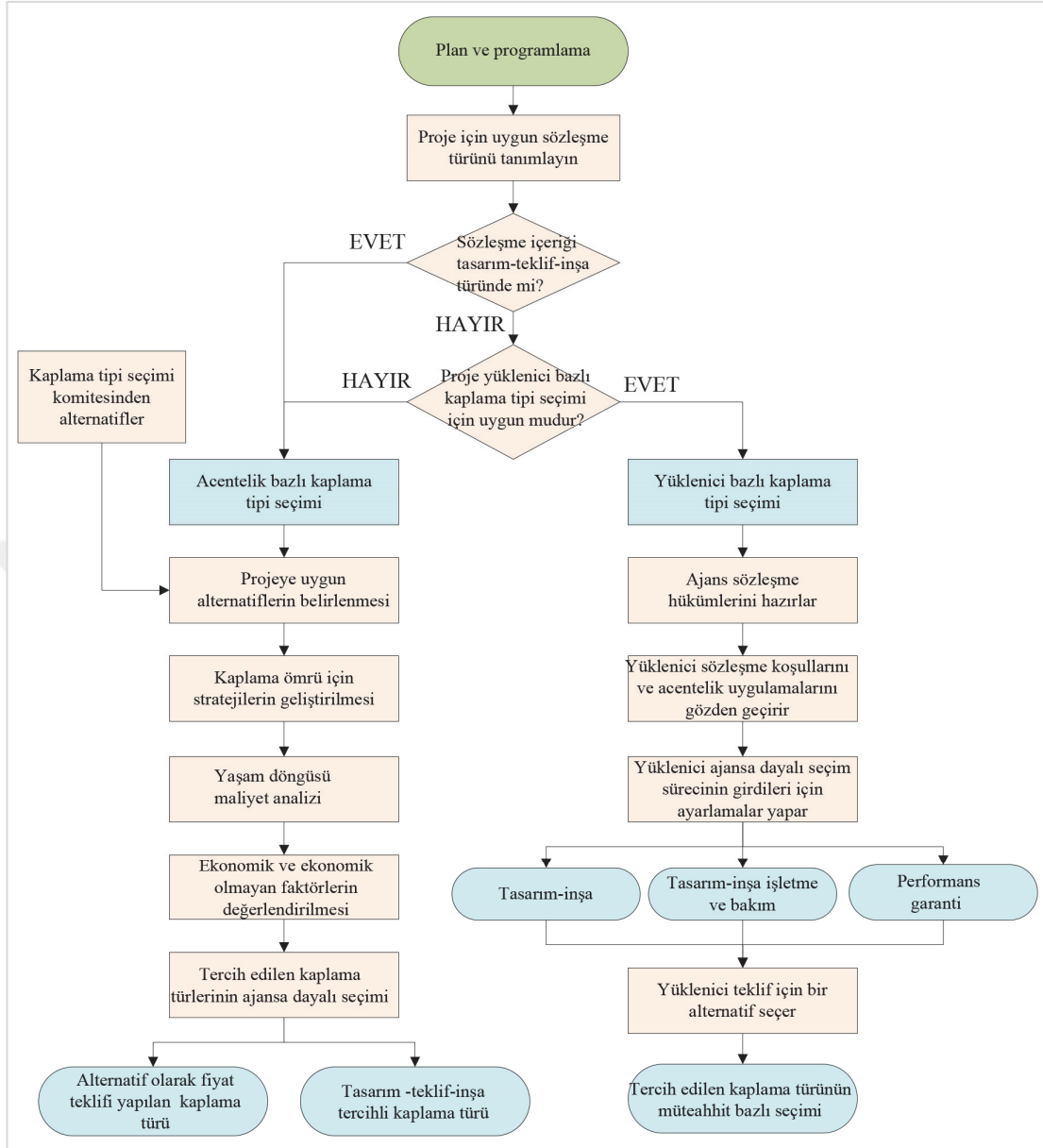
1960'da açıklanan bu faktörlerin bugün hala önemli hususlar olduğu dikkat çekici bir konudur. Bununla birlikte, bu faktörlerin birçoğunu anlama ve karakterize etmede son yıllarda önemli derecede yol kat edilmiştir. Yapısal tasarım yöntemleri, kaplama performans modellemesi ve maliyet analizi, onlarca yıllık araştırma, deney, gözlem ve optimizasyon sonucunda önemli bir şekilde gelişmiştir. Tasarım ve performans modellemesindeki gelişmelere örnek olarak AASHTOWare'nin Pavement ME Design ve ACPA'nın StreetPave yazılımı verilebilir. Maliyetlerin karşılaştırmalı analizlerinde ise, FHWA'nın RealCost yazılımı gibi araçların kullanılması büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu önemli modelleme ve analitik gelişmelere rağmen, en uygun

kaplama tipi seçimi için güvenilir ve anlamlı karşılaştırmalarının yapılmasında zorluklar halen devam etmektedir (Wathne, 2014).

2011 yılında Ulaştırma Araştırma Kurulu, Ulusal Otoyol Araştırmaları İşbirliği Programı (NCHRP) Project 10-75 kapsamında Kaplama Tipi Seçim Kılavuzu'nu yayınlamıştır (TRB, 2011). Bu doküman, otoyol acentelerinin kaplama tipi seçim politikaları ve süreçlerini geliştirmek için kullanabilecekleri kapsamlı bir prosedür seti sunmaktadır. Projenin en büyük amacı, hem yol kullanıcıları hem de mükellefler için uzun vadede maksimum faydayı sağlayabilmektir. Belgede ekonomik göstergeler, mühendislik ve çevresel faktörlerin dikkatli ve rasyonel olarak ele alınması gerektiği belirtilmektedir. Rehberin ana teması, büyük ölçüde AASHO (1960) belgesinde sunulan yönetim faktörlerinin listesine dayanmaktadır. Kaplama tipi seçim süreci TRB (2011) çalışma bulgularına dayanarak aşağıdaki bileşenleri içermelidir;

Kaplama tipi alternatiflerin tespiti için dikkate alınması gereken resmi süreç, hem işletmeci hem de yüklenici personeli içermeli ve şeffaf olmalıdır. Yaşam döngüsü maliyet analizi için analiz periyodu, uygun iskonto oranları ve kullanıcı maliyetlerinin yönetimi gibi faktörlerin oluşturulmasını içeren bir çerçeve içinde ele alınmalıdır.

Rehberde ekonomik faktörleri değerlendirmek için alternatif bir tarama matrisinin kullanılması istenmektedir. Eğer bu faktörlerin analizi net bir tercih unsuru değilse, eşdeğer performans gösteren diğer projeler için alternatif tekliflerin kullanılması gerekmektedir. Karar verilen kaplama tipi ile teklif fiyatı arasında önemli bir sürenin geçtiği durumlarda, koşulların ve maliyetlerin kayda değer bir şekilde değişmediğinden emin olmak için seçilen kaplama tipi tekrar gözden geçirilmelidir. Ekonomik değeri en üst düzeye çıkarmak için rekabeti teşvik eden ve yenilikçi yaklaşımlar içeren başka alternatifler de düşünülmelidir. Kaplama tipi seçim sürecini gösteren basitleştirilmiş bir akış şeması Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kaplama tipi seçimi için basitleştirilmiş bir diyagram (TRB, 2011)

#### 4.1.1. Seçim komitesi

Süreç sistematik, tarafsız bir şekilde değerlendirme ve alternatif geniş bir yelpaze sunabilmek için bir araya gelmiş bir kaplama tipi seçim komitesi ile başlar. Komite, kaplama tasarımı, malzemeler, inşaat, bakım, onarım gibi hususlarda uzman üyelerden oluşur. Kaplama alternatiflerinin değerlendirilmesinde tüm nedenlerin eksiksiz bir şekilde özetlenmesi ve açıklanması gerektiğinden, bu komite faaliyetlerinde şeffaf olmalıdır.

#### **4.1.2. Eşdeğerlik için yaşam döngüsü stratejileri**

Seçim komitesi tarafından belirlenen her alternatif, aynı trafik koşulları, hizmet ömrü ve güvenilirlik için tasarlanmalıdır ve bütün parametreler yol kullanıcılarına eşdeğer bir performans sunmalıdır. Her alternatifin yaşam döngüsü stratejileri, gerekli bakım ve rehabilitasyon faaliyetleri ve bunların programlanması süreçlerini içermelidir. Düşünülen alternatiflerden herhangi birinin yaşam döngüsü maliyeti, diğerlerinden % 15 daha düşükse o alternatif seçilmelidir. Değilse, ömür maliyetleri % 15'in altında olan tüm alternatiflerin teklif olarak verilmesi gerekir ve tüm bu alternatifler maliyet eşdeğeri olarak kabul edilir (TRB, 2011).

Alternatif tekliflerin değerlendirilebilmesi için, işlemin yanlışlıkla düşük teklif sürecinin bütünlüğünden ödün vermemesi önemlidir. Bu süreçte önemli hususlar arasında, yaşam döngüsü maliyeti teklif ayarlama faktörünün dâhil edilmesi, ticari eşya fiyat ayarlamaları kullanılmaması ve eşdeğer ücret kalemi sayılabilir. Karar verildikten sonra, verilen nihai kararın proje dosyasında detaylı bir şekilde belgelendirilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu şeffaflık perspektifi sayesinde otoyol yetkilileri, ileride olumsuz bir süreci denetleyebilir ve alınan önlemlerin uygunluğunu belirleyebilirler.

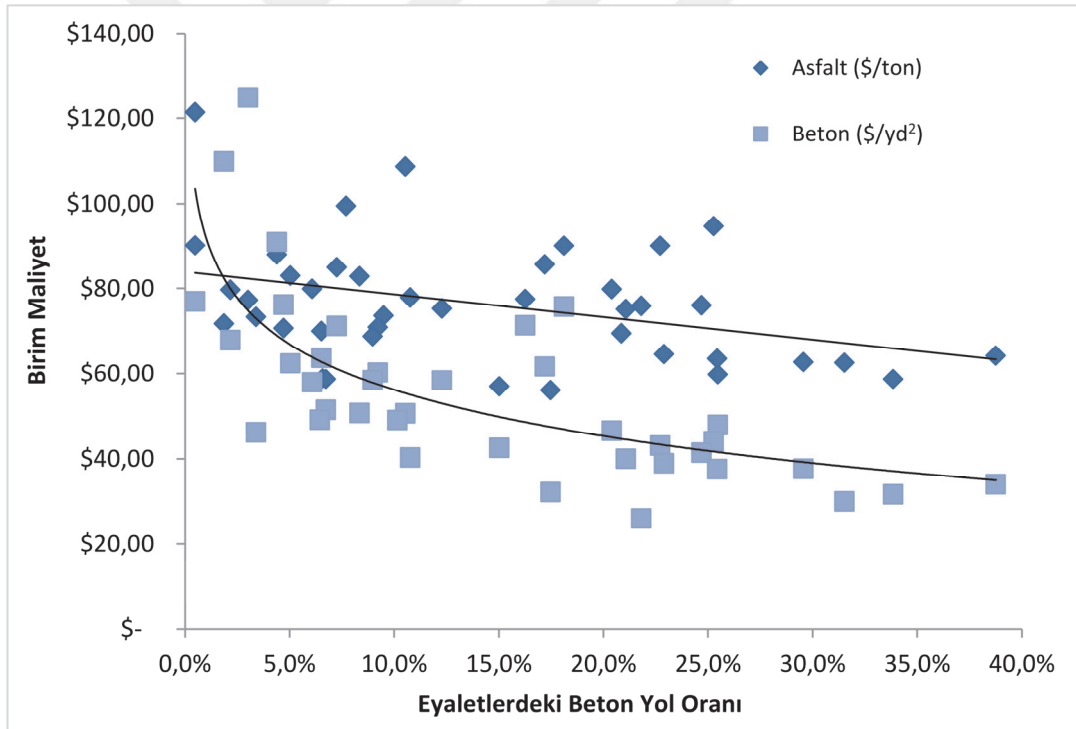
#### **4.1.3. Rekabetin rolü**

Hatırı sayılır ekonomik kısıtlamalar ve artan altyapı ihtiyaçları göz önüne alındığında, karayolu yapım şirketleri altyapı yatırımlarını daha da ileriye taşıyabilmek adına çok fazla fırsat elde edememişlerdir. Son 50 yıl içerisinde kaplama tipi seçimi için yayınlanan rehberde kabul edilen ve belgelenen yol yapım şirketleri arasındaki rekabetin sağlanması, bu konuda önemli bir katkı sağlayabilir.

Nakliye ve inşaat pazarındaki şirketler arasındaki rekabet önemlidir, çünkü maliyetleri düşürerek en yüksek yatırım getirisini sağlayabilirler. Ayrıca rekabetin olması, seyahat eden halka olan değeri daha da arttıran yenilikleri teşvik etmesi açısından da önemlidir. Dahası, farklı kaplama tipleri inşa eden yükleniciler arasındaki rekabet, sadece bir kaplama materyalinin düzenli veya münhasır olarak kullanıldığı durumlarda kamu yararına pozitif bir boyut kazandırmaktadır. Ekonominin her kesiminden (otomobil, elektronik, yazılım, inşaat vb.) tüketiciler, hem ürün geliştirmelerinden, hem de

maliyet tasarrufundan faydalanabilmek için, endüstri ve ürünler arasında rekabeti değerlendirme fırsatı yakalayabilirler.

Rekabetin yol kaplaması sektöründe geçerliliğini sorgulamak adına, Oman Systems tarafından 45 tane eyalet veri tabanından alınan otoyol acenteliği teklif maliyetlerinin kaplama tipi ile değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Ortalama beş yıllık kaplama maliyeti verileri, asfalt ve beton kaplama tiplerini daha dengeli kullanan eyaletlerin, sadece asfalt kaplama kullananlara kıyasla daha iyi ekonomik göstergeler elde ettiğini göstermektedir. Yaşam döngüsü maliyet analizlerinin kullanılmasına veya en son kaplama tasarım araçlarının benimsenmiş olmasına bakılmaksızın yapılan analizlerde, her iki kaplama türünün de düzenli olarak inşa edildiği eyaletlerde, nitelikli personel ile sağlıklı endüstrilerin geliştiği, inşaat kalitesinin iyileştiği ve daha düşük maliyetlerde kaplama yapımı alternatiflerinin ortaya çıktığı görülmüştür.



Şekil 4.2. Beton yol yapımının kaplama tipi maliyetine etkisi (Wathne, 2014)

Şekil 4.2’de kaplama endüstrileri arasında rekabet arttıkça, hem beton hem de asfalt kaplama için ortalama birim maliyetlerin giderek azaldığı görülmektedir. Bu rekabet, yüklenicilerin ayakta kalabilmek için mevcut bütçelerini artırmalarına, daha fazla yol yapılmasına ve ulaşım sistemlerine uzun ömürlü çözümler geliştirmelerine olanak tanımaktadır. Endüstriler arasında değişen seviyelerde ortaya çıkan rekabetin (beton

ve asfalt yol yapımı dengesinde) ortaya koyabileceği ekonomik faydayı bulabilmek için mukayeseli birim fiyat analizleri de yapılabilir. Tablo 4.1’de mukayeseli bir fiyat analizi görülmektedir.

Tablo 4.1. Beton yol yapımının kaplama tipi maliyetine etkisi (Wathne, 2014)

Toplam Bütçe (Milyon\$)	Beton Yol Payı (%)	Asfalta Yapılan Harcama (Milyon\$)	Asfalt Birim Maliyeti (\$)	Kullanılan Asfalt Miktarı (ton)	Betona Yapılan Harcama (Milyon\$)	Beton Birim Maliyeti (\$)	Kullanılan Beton Miktarı (m <sup>2</sup> )
200	0	200	83,88	2.384.232	--	--	--
200	5	190	81,24	2.338.829	10	66,94	124.882
200	10	180	78,59	2.290.282	20	56,13	297.879
200	15	170	75,94	2.238.558	30	49,81	503.563
200	20	160	73,29	2.182.989	40	45,32	737.909
200	25	150	70,65	2.123.255	50	41,84	999.135
200	30	140	68,00	2.058.869	60	38,99	1.286.418
200	35	130	65,35	1.989.266	70	36,59	1.599.465

Örneğin, bir eyaletin kaplama öğeleri için yılda 200 milyon dolar harcadığını ve kaplama bütçesinin %100'ünün asfalta ayrıldığını varsayalım. Bu seviyede, endüstriler arasında bir rekabet olmadan asfaltın ton başına yaklaşık maliyeti 83,88 \$ seviyesinde olacaktır. Böylece, 200 milyon dolarlık bütçe için yaklaşık olarak 2,4 milyon ton asfalt satın alınabilecektir. Eyaletin alternatif teklifler alarak, programlı seçim ya da başka yollarla beton kaplama kullanımı tercihi ile daha fazla rekabet başlattığını varsayalım. Eyalet, aynı miktardaki 200 milyon doların % 15'ini beton kaplamalara harcarsa, bu rekabet asfalt ünitesini ton başına 75,94 \$ 'a düşürmekte ve m<sup>2</sup> başına 49,81 \$ beton yol yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Aynı 200 milyon dolarlık bütçeyle hala aynı tonaja yakın asfaltın kullanılmasının yanında, 500.000 m<sup>2</sup>'lik bir beton kaplamadan da yararlanıldığı söylenebilir. Bütçenin %30'u beton kaplama olarak düşünüldüğünde ise, asfalt birimi fiyatı ton başına 68,00 \$'a düşmekte ve yüklenici beton kaplama için m<sup>2</sup> başına 38,99 \$ ödemeyi düşünmektedir.

Şekil 4.2 ve Tablo 4.1'de sunulan örnekler halka açık olarak cereyan etmiş gerçek tekliflerden alınan veri analizlerine dayanmaktadır. Özellikle beton kaplamanın payı %20'den az olduğunda verilerde belirgin bir saçılma olduğu görülmektedir. Bu durumun oluşmasında asfalt ve beton birim fiyatlarındaki belirsizlikler, toplam teklif veren sayısı, toplam kaplama hacmi ve piyasanın büyüklüğü etkili olmuş olabilir.

Özellikle beton yol oranının % 20'den az olduğu durumlarda, beton payının birim fiyatlar üzerindeki etkisini net bir şekilde ölçebilmek için, daha derinlemesine bir analizin yapılması gerekecektir. Şartlar ne olursa olsun verilerle ilgili aşağıdaki gözlemler yapılabilir:

Asfalt ve beton için kaplama harcamalarının payı %0'dan % 35'e doğru yükseldiğinde hem asfalt hem de beton için daha düşük birim fiyatlar elde edilebilmektedir. Her iki malzemenin birim fiyatlarındaki değişkenlik, artan rekabet seviyesine bağlı olarak azalmaktadır. Daha yüksek rekabet seviyelerine sahip olan eyaletler, sürdürülebilir, istikrarlı ve öngörülebilir bir kaplama (asfalt ve beton) yapım programına sahip olma eğilimindedir. Rekabet, bir devlet karayolu otoritesi için iyi bir ticaret uygulamasıdır. Devlet otoyolu projeleri için rekabet etmek üzere iki sağlıklı endüstriyi teşvik etmek için herhangi bir dezavantaj bulunmamaktadır.

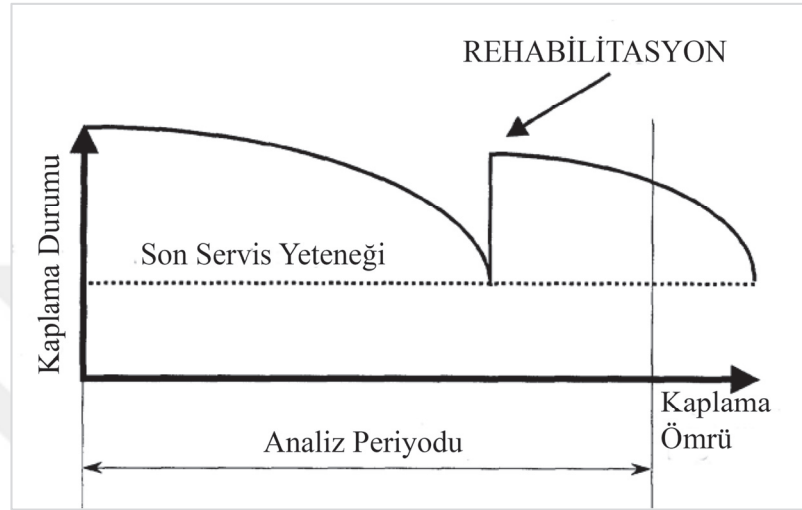
Son yarım yüzyılda kaplama tipi seçimi hakkında çok şey yazılmış, bu amaçla rehberler geliştirilmiş ve politikalar belirlenmiştir. Kaplama tipi seçimi prosedürleri, trafik, yapı malzemesi, hava durumu, kaplama performansı, maliyet tahmini, sürdürülebilirlik gibi anlayış ve faktörlerin ele alındığı kapsamlı yaklaşımları içermektedir. Ancak unutulmamalıdır ki, kaplama tipi seçimi, kaplama üretiminde yer alan endüstriler arasında sağlıklı ve sürekli bir rekabet varsa anlamlı olacaktır.

Son olarak, kaplama tipi seçiminin adil ve anlamlı olabilmesi için mukayesenin şeffaf ve rekabetçi bir pazar alanı bağlamında yapılması gerekir. Bu bağlamda ortaya çıkacak olan rekabet anlayışı, yoldan hizmet bekleyen kişilere, yol idaresine ve otoyol işletmecilerine önemli fırsatlar sunabilecektir.

#### **4.2. Kaplama Analiz Periyodu ve Performansı**

Eşdeğerlik için yaşam döngüsü stratejileri geliştirildikten sonra, her bir alternatifin yaşam döngüsü maliyeti belirlenmeli ve ardından karşılaştırılmalıdır. Burada, kaplama performansı ve analiz periyodu için gerçekçi veriler kullanılması önemlidir. Yıllık reel iskonto oranları kullanılmalı ve farklı malzemeler için enflasyon oranlarına ilişkin gerçek veya göreceli fiyat değişiklikleri göz önüne alınmalıdır.

Analiz periyodu, maliyetlerin değerlendirildiği zaman dilimini ifade etmektedir. Yaşam döngüsü maliyeti analiz periyodu, tasarım stratejileri ile ilişkili uzun vadeli maliyet farklılıklarını yansıtacak kadar yeterli ve her alternatif için en az bir rehabilitasyon faaliyeti içerecek kadar da uzun olmalıdır (Walls ve Smith, 1998). Şekil 4.3'te örnek bir kaplama tasarımı için öngörülen analiz süresi görülmektedir.



Şekil 4.3. Bir kaplama tasarımı için analiz süresi (Walls ve Smith, 1998)

Walls ve Smith (1998)'de yayınlamış olan nihai yaşam döngüsü maliyet analizi bildiğine göre, rehabilitasyon ve yeniden yapım projeleri dahil olmak üzere tüm kaplama projeleri için en az 35 yıllık bir analiz periyodu önerilmektedir. Bazı rehabilitasyon alternatiflerinde, yeniden yapıma kadar belli bir süre (10 yıl) dikkate alındığında, daha kısa analiz periyodlarının uygun olabileceği belirtilmektedir. Tavsiye edilen asgari 35 yıllık analiz periyodundan sapma miktarları kısa sürelerde olmak koşuluyla, faaliyetlerin basitleştirilmesine olanak tanınmaktadır (Walls ve Smith, 1998). AASHTO (1993), kaplama tipine göre analiz periyodunun seçiminde birtakım öneriler sunmaktadır (Tablo 4.2).

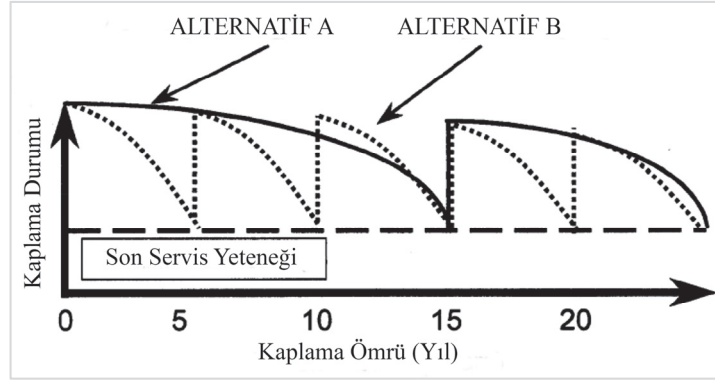
Tablo 4.2. Tavsiye edilen analiz periyodları (AASHTO, 1993)

Üstyapı Tipi	Analiz Periyodu (Yıl)
Yüksek Hacimli Kent Yolları	30-50
Yüksek Hacimli Kırsal Yollar	20-50
Düşük Hacimli Kaplamalı Yollar	15-25
Düşük Hacimli Sathi Kaplamalı Yollar	10-20



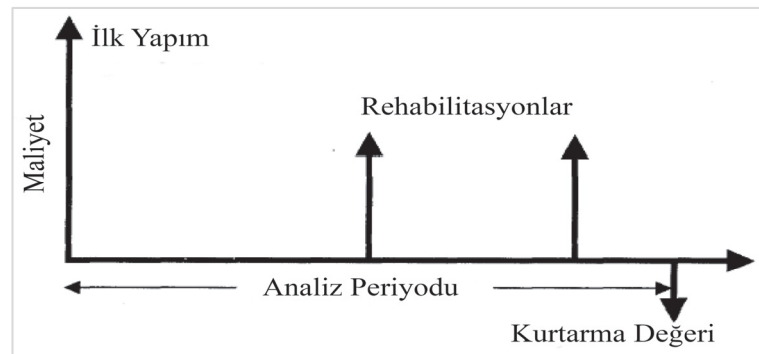
Uzun vadeli kamu projelerinde analiz periyoduna karar verilmesinde bir diğer yaklaşım, "dalgalı zaman dilimi" kullanımınıdır (Ozbay ve diğ., 2003). Bu yöntemde, bugünün şartlarına göre indirgenen maliyetlerin ve kazanımların önemsiz hale gelmesi veya genişletilmiş eşiğin altına düşmesi ve gerçek maliyetlerin gelecekte belirlenmesi gibi bir yol izlenir. Dolayısıyla kullanılan iskonto oranı, dalgalı zaman periyodunun kapsamını belirlemedeki en önemli faktördür. Bir tasarımcı, analiz süresinin uzunluğunun belirlenmesine ek olarak, bir başlangıç noktası olacak şekilde temel bir yıl seçmelidir (Zimmerman ve diğ., 2000). Mevcut değer analizinde temel yıl, yaşam döngüsü maliyetlerinin tamamının bir araya getirilmesi ve karşılaştırılması amacıyla indirgendiği zamanı temsil eder. Herhangi bir temel yıl seçilebilmesine karşın, taban çizgisi; tasarım süresi, inşaatın tamamlandığı süre veya yolun açıldığı bir nokta şeklinde tanımlanabilir. Literatüre göre en gerçekçi temel maliyetler, tasarım süresi boyunca elde edilmiş bir noktadan elde edilmektedir. Çünkü gerçekçi analizler, güncel müteahhit teklifleri veya mevcut diğer yapı yaklaşık maliyetleri kullanılarak yapılabilmektedir. Bu sayede gelecekteki maliyetlerin projeksiyonları bu yaklaşımla genellikle daha doğru sonuçlar doğurmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, yaşam döngüsü sürelerinin en az 50 yıl veya daha fazla zaman dilimlerinde kabul edilmesinin makul olabileceği belirtilmiştir (Haas ve diğ., 2006).

Rehabilitasyon zamanlamaları oldukça belirsizdir ve yaşam döngüsü maliyetleri sonuçları üzerinde büyük etkiye sahiptir. Şekil 4.4, iki farklı rehabilitasyon alternatifinin performans eğrilerini göstermektedir. Alternatif A, 15 yıllık döngüde uygulanan uzun vadeli bir stratejiyi, Alternatif B ise 5 yıllık bir döngüde gerçekleşecek olan minimal müdahaleleri ifade etmektedir (Walls ve Smith, 1998). Şekilden de anlaşılacağı üzere, performans seviyeleri farklı rehabilitasyon stratejileri için değişmektedir. Kaplama performansındaki bu dalgalanma araç işletme maliyetlerinde farklılıklar yaratabilmektedir. Rehabilitasyon faaliyetlerine girdi belirleme ve kaplamaların beklenen ömrünü belirleme konusunda kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (Cross ve Parsons, 2002; Gharaibeh ve Darter, 2003). Yeniden yapılandırma ve rehabilitasyonun proje süresi, kullanıcı maliyetlerinin hesaplanmasında önemli bir faktördür (Lindley ve Clark, 2003; Lee ve diğ., 2005).



Şekil 4.4. Performans eğrileri (Walls ve Smith, 1998)

Analiz süresinin sonunda faydalı ömre sahip olan faktörlerin “bakiye” ve “kurtarma” değerleri hesaplanmalıdır (Ozbay ve diğ., 2003). Kurtarma değerinin iki bileşeni vardır. Bunlardan birincisi, kaplamanın geri kazanılmasından elde edilen net değere atıfta bulunan kalıntı değeridir (salvage value) (Walls ve Smith, 1998). Diğer bileşen, bakım yapılabilir ömrü, yani analiz periyodunun sonunda servis sağlayabilen bir kaplama için kalan ömrü ifade eder. Hesaplama döneminin sonunda kalan kaplama ömründe farklılıklar varsa, analiz edilebilir ömür çözümlemede hesaba katılmalıdır. Örneğin, Alternatif A'nın kalan ömrü 10 yıl ve Alternatif B'nin ömrünün 5 yıl olması halinde, ömür devri maliyet analizi sürecinde kurtarma değerinin dikkate alınmaması, Alternatif B'nin haksız yere aleyhine sonuçlanmasına neden olabilir. Walls ve Smith (1998)'e göre kullanılabilir kaplama ömrünün hesabında son rehabilitasyon maliyetinin, analiz periyodunun sonunda kalan tasarım ömrü yüzdesiyle çarpılmasıyla elde edilebileceği belirtilmiştir. Şekil 4.5'te tipik bir kaplama için uzun dönemde yapılan farklı rehabilitasyon maliyetleri ve analiz periyodunun sonunda kalan kurtarma değeri gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Harcama akımı şeması (Walls ve Smith, 1998)

Bu tarz diyagramlar ilk yapım, rehabilitasyon faaliyetleri ve bazı durumlarda kurtarma değeri zamanlamalarını görselleştirmeye yardımcı olurlar. Tipik olarak maliyetler yukarı yönde, kurtarma değeri gibi fayda maliyetler ise aşağı yönde gösterilir. İskonto oranı, yaşam döngüsü maliyetinde önemli bir faktördür ve sonuçlar üzerinde önemli etkiler doğurabilmektedir. Uzun vadeli kamu yatırımlarını analiz ederken iskonto, farklı zamanlarda ortaya çıkan maliyetleri karşılaştırmada önemli bir unsurdur (Ozbay ve diğ., 2003). Zamanın parasal bir değeri olduğu için, gelecekte harcanan bir parasal değer, mevcut parasal değerden daha düşük değerdedir. Bu nedenle farklı zaman ve noktalarda karşılaşılan maliyet ve faydalar, ortak bir noktada karşılaşılan maliyet ve faydalara dönüştürülmelidir. Walls ve Smith (1998), tarihsel eğilimleri uzun süreler boyunca yansıtan bir iskonto oranının kullanılmasını önermektedir. Yönetim ve bütçe ofisleri tarafından belirlenen iskonto oranları, yol yapım otoritelerince yaygın olarak kullanılmaktadır. Araştırmacılar uzun bir süre boyunca toplanan verilerde, gerçek zamanlı paranın iskonto değerinin yaklaşık olarak %4 düzeyinde olduğunu belirtmektedirler. Birçok devlet kurumu bu tavsiyeye uymakta ve analizlerinde %4 iskonto oranının kullanılmasını şart koşmaktadırlar.

Yaşam döngüsü maliyetleri oluşturulduktan sonra, tercih tarama matrisi gibi bir etki faktörü oluşturulur. Böyle bir matristeki ekonomik ve ekonomik olmayan faktörlerin ayrıntılı bir tartışması TRB (2011) raporunda sunulmaktadır. Bununla birlikte, endüstri rekabetinin bu aşamada yeterince dikkate alınması ve açıklanması kritik önem taşımaktadır. Bazı durumlarda (örneğin kaplama sanayileri arasında rekabet olmadığı durumlarda) endüstriler arasında rekabetin teşvik edilmesi konusunda daha geniş ve kapsamlı bir hedef kabul edilmişse, yüklenici en düşük yaşam döngüsü maliyetine sahip olan bir alternatifi seçebilir. Böyle bir durumda, yüklenicinin daha büyük finansal hedefleri yönetmesi gerekmektedir. Yüklenicilerin sektörler arası rekabetten fayda sağlayıp sağlamayacağı burada kilit bir rol üstlenmektedir. Rekabetin yeterli olduğu durumlarda en düşük yaşam döngüsü maliyeti seçenekleri, uygun alternatifler olarak düşünülür. Her ne kadar diğer ekonomik göstergelerin de göz önüne alınması gerekse de, endüstriler arasında rekabet kadar hiçbiri önemli ve etkili değildir (Wathne, 2014).

### 4.3. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizinin Mukayeseli Bir Değerlendirmesi

Beton yollar KGM tarafından yeterince benimsenmemiş olmasına rağmen, Belediyeler tarafından sürekli artan bir ivmeyle yapılmaya devam etmektedir. Bu vesileyle hem kaplama türleri için daha reel maliyetler elde edilmiş, hem de iki endüstri arasındaki rekabet sayesinde daha verimli sonuçlar ortaya çıkmaya başlamıştır.

TÇMB (2017) tarafından, yerel belediyelerce yapılan kamu yatırımlarında SSB yolun ilk yapım maliyeti açısından kilitli parke taşı ile yaklaşık aynı maliyette (24 TL/m<sup>2</sup>), asfalt yoldan %38 daha ekonomik ve sathi kaplamadan %44 daha pahalı bir uygulama olduğu bildirilmiştir. Bu analizlerde kaplama maliyeti mukayesesi için, her iki karışım içeriğinde agrega ortak olduğundan en önemli malzeme kaleminin bağlayıcının türü olduğu belirtilmiştir. Ham petrolün rafine edilmesi ile elde edilen bitüm, çimentoya göre uzun periyotlarda dalgalı bir mali tablo sergilemekte, bu da asfalt fiyatlarındaki değişkenliği artırmaktadır. Ülkemizde bu iki endüstri arasında rekabetin olgunlaşmaması ve görece asfalt endüstrisinin sektöre hakim olması nedeniyle kaplamalara ait uzun dönem performans özellikleri ve rehabilitasyon faaliyetlerini içerir ekonomik göstergeler yeterince tartışılmamaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde SSB test yolu için ilk yapım maliyet analizi verildikten sonra asfalt kaplamalı yol ile mukayeseli bir değerlendirme yapılmış, bu sayede literatürdeki bu eksikliğe katkı sağlanması amaçlanmıştır. İskonto oranının Walls ve Smith (1998)'e uygun olarak %4 alındığı yaşam döngüsü maliyet analizlerinde, her iki kaplama için analiz periyodu AASHTO (1993)'e uygun 30 yıl ve hizmet ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Analiz periyodu içerisinde iki kaplama türü için rutin bakım, periyodik bakım ve rehabilitasyon olmak üzere 3 kategoride bir onarım planlaması yapılmış, yapım ve onarım maliyetlerinin oluşturulmasında KGM birim fiyatları baz alınmıştır. Gelecekte yapılması planlanan onarım maliyetlerinin güncel değerlere dönüştürülmesinde Denklem (4.1), kalıntı değerinin hesaplanmasında ise Denklem (4.2) kullanılmıştır;

$$PW = F [ 1 / (1 + i)^n ] \quad (4.1)$$

$$SV = C \times (RL / DL) \quad (4.2)$$

Burada,

PW : Güncel maliyet (TL)

F : Gelecekteki maliyet (TL)

i : İskonto oranı (%4)

n : Analiz başlangıcından itibaren geçen yıl

SV : Kalıntı değeri (TL)

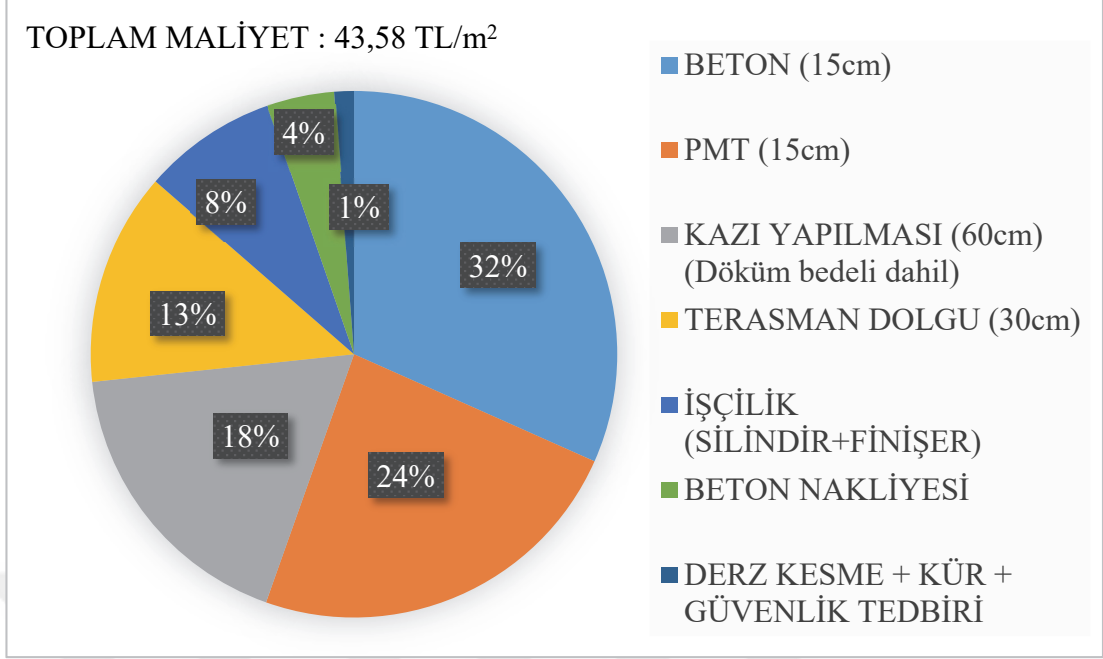
C : Son onarım maliyeti (TL)

RL : Analiz süresi sonunda kalan ömür (yıl)

DL : Son onarım faaliyeti ile beklenen (kazanılan) ömür (yıl)

#### 4.3.1. İlk yapım maliyet mukayesesi

KBB bütçesiyle gerçekleştirilen SSB test yolu projesi 43,58 TL/m<sup>2</sup> maliyet ile tamamlanmıştır. İmalat kalemlerinin maliyetlere olan etkisi, yüzde cinsinden Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu grafiğe göre, toplam maliyetin %32'si ile beton ve %24'ü ile Plentmiks Temel (PMT) imalatı en yüksek iki maliyet kalemi olarak ortaya çıkmaktadır. Yapımda donatı ve kalıp kullanılmaması kaplamanın ekonomik olmasındaki en önemli faktörleri oluşturmaktadır. Ayrıca geleneksel beton kaplamalar ile kıyaslandığında, yolun daha erken trafiğe açılması, donatı ve kalıp kullanılmaması ve birim zamanda daha hızlı üretimin yapılması gibi ekonomik faydaların bu tabloya yansımadağıını da belirtmekte fayda vardır. KBB tarafından son 2 yıl içerisinde yapılan sathi, SSB ve asfalt yol kaplamalarının ilk yapım maliyet analizleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Bu analizlere göre, ilk defa uygulaması yapılan SSB test yolunun ilk yapım maliyetinin, asfalt yoldan %39,4 daha ekonomik ve sathi kaplamadan % 19,5 daha pahalı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.6. SSB test yolu maliyetinin iş kalemlerine göre dağılımı

Tablo 4.3. Son iki yılda yapılan yollar için ilk yapım maliyet analizi

SATHİ KAPLAMA			
İMALAT TÜRÜ	MİKTAR	BİRİM FİYAT (TL)	MALİYET (TL/m <sup>2</sup> )
KAZI YAPILMASI (Döküm bedeli dâhil)	0,60 m <sup>3</sup>	13	7,80
TERASMAN DOLGU	0,30 m <sup>3</sup>	19	5,70
ALTTEMEL (20cm)	0,20 m <sup>3</sup>	28	5,60
PMT (15cm)	0,35 ton	30	10,35
İKİ TABAKA ASTARLI SATHİ KAPLAMA YAPILMASI	1,00 m <sup>2</sup>	7	7,00
GÜVENLİK TEDBİRİ	1,00 m	0,015	0,02
<b>TOPLAM</b>			<b>36,47</b>
SSB (SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON)			
İMALAT TÜRÜ	MİKTAR	BİRİM FİYAT (TL)	MALİYET (TL/m <sup>2</sup> )
KAZI YAPILMASI (Döküm bedeli dâhil)	0,60 m <sup>3</sup>	13	7,80
TERASMAN DOLGU	0,30 m <sup>3</sup>	19	5,70
PMT (15cm)	0,35 ton	30	10,35
BETON (C30)	0,15 m <sup>3</sup>	92	13,80
BETON NAKLİYESİ	0,15 m <sup>3</sup>	12	1,80
İŞÇİLİK (SİLİNDİR+FİNİŞER)	0,36 ton	10	3,60
DERZ KESME	1,00 m	0,5	0,50
KÜRLEME (ARAZÖZ İLE)	1,00 m	0,01	0,01
GÜVENLİK TEDBİRİ	1,00 m	0,015	0,02
<b>TOPLAM</b>			<b>43,58</b>
ASFALT			
İMALAT TÜRÜ	MİKTAR	BİRİM FİYAT (TL)	MALİYET (TL/m <sup>2</sup> )
KAZI YAPILMASI (Döküm bedeli dâhil)	0,60 m <sup>3</sup>	13	7,80
TERASMAN DOLGU	0,30 m <sup>3</sup>	19	5,70
ALTTEMEL (20cm)	0,20 m <sup>3</sup>	28	5,60
PMT (15cm)	0,35 ton	30	10,35
BİNDER (9cm)	0,216 ton	116	25,06
AŞINMA (6cm)	0,144 ton	121	17,42
GÜVENLİK TEDBİRİ	1,00 m	0,015	0,02
<b>TOPLAM</b>			<b>71,95</b>

#### 4.3.2. Yaşam döngüsü maliyet analizi

Eşdeğer fiyatlandırmaların yapılabilmesi için yaşam döngüsü içerisinde gelecekteki bakım ve onarımlara ayrılacak bütçelerin bugünün koşullarında bilinmesi gerekmektedir. İlk yapım maliyetine ek olarak, asfalt ve beton kaplama için bakım ve onarım planlaması yapılmış, analiz süresi içerisinde birim alanda gerçekleşmesi muhtemel faaliyetler yüzde cinsinden ifade edilmiştir (Tablo 4.4). Onarımlar için kullanılan birim fiyat tarif ve analizleri EK D, Tablo D.2-4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Analiz süresi içerisinde planlanan bakım ve onarım stratejisi

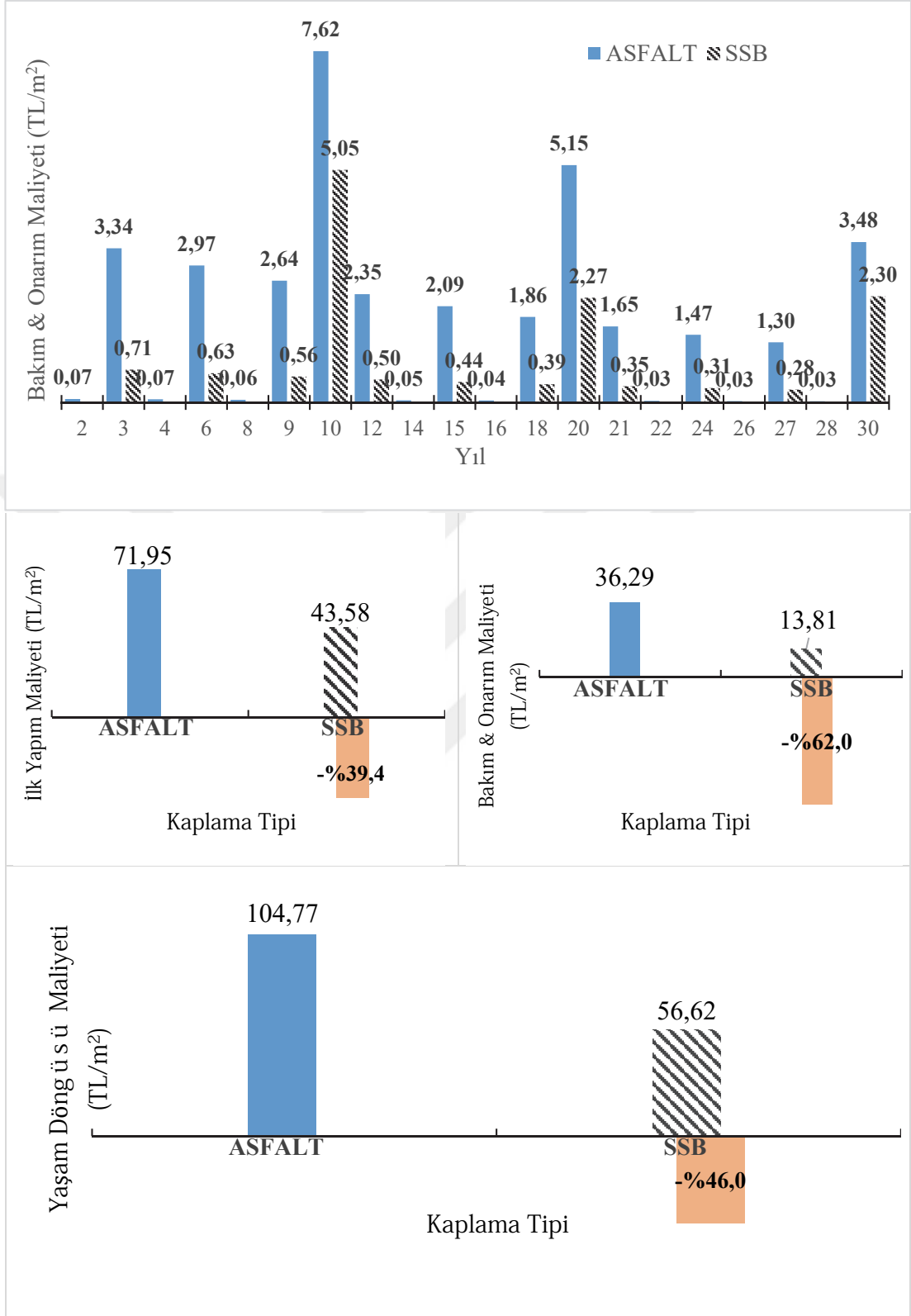
FAALİYET TİPİ	FAALİYET PERİYODU	GERÇEKLEŞME ORANI (%)	BOZULMA TİPİ VE ONARIM METODU	BİRİM FİYAT (TL/m <sup>2</sup> )
<b>SSB (SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON)</b>				
Rutin Bakım	Yılda 1 defa	50	<b>Çatlak Dolgusu (Bitüm veya Epoksi Reçine)</b>	1,60
			Yapısal Olmayan Düşük ve Orta Düzey Çatlaklar	
			Derz Bölgelerinde Kısmi Bozulmalar	
Periyodik Bakım	10 yılda 1 defa	15	<b>Taze Beton İle Bölgesel Onarım</b>	49,79
			Derz Bölgelerinde Kabarma (blowups)	
			Derz Bölgelerinde Pompaj Etkisi	
			Çanaklaşma (patch)	
			Cilalanmış Agregası	
			Pullanma (popouts)	
			Yüzey Soyulması (scaling)	
			Kavlanma, Yüzey Dökülmesi (spalling)	
			10 mm'den Büyük Boyuna ve Enine Çatlaklar	
Köşe Çatlakları				
Rehabilitasyon (ONARIM)	20 yılda 1 defa	10	<b>Tam Derinlikli Yeni Yüzey Kaplaması</b>	49,79
			Blokların Oturması veya Ayrılması	
			Durabilite (D) Çatlakları	
			Harita Çatlakları	
			Yatay veya Düşey Yönde Faylanma	
<b>ASFALT</b>				
Rutin Bakım	2 yılda 1 defa	5	<b>Çatlak Dolgusu (Bitüm)</b>	1,60
			Enine Çatlak	
			Boyuna Çatlak	
			Blok Çatlak	
			Yansıma Çatlağı	
Periyodik Bakım	3 yılda 1 defa	5	<b>Asfalt Yama</b>	75,20
			Timsah Sırtı Çatlak	
			Kusma veya Tekerlek İzinde Oturma	
			Çukurlar (Pothole)	
			Ötelenme (Shoving)	
			<b>İnce Yüzey Kaplaması</b>	
			Cilalanmış Agregası	
Sökülme veya Çanaklaşma				
Rehabilitasyon (ONARIM)	10 yılda 1 defa	15	<b>Tam Derinlikli Yeni Yüzey Kaplaması</b>	75,20
			İleri Düzey Yapısal Bozulmalar	

Bakım ve onarım stratejisi belirlendikten sonra, 30 yıllık analiz periyodu için kaplama tiplerinde yıllara göre oluşacak olan harcamaların yaşam döngüsü maliyet analizi yapılarak Tablo 4.5'te verilmiştir. Faaliyetler için yapılan harcamaların yıllara göre değişimi ve iki kaplama arasındaki ilk yapım, bakım onarım ve yaşam döngüsü maliyet mukayeselerini gösterir grafikler ise Şekil 4.7'de topluca verilmiştir.

Tablo 4.5. Yaşam döngüsü maliyet analizi

YIL	FAALİYET TİPİ	BİRİM FİYAT (TL/m <sup>2</sup> )	GERÇEKLEŞME ORANI (%)	GELECEKTEKİ MALİYET (F) (TL/m <sup>2</sup> )	GÜNCEL MALİYET (PW) (TL/m <sup>2</sup> )
<b>SSB (SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON)</b>					
0	YAKLAŞIK MALİYET			43,58	43,58
3	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,71
6	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,63
9	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,56
10	Per. Bakım	49,79	15	7,47	5,05
12	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,50
15	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,44
18	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,39
20	ONARIM	49,79	10	4,97	2,27
21	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,35
24	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,31
27	Rutin Bakım	1,60	50	0,80	0,28
30	Per. Bakım	49,79	15	7,47	2,30
Kurtarma Değeri (SV)				-2,49	-0,77
YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYETİ (TL/m <sup>2</sup> )					<b>56,62</b>
<b>ASFALT</b>					
0	YAKLAŞIK MALİYET			71,95	71,95
2	Rutin Bakım	1,60	5	0,08	0,07
3	Per. Bakım	75,20	5	3,76	3,34
4	Rutin Bakım	1,60	5	0,08	0,07
6	Per. Bakım	75,20	5	3,76	2,97
8	Rutin Bakım	1,60	5	0,08	0,06
9	Per. Bakım	75,20	5	3,76	2,64
10	ONARIM	75,20	15	11,28	7,62
12	Per. Bakım	75,20	5	3,76	2,35
14	Rutin Bakım	1,60	5	0,08	0,05
15	Per. Bakım	75,20	5	3,76	2,09
16	Rutin Bakım	1,60	5	0,08	0,04
18	Per. Bakım	75,20	5	3,76	1,86
20	ONARIM	75,20	15	11,28	5,15
21	Per. Bakım	75,20	5	3,76	1,65
22	Rutin Bakım	1,60	5	0,08	0,03
24	Per. Bakım	75,20	5	3,76	1,47
26	Rutin Bakım	1,60	5	0,08	0,03
27	Per. Bakım	75,20	5	3,76	1,30
28	Rutin Bakım	1,60	5	0,08	0,03
30	ONARIM	75,20	15	11,28	3,48
Kurtarma Değeri (SV)				-11,28	-3,48
YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYETİ (TL/m <sup>2</sup> )					<b>104,77</b>





Şekil 4.7. Yaşam döngüsü maliyetinin kaplama tipine göre mukayesesi

Kaplamalar için kurtarma değeri (SV) fayda maliyet olarak tanımlandığından, yaşam döngüsü maliyet analizinde negatif değer olarak atanmış ve Denklem (4.2) yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$SV_{SSB} = 4,97 \times (10/20) = 2,49 \text{ TL/m}^2$$

$$SV_{ASFALT} = 11,28 \times (10/10) = 11,28 \text{ TL/m}^2$$

İlk yapım maliyeti açısından SSB yol, asfalt yola nazaran %39,4 daha ekonomik bir kaplama tipi olmakla birlikte, servis süresi boyunca da %62 oranında bir bakım onarım ekonomikliğı sağlamaktadır. Yaşam döngüsü maliyeti açısından ise, SSB yolun asfalt yoldan %46 oranında daha ekonomik bir kaplama alternatifi olduğu görülmektedir (Şekil 4.7). Maliyet farklarının zaman içerisinde bu denli artmasında, asfalt yolun bakım onarım faaliyetlerinin daha sık periyotlarda gerçekleşmesi, ilk ciddi onarım faaliyetinin asfaltta 10. ve 20. yılda yapılmasına karşın, SSB kaplamada bu faaliyetin sadece 20. yılda gerçekleşmesi ve asfalt bakım malzemesinin SSB bakım malzemesinden daha pahalı olması etkili olmuştur.

Gerçekleşen bu bakım onarım faaliyetlerinin KBB özelinde dikkate alınması ve özellikle altyapısı tamamlanmış kırsal bölgelerde kaplama tercihlerinin SSB olarak belirlenmesi ile ciddi oranlardaki bu bakım onarım bütçelerinin başka kaynaklara aktarılması mümkün olabilecektir. Zira KBB tarafından 2019 yılı sonuna kadar 300 adet cadde ve sokak düzenleme, 29 adet kavşak ve yol projesinin tamamlanacağını hedeflendiği 5 yıllık stratejik planda, yaklaşık 1,6 milyon TL olan beş yıllık ödeneğin yarısının, içerisinde ciddi miktarlarda asfalt kaplama imalatı olan bu iki iş kalemine ayrıldığı görülmektedir (Ek D, Tablo D.5). Ulaşım hizmetleri hedeflerinin imalat kalemleri bazında gösterildiği başka bir çalışmada ise, bu 5 yılın sonunda 250.000 ton asfalt yama malzemesinin üretileceği öngörülmektedir (Ek D, Tablo D.6), (KBB, 2017).

KBB bütçesiyle gerçekleştirilen SSB test yolu, iyi tasarlanmış rehabilitasyon stratejileri sayesinde bu bakım onarım bütçelerinin daha efektif bir şekilde kullanılabilceğini göstermiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yol ağı ve ulaşım araçları, ekonomik kalkınma ve büyüme sürecine önemli katkılarda bulunmasının yanında önemli sosyal faydalar da sağlamaktadır. İyi tasarlanmış olmasına rağmen kötü inşa edilmiş yollar, hareketliliği kısıtlayabilir, araç işletim maliyetlerini ve kaza oranlarını önemli ölçüde artırabilirler. Dolayısıyla güvenli ve konforlu bir ulaşım ağı sağlamanın ekonomik ve sosyal getirisinin yanında kıt kamu kaynaklarıyla sürdürülebilir yol ağının sürekli üst seviyede hizmet sağlayabilmesi, gelişmekte olan ülkeler için hayati bir önem taşımaktadır.

Yollar veya ulaşım sistemleri birçok ülkedeki en önemli kamu varlıkları arasında yer almaktadır. Örneğin sadece KBB'nin 5 yıllık stratejik planda ulaştırma hizmetlerine ayırmış olduğu bütçenin yaklaşık 1,6 milyar TL düzeyinde olması, Türkiye ölçeğinde bu sektör için ayrılan bütçe göstergelerini tahmin etmeyi kolaylaştıracaktır. Yol yapım veya iyileştirme faaliyetleri, hastane, okul, kamusal alan veya çalışma bölgelerine daha iyi erişim yoluyla kullanıcılarına konfor, hız ve güvenlik gibi çoğu zaman para ile ifade edilemeyen kolaylıklar sunmaktadır. Karayolu ulaştırma politikalarında bu faydaların sürdürülebilir olabilmesi için, iyi planlanmış rehabilitasyon faaliyetlerinin de ulaşım süreçlerinin bir parçası gibi kabul edilmesi gerekmektedir. Yapılan birçok araştırma ve deneyimlerde yol bakımında operasyonel faaliyetlerin ertelenmesi durumunda, doğrudan veya dolaylı olarak daha yüksek düzeylerde maliyetlerin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Türkiye'de karayolu ağının büyük bir kısmını asfalt kaplamalı yollar oluşturmaktadır. Beton yollara göre daha sık rehabilitasyon periyodu gerektiren asfalt kaplamalı yollar için Kocaeli ili özelinde KBB tarafından yıllık ortalama 20 milyon TL düzeyinde bir bütçe asfalt yama için ayrılmaktadır.

SSB teknolojisi büyük ölçüde baraj yapımında kullanılmakla birlikte ülkemizdeki yol yapım uygulamalarında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. SSB, son zamanlarda yerel yönetimler tarafından benimsenmiş ve 2017 verilerine göre şimdiye kadar yaklaşık 225 km uzunluğunda kent içi ve kırsal bölgelerde uygulamalar yapılmıştır.

SSB numune üretimi ve sonuçların değerlendirilmesi konusunda standart bir test prosedürünün olmaması ve SSB saha uygulamalarından elde edilen deneysel çalışmaların sınırlı sayıda olması, literatürdeki bu araştırma sonuçlarının birbirleri ile mukayese edilmesi süreçlerinde birtakım zorluk ve çelişkilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Bu çalışmanın hedeflerinden biri, laboratuvar çalışmalarındaki bu uyumsuzlukların gerçek bir saha uygulaması yapılarak belirginleştirilmesine katkıda bulunmaktır. Ayrıca SSB karışımında geri dönüşümlü agrega kullanımının mekanik ve ekonomik göstergeler üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve Kocaeli ili özelinde karayolu yapımı süreçlerinde kaplama tipine göre ortaya çıkan fayda/maliyet süreçlerinin yaşam döngüsü maliyet analizleri yolu ile tespit edilmesi, çalışmada hedeflenen diğer konuları oluşturmaktadır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre;

➤ Agrega ağırlığının %15 ve %20'si oranında RAP kullanılması durumunda, RAP yüzeyindeki asfalt filmi nedeniyle mekanik özellikler üzerinde azaltıcı etkilerin geliştiği tespit edilmiştir. RAP içerikli SSB karışımları ile yapılan birçok çalışmada, bu karışımların sadece granüler temel veya alttemel düzeyinde kullanılabilmesi bildirilmiştir. Bu çalışmada ise ekonomik göstergelerin birbirine yakın olması istenen durumlarda, karışım içeriğinde %15 oranında 19-4,75 mm boyutunda RAP kullanılması halinde, mekanik özelliklerde bir azalma gerçekleşse bile, BYŞ (2016)'e göre 35 MPa düzeyinde bir beton için yeterli basınç ve çekme gerilmeleri ile 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasında yeterli dayanım gelişmesinin elde edilebileceği görülmüştür. RAP'in iyi derecelendirilmesi durumunda, uygun basınç ve çekme dayanımlarının sağlanabileceği ve SSB üstyapısında kaplama tabakalarında da ağırlıkça %20 düzeyine kadar kullanılabilmesi saptanmıştır.

➤ Farklı zemin koşullarında tekrarlı dingil yüklerinin kaplama tabakasına etki ettirildiği bir KENSLABS uygulamasına göre ise, 1 km x 6,5 m yolda K karışımları ile aynı performans limiti baz alındığında, %20 oranına kadar RAP kullanımı (karışım içeriğindeki agrega maliyetini düşürdüğünden) ortalamada 3900 TL'lik bir kazanç elde edilebileceğini göstermiştir.

➤ Kuruma rötresinde K karışımlarında 112. gün sonunda boy kısalması %0,050 (500 microstrain), %15 ve %20 RAP içerikli karışımlarda ise %0,060 (600 microstrain) düzeyinde tespit edilmiştir. Ağırlık kayıpları ise bütün karışımlarda %2 olarak

kaydedilmiştir. RAP'li karışımlarda kuruma rötresi miktarının bir miktar fazla çıkması, RAP içeriğinde bitümlle kaplı yüzeylerin bir rezervuar oluşturması, bu sayede de büzülme esnasında çimento hamurunun daha kolay deformasyon yapabileceği alanların oluşması ile açıklanabilmektedir.

➤ Karışımlarda UPV değerleri 4600-4900 m/s arasında değişmektedir. RAP içeriğindeki bitümlle kaplı agrega yüzeyinin karışım içeriğindeki boşlukları artırması nedeniyle UPV değerlerinin azaldığı saptanmıştır.

➤ ASTM C666'a uygun 230 lt kapasiteli bir derin dondurucunun kullanıldığı bir donma/çözülme deneyinde, bütün karışımlarda 300 döngü sonunda ortalama %73 düzeyinde bir Durabilite Faktörü tespit edilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslandığında Durabilite Faktörü üzerindeki değişkenlikte, numune üretme konusunda farklı sıkıştırma prosedürlerinin uygulanması ve değişken boyutlarda numuneler kullanılmasının etkili olduğu belirlenmiştir. Test sonuçları, RAP içerikli malzemelerin SSB karışım içeriğinde ağırlıkça %20 düzeyine kadar kullanılması durumunda, donma/çözülme direnci açısından önemli bir farklılık ortaya çıkmadığını göstermiştir. Donma/çözülme olayının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise, eğilme dayanımı için K karışımlarında yaklaşık %7, RAP içerikli karışımlarda ise %17-22 düzeyinde bir azaltıcı etki saptanmıştır.

Sertleşmiş betonda mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla saha ve laboratuvar gibi iki farklı ortamdan elde edilen numunelerin mukayeseli analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre;

➤ UPV açısından şerit ve eksen bölgelerinden alınan numunelerde Laboratuvarda üretilen numunelere kıyasla, yaklaşık olarak %8,2 oranında azaltıcı bir etki tespit edilmiştir. Burada araziden alınan örneklerin daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Eksen ve şerit bölgelerinde ise anlamlı bir farklılık olmadığı görülmektedir. Benzer ilişki yoğunluk üzerindeki %2,3 oranındaki azaltıcı etki ile de görülmüştür.

➤ Laboratuvar ortamında üretilen SSB numunelerinin ilk kırılma hızının 0,0067 mm/s<sup>0,5</sup> ile kaplama gövdesinden alınan numunelere kıyasla %280-307 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Numunelerdeki zamana bağlı doygunluk dereceleri arttıkça 1. gün sonundan itibaren bu seviyeler azalma eğilimine geçmiştir. Laboratuvarda elde edilen SSB numunelerinin geleneksel betona göre daha düşük

kılcallık özelliği gösterdiği, ancak kür koşullarının ve sıkıştırma parametrelerinin arazi koşulları ile değişmesi sonucunda sahadan elde edilen SSB numunelerinde ciddi oranlarda kılcallık artışları gözlemlenebileceği tespit edilmiştir.

➤ Sahadan alınan ve laboratuvarında üretilen numunelerde doğal halde kütlece su emme oranının %1,73 ile %4,07 arasında değiştiği belirlenmiştir. Sertleşmiş betonda bu seviyelerdeki su emme oranlarının durabilite açısından “iyi” sayılabilecek bir düzeyde olduğu saptanmıştır. Porozitenin ise %6,17 ile %12,86 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar ile SSB karışımlarında geçirimsizlik özelliklerinin araştırıldığı diğer çalışmalarla benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır. Sahadan alınan numunelerde laboratuvarında üretilenlere kıyasla %85-86 daha fazla geçirgen boşluk tespit edilmiştir. Burada iki farklı numune grubunda farklı sıkıştırma tekniğinin kullanılması ve tek tabakada farklı kalınlıklarda malzeme sıkıştırılmasının etkili olduğu anlaşılmıştır. Porozitenin artmasıyla yoğunluk düşmekte ( $R^2=0,76$ ), ilk kılcallık hızı ise artmaktadır ( $R^2=0,62$ ). Porozitenin artmasıyla boşluklardaki su hareketi hızlanmıştır. Geçirgen boşlukların zamanla suyla dolması süreci ile ikinci kılcallık hızında porozite ile olan bu ilişkinin kaybolduğu gözlenmiştir.

➤ Kaplama gövdesinden alınan numunelerde ortalama basınç dayanımında 36 MPa (en düşük 31,3 MPa) ve ortalama yarmada çekme dayanımında 3,4 MPa (en düşük 2,8 MPa) düzeyinin tespit edilmesi ile BYŞ (2016)'ya göre C30 sınıfı bir beton için uygun seviyelerin elde edildiği belirlenmiştir. Kaplamadan alınan numunelerin laboratuvarında üretilen numunelerle kıyaslanması durumunda, basınç dayanımında eksen bölgelerinde %32 ve şerit bölgelerinde %19 düzeyinde azaltıcı bir etki tespit edilmiştir. Bu oran yarmada çekme dayanımında sırasıyla %30 ve %9,5 seviyesindedir. Test yolundan alınan numunelere ait deney sonuçlarının daha düşük olmasında, iki örnek arasında kür koşulları, sıkıştırma enerjisi, sıkıştırma tipi ve tek seferde sıkıştırılan malzeme miktarlarının farklı olmasının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Eksen bölgelerinden alınan numunelerin dayanım mertebelerinin şerit bölgelerinden alınanlardan daha düşük olması, iki fazda yapılan şerit imalatları arasında oluşan zaman farkından dolayı meydana gelen soğuk derz ve buna dayalı yapısal süreksizliklerle açıklanabilir. Soğuk derze bağlı düşey faylanma, imalat zaman farkları ve farklı kompaksiyon enerjisinin bu duruma neden olduğu anlaşılmaktadır.

➤ Böhme aşınma deneyi sonuçlarına göre, kaplamadan alınan numunelerde aşınan hacim miktarı  $49 \text{ cm}^2$ 'lik yüzeyde 21,60 ile 26,40  $\text{cm}^3$  arasında değişmektedir.

Laboratuvar ortamında üretilen ve yüzeyleri kesilerek test edilen numunelerde ise 2. Sınıf aşınma direnci, 18,13 cm<sup>3</sup> ile sağlanmış ve test yolunda %25-34 arasında değişen oranlarda daha yüksek aşınma kayıplarının yaşandığı tespit edilmiştir. Kaplamalarda arazöz ile kürleme dışında başka bir metot uygulandığı takdirde (sisleme, telis bezi serme, kimyasal püskürtme vb.) yüzeyde daha sert bir doku oluşması, bu vesileyle de aşınma direncinin artabileceği bu karşılaştırma deneyi sonucunda saptanmıştır.

Son aşamada Kocaeli İl'inde ilk defa uygulamaya koyulan 2,2 km'lik SSB yol için yapılan yaşam döngüsü maliyet analizi sonucunda ise aşağıdaki bulgular ele edilmiştir;

- KBB bütçesiyle gerçekleştirilen SSB test yolu projesi 43,58 TL/m<sup>2</sup> maliyet ile tamamlanmıştır. İlk yapım maliyeti açısından SSB yol, asfalt yola nazaran %39,4 daha ekonomik bir kaplama tipi olmakla birlikte, servis süresi boyunca da %62 oranında bir bakım onarım ekonomikliği sağlamaktadır. Yaşam döngüsü maliyeti açısından ise, SSB yolun asfalt yoldan %46 oranında daha ekonomik bir kaplama alternatifi olduğu görülmektedir.

- Maliyet farklarının zaman içerisinde bu denli artmasında, asfalt yolun bakım onarım faaliyetlerinin daha sık periyotlarda gerçekleşmesi, ilk ciddi onarım faaliyetinin asfaltta 10. ve 20. yılda yapılmasına karşın, SSB kaplamada bu faaliyetin sadece 20. yılda gerçekleşmesi ve asfalt bakım malzemesinin SSB bakım malzemesinden daha pahalı olması etkili olmuştur. Gerçekleşen bu bakım onarım faaliyetlerinin KBB özelinde dikkate alınması ve özellikle altyapısı tamamlanmış kırsal bölgelerde kaplama tercihlerinin SSB olarak belirlenmesi ile ciddi oranlardaki bakım ve onarım bütçelerinin başka kaynaklara aktarılmasının mümkün olabileceği saptanmıştır. KBB bütçesiyle gerçekleştirilen SSB test yolu, iyi tasarlanmış rehabilitasyon stratejileri sayesinde bakım ve onarım bütçelerinin daha efektif bir şekilde kullanılabilceğini, bu sayede de ciddi boyutlarda kamu yararının sağlanabileceğini göstermiştir.

SSB yolun yapımından kısa bir süre sonra otomobil, küçük kamyonet gibi hafif araçlar düşük hızlarda seyahat edebilmişlerdir. Buna karşın, trafik emniyeti açısından yüzey pürüzlülüğünün sağlanabilmesi için bazı noktalarda yüzey işleme (grinding) gerekebileceği tespit edilmiştir. İyi bir aderansın sağlanabilmesi için, eğer soğuk derz yapılmayacaksa, yanyana yapılan şeritler 1 saat içinde serilip sıkıştırılmalıdır. Ayrıca düşük su içeriği nedeniyle sıcak havalarda buharlaşmadaki su kaybına bağlı olarak ilave katkıların kullanılması gibi ek önlemlere ihtiyaç duyulabilir.

Beton üreticileri, Türkiye’de görece yeni bir uygulama olması ve karışım tasarımı aşamasında çeşitli belirsizlikler bulundurması nedeniyle SSB üretimine karşı mesafeli bir duruş sergilemektedirler. Örneğin, karışım tasarımında hangi yasal prosedür ve ulusal şartnamenin baz alınacağı konusunda bilgi ve doküman eksikliği vardır. Kırsal bölgelere 1 saat içerisinde malzemenin nakledilmesi hususunda garantörlük verilmesi, kuru karışım nedeniyle santral üretim kapasitesinin düşmesi ve sıcak aylarda buharlaşma riskinin fazla olması SSB üretimine karar verme sürecini etkilemektedir.

Kalite kontrol süreçlerinde SSB karışımı için “G” Belgesi şartlarının henüz olgunlaşmaması, teknik ve yapım şartnamesi ile birim fiyat kalemlerinin imalat kalemleriyle birebir uyuşmaması, asfalt operatör ve işçilerinin SSB karışımına karşı önyargıları ve tecrübe eksikliği nedeniyle yeterli özeni göstermemesi, kütleme metodolojisi konusundaki belirsizlikler, sınır hattı problemi nedeniyle oluşan zayıflar, asfalt yolla kıyaslandığında daha kalın tabakalarda serildiği için birim boy bazında daha az imalat ve daha fazla finişer şerit değişikliği, gün sonu, gün başı imalatlarında soğuk derzlerdeki artış, buna bağlı olarak seyahat konforunun düşmesi gibi hususlar imalat sırasında ve sonrasında karşılaşılan problemlere örnek olarak verilebilir.

Laboratuvar ve saha çalışmaları sonucunda ise araziden alınan numunelerin Laboratuvarda üretilenlerden düşük mekanik göstergelerde, daha yüksek geçirimsizlik özelliklerinin olabileceğini göstermiştir. Bu bakımdan şartname hazırlayıcılar, karışım tasarımı ve uygulaması konusunda geleneksel beton için kullandıkları güvenlik katsayılarını konu SSB olduğunda daha büyük tutmalıdırlar. Ayrıca RAP’in saha uygulaması için gerekli yasal mevzuatların çıkartılması ve RAP’in nakliyesi, uygun boyutlarda elenmesi gibi konularda yüklenicilere teşviklerin sunulması, hem çevrenin korunması hem de bu çalışma sonucunda ortaya çıkan fayda maliyetlerin etkisinin artmasına vesile olacaktır.



## KAYNAKLAR

AASHO, An Informational Guide on Project Procedures: A Guide for The Review of Certain Administrative, Inspection, and Documentation Practices in Use by State Highway Departments with Particular Attention to Contract Construction, Pavement Type Selection, and Right of Way Acquisition, *American Association of State Highway Officials*, Washington DC., 1960.

AASHTO T238, Standard Method of Test for Density of Soil and Soil-Aggregate In-Place by Nuclear Methods (Shallow Depth), *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington DC., 2013.

AASHTO T27, Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington DC., 2013.

AASHTO T97, Standard Method of Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington DC., 2013.

AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington DC., 1993.

Abut Y., Cankaya T., Beton Yollar: Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Örneği, *Hazır Beton Dergisi*, 2016, **133**, 77-83.

ACI Committee 201, Guide to Durable Concrete, *American Concrete Institute*, Report 201.2R-16, 13-17, 2016.

ACI Committee 207, Report on Roller-Compacted Mass Concrete, *American Concrete Institute*, Report 207.5R, 25-32, 2011.

ACI Committee 309, Behavior of Fresh Concrete During Vibration, *American Concrete Institute*, Report 309.1R, 36-53, 1981.

Andersson R., Swedish Experience with RCC, *Concr. Intl.*, 1987, **9**, 18-24.

Arulrajah A., Disfani M., Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Prongmanee N., Physical Properties and Shear Strength Responses of Recycled Construction and Demolition Materials in Unbound Pavement Base/Subbase Applications, *Construction and Building Materials*, 2014, **58**, 245–257.

ASTM C1170 / C1170M, Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C1260, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C1435, Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C490, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM C78 / C78M, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM D1557, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)), *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken-PA, 2017.

Bennert T., Papp Jr W.J., Maher A., Gucunski N., Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications, Transportation Research Record, *Journal of the Transportation Research Board*, 2000, **1714**, 33–39.

Bilodeau K., Sauzéat C., Di Benedetto H., Olard F., Bonneau D., Laboratory and In Situ Investigations of Steel Fiber Reinforced Compacted Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement, *90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington DC., USA, 23-27 January 2011.

Bilodeau K., Sauzéat C., Di Benedetto H., Olard F., Bonneau D., Roller Compacted Concrete for Road Base Layer with RAP and Steel Fibers: Viscous Properties and Description of Experimental Sites, Proc., *10th International Conference on Concrete Pavements*, Quebec City, Quebec, Canada, 8-12 July, 2012.

BS 812-105, Testing Aggregates: Methods for Determination of Particle Shape, Flakiness Index, *British Standard*, London, 1989.

BYŞ-2016, Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 2016.

CAN/CSA-A23.2-8C-14, Flexural Strength of Concrete (Using a Simple Beam with Thrid Point Loading), *Canadian Standards Association*, Toronto, 2014.

CEB Committee, Diagnosis and Assessment of Concrete Structures (State of Art Report), *Comité Euro-international du Béton (CEB)*, 192, 5-83, 1989.

Courard L., Michel F., Delhez P., Use of Concrete Road Recycled Aggregates for Roller Compacted Concrete, *Construction and Building Materials*, 2010, **24**, 390–395.

Cross S.A., Parsons R.L., Evaluation of Expenditures on Rural Interstate Pavements in Kansas, *81th Annual TRB Meeting*, Washington DC, USA, 13-17 January 2002.

Damrongwiriyanupap N., Liang Y.C., Xi Y., Application of Roller Compacted Concrete in Colorado's Roadways, *Colorado Department of Transportation (CDOT)*, CDOT-2012-11, 8-17, 2012.

Del Rey I., Ayuso J., Barbudo A., Galvin A.P., Agrela F., de Brito J., Feasibility Study of Cement-Treated 0–8 mm Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste as Road Base Layer, *Road Materials and Pavement Design*, DOI:10.1080/14680629.2015.1108221.

Delagrave A., Marchand J., Pigeon M., Boisvert J., Deicer Salt Scaling Resistance of Roller Compacted Concrete Pavements, *ACI M.J.*, 1997, **94**, 164-169.

Delatte N., Amer N., Storey C., Improved Management of RCC Pavement Technology, *The University of Alabama, Department of Civil and Environmental Engineering*, UTCA-01231, 11-19, 2003.

Delatte N., Simplified Design of Roller-Compacted Concrete Composite Pavement, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, DOI:10.3141/1896-06.

Demirel A., Kocaeli İlinde Ana Toplu Taşıma Sisteminin Seçimi İçin Alternatifleri Karşılaştırmalı Analizi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2015, 398884.

Dias W.P.S., Influence of Drying on Concrete Sorptivity, *Mag. of Concr. Res.*, 2004, **56**, 537-543.

Dolch W.L., *Concrete Admixtures Handbook Properties Science and Technology*, 2nd ed., Noyes Publication, Ottawa, 1995.

EN 1097-2, Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 2: Methods for The Determination of Resistance to Fragmentation, *European Standard*, Brussels, 2010.

EN 1097-6, Test for Mechanical and Physical Properties of Aggregates – Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption, *European Standard*, Brussels, 2007.

EN 1097-8, Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 8: Determination of The Polished Stone Value, *European Standard*, Brussels, 2009.

EN 12390-3, Concrete Testing-Hardened Concrete – Part 3: Compressive Strength Test Samples, *European Standard*, Brussels, 2010.

EN 12390-6, Concrete Testing-Hardened Concrete – Part 3: Split Tensile Strength Test Samples, *European Standard*, Brussels, 2010.

EN 12390-6, Concrete Testing-Hardened Concrete – Part 4: Flexural Strength Test Samples, *European Standard*, Brussels, 2010.

EN 1338, Concrete Paving Blocks, Requirements and Test Methods, *European Standard*, Brussels, 2003.

EN 1367-2, Tests for Thermal and Weathering Properties of Aggregates - Part 2: Magnesium Sulfate Test, *European Standard*, Brussels, 2009.

EN 197-1, Cement, Part1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, *European Standard*, Brussels, 2010.

EN 933-9, Tests for Geometrical Properties of Aggregates - Part 9: Assessment of Fines, Methylene Blue Test, *European Standard*, Brussels, 2013.

Fentress B., Slab Construction Practice Compared by Wear Tests, *ACI Journal*, 1973, **7**, 486-491.

Ferrebee E.C., Brand A.S., Kachwalla A.S., Roesler J.R., Gancarz D.J., Pforr J.E., Fracture Properties of Roller-Compacted Concrete with Virgin and Recycled Aggregates, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, DOI:10.3141/2441-17.

Ghafoori N., Cai Y., Laboratory Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash: Part II- Long Term Durability, *ACI M.J.*, 1998, **95**, 244-251.

- Gharaibeh N.G., Darter M., Probabilistic Analysis of Highway Pavement Life for Illinois, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, DOI:10.3141/1823-13.
- Haas R., Tighe S., Falls L.C., Determining the Return on Long Life Pavement Investments, *85th Annual TRB Meeting*, Washington DC., USA, 22-26 January 2006.
- Hansen K.D., Reinhardt W.G., *Roller Compacted Concrete Dams*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1991.
- Harrington D., Abdo F., Adaska W., Hazaree C., Guide for Roller Compacted Concrete Pavements, *National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University*, 1700.7(8-72), 3-81, 2010.
- Hazaree C.V., Transport Properties and Freeze-Thaw Resistance of Roller Compacted Concrete (RCC) for Pavement Applications, Retrospective Theses and Dissertations, Iowa State University, Iowa, 2007.
- Huang Y.H., *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed., Pearson-Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- Hutchinson R.L., Ragan S.A., Pittman D.W., Heavy Duty Pavements, *Concr. Intl.*, 1987, **9**, 55-61.
- IS 13311-1, Method of Non-Destructive Testing of Concrete Part 1: Ultrasonic Pulse Velocity, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi, 1992.
- Jingfu K., Chuncui H., Zhenli Z., Strength and Shrinkage Behaviors of Roller Compacted Concrete with Rubber Additives, *Materials and Structures*, 2009, **42**(8), 1117-1124.
- Jittbodee K., Somnuk T., Vibration Consistency Prediction Model for Roller Compacted Concrete, *ACI Mater.*, 2003, **100**(1), 3-13.
- Keçeci A., Türkiye’de Karayolu Taşımacılığı, *Uluslararası Ekonomik Sorunlar*, 2006, **20**, 16-20.
- Kenis W.J., Predictive Design Procedures VESYS Users Manual, *Federal Highway Administration*, RD-77-154, 7-19, 1978.
- Kettle R., Sadegzadeh M., The Influence of Construction Procedures on Abrasion Resistance, *ACI SP-100 Concrete Durability*, 1987, **2**, 1385-1410.
- Khayat K.H., Libre N.A., Roller Compacted Concrete: Field Evaluation and Mixture Optimization, *Missouri University of Science and Technology*, NUTC R363, 9-37, 2014.
- Khunthiongkeaw J., Tangtermsirkul S., Vibration Consistency Prediction Model For Roller Compacted Concrete, *ACI M.J.*, 2003, **100**, 3-13.

Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (KBB), 2010-2016 Yılları Faaliyet Raporları, *Mali Hizmetler Dairesi Başkanlığı, Bütçe ve Stratejik Yönetim Şube Müdürlüğü*, 1-98, 2016.

Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (KBB), 2015-2019 Stratejik Planı, *Mali Hizmetler Dairesi Başkanlığı, Bütçe ve Stratejik Yönetim Şube Müdürlüğü*, 44-91, 2016.

Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (KBB), 2017 Mali Yılı Performans Programı, *Mali Hizmetler Dairesi Başkanlığı, Bütçe ve Stratejik Yönetim Şube Müdürlüğü*, 33-180, 2017.

Kokubu K., Cabrera J.G., Ueno A., Compaction Properties of Roller Compacted Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 1996, **18**, 109-117.

Kokubu K., Ueno A., Kondoh T., Studies on Compactibility and Its Tests Method of Extremely Dry Concrete Used For Roller Compacted Concrete Pavements, *Fifth Intl. Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, Indiana, USA, 20-22 April 1993.

Kokubu K., Ueno A., Mix Design of Extremely Dry Concrete Evaluated by Consolidation Effort, *Concrete Library of JSCE*, 1996, **28**, 129-141.

KTŞ-2013, Karayolu Teknik Şartnamesi, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 2013.

Kuzu T., Hara J., Kokubu K., Study on Resistance to Freezing and Thawing of Roller-Compacted Concrete, *Proceedings of JCI*, 1990, **12**(1), 697-702.

Lee E., Harvey J., Samadian M., Knowledge-Based Scheduling Analysis Software for Highway Rehabilitation and Reconstruction Projects, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, DOI:10.3141/1907-03.

Lindley J.K., Clark P.R., Adjustments to Pavement Life-Cycle Cost Analysis Procedures, *University Transportation Center for Alabama*, UTCA-02409, 13-45, 2003.

Liu T.C., Performance of Roller Compacted Concrete-Corps of Engineers Experience, Durability of Concrete, *ACI Special Publication SP-126*, 1991, **1**, 155-167.

Liu T.C., Tatro S.B., Performance of Roller Compacted Concrete Dams, *Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete*, 1995, **2**, 1189-1201.

Lopez-Uceda A., Agrela F., Cabrera M., Ayuso J., López M., Mechanical Performance of Roller Compacted Concrete with Recycled Concrete Aggregates, *Road Materials and Pavement Design*, DOI:10.1080/14680629.2016.1232659.

Lowe J., Roller Compacted Concrete Dams - An Overview, *Proceedings of RCC Specialty Conference*, 1988, **1**, 1-20.

Marchand J., Boisvert J., Tremblay S., Maltais J., Pigeon M., Air Entrainment in No-Slump Mixes, *Concr. Intl.*, 1998, **20**, 38-44.

Marchand J., Hornain H., Diamond S., Pigeon M., Guiraud H., The Microstructure of Dry Concrete Products, *Cem. Concr. Res.*, 1996, **26**, 427-438.

Marchand J., Pigeon M., Isabelle H.L., Boisvert J., Freeze-Thaw Durability and Deicer Salt Scaling Resistance of Roller Compacted Concrete Pavements, *ACI Special Publication*, 1990, **122**, 217-236.

Mardani-Aghabeglou A., Andiç-Çakır Ö., Ramyar K., Freeze–Thaw Resistance and Transport Properties of High-Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete Designed by Maximum Density Method, *Cement & Concrete Composites*, 2013, **37**, 259–266.

Mehta P.K., Monteiro P.J.M., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2006.

Modarres A., Hosseini Z., Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete Containing Rice Husk Ash With Original and Recycled Asphalt Pavement Material, *Materials and Design*, 2014, **64**, 227–236.

Nanni A., Meamarian N., Laboratory Consolidation Methods Applied To Compacted Concrete For Pavements, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 1993, **5**, 137-143.

Neville A., *Concrete Technology*, 2nd ed., Longman, UK, 2010.

Nguyen M.L., Balay J.M., Sauzéat C., Di Benedetto H., Bilodeau K., Olard F., Ficherouille B., Accelerated Pavement Testing Experiment of Pavement Made of Fiber-Reinforced Roller-Compacted Concrete, *Advances in Pavement Design Through Full-Scale Accelerated Pavement Testing*, DOI:10.1201/b13000-40.

Ozbay K., Parker N.A., Jawad D., Hussain S., Guidelines for Life Cycle Cost Analysis, *Federal Highway Administration*, NJ-2003-012, 17-55, 2003.

Özcan S., Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Farklı Yastık Karışımları ile Yapışma Verimliliği, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 238414.

Öztürk A., Yıldız D., Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj Teknolojisi ve Türkiye'deki Uygulamaları, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 1998, **393**, 39-46.

Packard R.G., Tayabji S.D., New PCA Thickness Design Procedure for Concrete Highway and Street Pavements, *Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, Indiana, USA, 23-25 April 1985.

Pei-wei G., Sheng-xing W., Ping-hua L., Zhong-ru W., Ming-shu T., The Characteristics of Air Void and Frost Resistance of RCC with Fly Ash and Expansive Agent, *Constr Build Mater*, 2006, **20**(8), 586–90.

Perez P., Agrela F., Herrador R., Ordonez J., Application of Cement-Treated Recycled Materials in The Construction of A Section of Road in Malaga, Spain, *Construction and Building Materials*, 2013, **44**, 593–599.

Pigeon M., Marchand J., Frost Resistance of Roller Compacted Concrete, *Concrete International*, 1996, **18**, 22-26.

Pigeon M., Pleau R., *Durability of Concrete In Cold Climates*, *Modern Concrete Technology 4*, 1st ed., E&FN SPON, UK, 1995.

Piggott R.W., Roller Compacted Concrete Pavements: A Study of Long Term Performance, *Portland Cement Association*, PCA-2261, 15-56, 1999.

Pittman D.W., Anderton G.L., The Use of Roller-Compacted Concrete Pavements in The United States, *Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Torino, Italy, 8-10 July 2009.

Pittman D.W., Development of a Design Procedure for Roller-Compacted Concrete (RCC) Pavements, PhD Dissertation, University of Texas at Austin, Texas, 1993.

Pittman D.W., Ragan S.A., Drying Shrinkage of Roller Compacted Concrete for Pavement Applications, *ACI M.J.*, 1998, **95**, 19-26.

Poole T.S., Guide for Curing of Portland Cement Concrete Pavements - Final Report, *Federal Highway Administration*, FHWA-RD-02-099, 25-32, 2005.

Portland Cement Association (PCA), Guide Specification for Construction of Roller Compacted Concrete Pavements, *Portland Cement Association*, IS009, 1-14, 2004.

Portland Cement Association (PCA), Roller-Compacted Concrete for Embankment Armoring and Spillway Projects Guide for Developing RCC Specifications, *Portland Cement Association*, IS00, 12-13, 2000.

Portland Cement Association (PCA), Roller-Compacted Concrete Pavements for Highways and Streets, *Portland Cement Association*, IS328, 22-35, 2005.

Portland Cement Association (PCA), Structural Design for Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements, Concrete Information, *Portland Cement Association*, IS233.01, 25-34, 1987.

Ragan S.A., Evaluation of The Frost Resistance of Roller Compacted Concrete Pavements, *US Army Corps of Engineers*, SL-86-16, 17-22, 1986.

Reeves G.N., Yates, L.B. Jr., Simplified Design and Construction Control for Roller Compacted Concrete, *A Symposium of ASCE Convention*, Colorado, USA, 1-2 May 1985.

Ryall M.J., *Bridge Management*, 1st ed., Butterworth - Heinemann, Boston, 2001.

Sachet T., Albuquerque M.F.C., Balbo J.T., Sansone C.E., Investigation of Resistance and Fracture Parameters for Compacted Concrete with Incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement, *International Journal of Pavements*, 2011, **10**(1-3), 83-93.



Sachet T., Balbo J.T., Bonsembiante F.T., Rendering the Loss of Strength in Dry Concrete with Addition of Milled Asphalt Through Microscopic Analysis, *Structures and Materials Journal*, 2013, **6**(6), 933–954.

Sağlık A., Güngör A.G., *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*, 2. Baskı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2008.

Settari C., Debieb F., Kadri E.H., Boukendakdji O., Assessing the Effects of Recycled Asphalt Pavement Materials on the Performance of Roller Compacted Concrete, *Construction and Building Materials*, 2015, **101**, 617–621.

Şengün E., Alam B., Sevin H.L., Aytaç A.H., Yaman İ.O., Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yolların Saha ve Laboratuvar Mekanik Performansının Karşılaştırılması, *Hazır Beton Kongresi ve Beton, Agregası, İnşaat Teknolojileri ve Ekipmanları Fuarı*, İstanbul, Türkiye, 13-14 Nisan 2017.

Tasdemir C., Combined Effect of Mineral Admixtures and Curing Conditions on the Sorptivity Coefficient of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 2003, **33**(10), 1637-1642.

Transportation Research Board (TRB), Guide for Pavement-Type Selection, *The National Academies Press*, NCHRP-703, 56-70, 2011.

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Cari Açığın İlacı Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar, *TÇMB Eğitim Müdürlüğü*, 1-3, 2017.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Roller Compacted Concrete Pavement Design and Construction, Engineer Technical Letter, *Department of the Army*, 1110-3-475, 12-26, 1995.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Roller-Compacted Concrete, *Department of the Army*, 1110-2-2006, 1-12, 2000.

URL-1: <http://ecolanes.shef.ac.uk/>, (Ziyaret tarihi: 8 Mart 2017).

URL-2: <http://www.havaturkiye.com/>, (Ziyaret tarihi: 8 Mart 2017).

Walls J., Smith M.R., Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design—Interim Technical Bulletin, *Federal Highway Administration*, FHWA-SA-98-079, 9-32, 1998.

Wathne L., Pavement Type Selection: What Is The Ideal Process? *12th International Symposium on Concrete Roads*, Prague, Czech Republic, 23–26 September 2014.

Whiting D., Air Contents and Air Void Characteristics of Low-Slump Dense Concretes, *ACI M.J.*, 1985, **82**, 716-723.

Xuan D.X., Houben L.J.M., Molenaar A.A.A., Shui Z.H., Mixture Optimization of Cement Treated Demolition Waste with Recycled Masonry and Concrete, *Materials and Structures*, 2012, **45**, 143–151.

Yaman İ.Ö., Ceylan H., Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar, *Hazır Beton Kongresi ve Beton, Agregası, İnşaat Teknolojileri ve Ekipmanları Fuarı*, İstanbul, Türkiye, 21-23 Şubat 2013.

Zimmerman K.A., Smith K.D., Grogg M.G., Applying Economic Concepts from Life-Cycle Cost Analysis to Pavement Management Analysis, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, DOI:10.3141/1699-08.





**EKLER**

Ek – A

Main Screen

Data Path:  Filename:

# KENPAVE

## A Computer Package for Pavement Analysis and Design

Developed by Dr. Yang H. Huang, P.E.  
Professor Emeritus of Civil Engineering  
University of Kentucky  
Lexington KY 40506-0281

*Asphalt*

*Concrete*

Click help for information on the use of this Main Screen.

Şekil A.1. KENPAVE program arayüzü

General Information of SLABSINP

TITLE

Type of foundation (0=liquid, 1=solid, 2=layer)	(NFOUND)	1
Damage analysis (0=no, 1=PCA criteria, 2=user specified)	(NDAMA)	1
Number of periods per year	(NPY)	1
Number of load groups	(NLG)	1
Number of slab layers	(NLAYER)	1
Bond between two slab layers (0=unbonded, 1=bonded)	(NBOND)	0
Number of slabs	(NSLAB)	1
Number of joints	(NJOINT)	0
Nodal number for checking convergence	(NNCK)	80
Number of nodes for stress printout	(NPRINT)	3
Number of nodes on X axis of symmetry	(NSX)	8
Number of nodes on Y axis of symmetry	(NSY)	8
More detailed printout (0=no, 1=yes)	(MDPO)	1
Number of nodes with different thicknesses of slab layer 1	(NAT1)	0
Number of nodes with different thicknesses of slab layer 2	(NAT2)	0
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	1

**Default options are shown by the black dots. If not true, please click the other button.**

with uniform load  
 without uniform load

with temperature gradient and/or checking contact  
 without temperature gradient and/or checking contact

with concentrated load  
 without concentrated load

*Data Set 1*

(1) This form appears when the 'General' menu on the Main Menu of SLABSINP is clicked. To read this textbox more easily with more lines in sight, you may want to resize this form by moving it up and dragging the bottom boundary down. If you want to use the PgDn key to scroll down the page, you must click this textbox first to make it active, as indicated by the blinking cursor. When creating a new file, this form must be entered

Şekil A.2. Genel bilgi ekranı

Curling and Contact Conditions

Number of nodes not in contact	(NOTCON)	0
Number of nodes with initial gaps	(NGAP)	0
Input of gaps from previous problem (1=yes, 0=no)	(INPUT)	0
Temperature curling (1=yes, 0=no)	(NTEMP)	0
Weight of slabs (1=yes, 0=no)	(NWT)	0
Maximum number of cycles for checking contact	(NCYCLE)	1
Temperature differential between top and bottom in C	(TEMP)	0
Coefficient of thermal expansion per C	(CT)	0.000009
Tolerance for iteration	(DEL)	0.001
Maximum allowable deflection in cm	(FMAX)	2.54

(1) This form appears when the 'Curling' menu on the Main Menu of SLABSINP is clicked. You can override the default by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one textbox to the next or just click on the box before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to use the PgDn key to read the remaining text, instead of the scrollbar, please click this textbox to make it active.

(2) NOTCON (total number of nodes assumed initially not in contact): A maximum of 120 nodes can be specified. If NCYCLE = 1, these nodes will never be in contact. If NCYCLE > 1 and NFOUND = 0, these nodes may or may not be in contact depending on the calculated results. However, for solid

*Data Set 1*

Şekil A.3. Kıvrılma etkisi ve diğer fiziksel koşulların belirlenmesi

X Coordinates of Grid for Slab No. 1

Unit	cm
Sequence	X
1	0
2	12.5
3	25
4	37.5
5	50
6	75
7	100
8	150

(1) This form appears when the slab button on the X Coordinates of Each Slab is clicked. The number of X coordinates on this form is equal to NX, as specified in the 'Arrange' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not at the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. you can also use the up and down arrow keys to make

*Data Set 1*

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

Şekil A.4. X eksenine göre simetri noktaları

Y Coordinates of Grid for Slab No. 1

Unit	cm
Sequence	Y
1	0
2	12.5
3	25
4	37.5
5	50
6	75
7	100
8	150

(1) This form appears when the slab button on the Y Coordinates of Each Slab is clicked. The number of Y coordinates on this form is equal to NY, as specified in the 'Arrange' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not at the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. you can also use the up and down arrow keys to make

**Print** *Data Set 1*

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

**OK**

Şekil A.5. Y eksenine göre simetri noktaları

Thickness, Poisson's Ratio, Young's Modulus, and Unit Weight of Concrete

Unit	cm	kPa	
Layer No.	T	PR	YM
1	12.5	.241	2.91E+07

(1) This form appears when the 'Properties' menu on the Slab Information is clicked. The slab may have two layers, one for a concrete surface course and the other for a concrete base course. If there is only one layer of concrete, or N LAYER = 1, layer 2 will not be shown. After typing in the data, press the 'Enter' key to make it effective.

(2) T (thickness of each slab layer): If the thickness is not uniform, this is the thickness for the uniform part, while the nodal number and thickness for the non-uniform part will be read later.

(3) PR (Poisson's ratio of each slab layer).

(4) YM (Young's modulus of each slab layer).

(5) GAMA (unit weight of each layer): This unit weight is used to compute the nodal forces when NWT = 1. This column for GAMA will not be shown when NWT = 0.

**Print** *Data Set 1*

**OK**

Şekil A.6. Rijit plak özellikleri (kalınlık, Poisson oranı, elastisite modülü)

Loaded Areas for Load Group No. 1

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

Unit		cm	cm	cm	cm	kPa
Load Sequence	LS	XL1	XL2	YL1	YL2	QQ
1	1	0	13.47	0	13.47	552

(1) This auxiliary form appears automatically when NUDL of a given line is typed on the main form. For an existing file, you can enter this auxiliary form by double clicking the given line on the main form.

(2) LS (slab number on which the load is applied).

(3) XL1 (left limit of loaded area in x local coordinate).

(4) XL2 (right limit of loaded area in x local coordinate).

(5) YL1 (lower limit of loaded area in y local coordinate).

(6) YL2 (upper limit of loaded area in y local coordinate).

(7) QQ (tire contact pressure of each loaded area).

(8) After typing the data in a cell, be sure to press the Enter or

*Data Set 1*

Şekil A.7. Dingil yükü konsantrasyonu ve büyüklüğünün belirlenmesi

Nodes for Printout

Sequence	NP
1	1
2	9
3	17

(1) This form appears when the 'Node Printout' menu on the Other Optional Information is clicked. The number of lines, or nodes, is equal to NP specified in the 'General' menu.

(2) NP (nodal number at which stresses are computed and printed): For damage analysis with NPRINT = 3, the nodal number of these three points will be computed automatically by the computer, if the finite element mesh is similar to that shown in Example SLA4. Based on the stresses at these three points, the program will determine whether the axle loading is single, tandem or tridem and apply the analysis methods illustrated in Figures 3.3 and 3.4, p. 99.

(3) After typing in the data, be sure

*Data Set 1*

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

Şekil A.8. Referans alınan noktalar

Nodes on X Axis of Symmetry

Sequence	NODSX
1	1
2	9
3	17
4	25
5	33
6	41
7	49
8	57

(1) This form appears when the 'Node X Symmetry' menu on the Other Optional Information is clicked. The number of lines, or nodes, is equal to NSX specified in the 'General' menu.

(2) NODSX (nodal number on the x axis of symmetry): If the x axis of symmetry is along a joint, use any one of the node on the x axis.

(3) After typing the data in the cell, be sure to press the Enter or arrow key to make it effective.

(4) You can delete a line, or one node, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>-<Del> keys. The NSX in the 'General' menu will be automatically reduced by 1.

**Print** *Data Set 1*

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

**OK**

Şekil A.9. X eksenine göre simetri alınan noktalar

Nodes on Y Axis of Symmetry

Sequence	NODSY
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8

(1) This form appears when the 'Node Y Symmetry' menu on the Other Optional Information is clicked. The number of lines, or nodes, is equal to NSY specified in the 'General' menu.

(2) NODSY (nodal number on the y axis of symmetry): If the y axis of symmetry is along a joint, use any one of the node on the y axis.

(3) After typing the data in the cell, be sure to press the Enter or arrow key to make it effective.

(4) You can delete a line, or one node, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>-<Del> keys. The NSY in the 'General' menu will be automatically reduced by 1.

**Print** *Data Set 1*

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

**OK**

Şekil A.10. Y eksenine göre simetri noktaları



Solid Foundation

Young's modulus of subgrade in kPa	(YMS)	138000
Poisson's ratio of subgrade	(PRS)	0.4

(1) This form appears when NFOUND = 1 and the 'Foundation' menu on the Main Menu of SLABSINP is clicked. There are only two entries on this form.

(2) You can delete the default by the Del key and then type in the textbox. To move the cursor to the next textbox, use the Tab key or just click on the textbox before typing in the value of PRS.

(3) If you want to print this text, you can click the print button below at the left corner.

(4) after completion, click 'OK' to return to the Main Menu of SLABSINP

Data Set 0

Şekil A.11. Zemin koşullarının belirlenmesi

Strength and Fatigue Coefficients of Each Slab Layer

Unit	kPa
Layer No.	PMR
1	5410

(1) This form appears when the 'Fatigue Properties' menu on the Damage Analysis is clicked. The slab may have two layers, one for a concrete surface course and the other for a concrete base course. If there is only one layer of concrete, or N LAYER = 1, layer 2 will not be shown. After typing in the data, press the 'Enter' key to make it effective.

(2) PMR (modulus of rupture of pavement slab)

(3) F1 (fatigue coefficient): This is the intercept of log of allowable number of repetitions vs stress ratio curve, i.e. the log of allowable number of load repetitions when the stress ratio is 0. This column disappears when NDAMA = 1.

(4) F2 (fatigue exponent): This is the slope of log number of allowable number of repetitions versus stress ratio curve. This column

Data Set 1

Şekil A.12. Rijit plak için eğilme mukavemeti

Load Repetition for Period No. 1

Load Group	TNLR
1	1000000000

(1) This form appears when the period button on the Load Repetitions of each period is clicked. The number of load groups on this form is equal to NLG, as specified in the 'General' menu.

(2) TNLR (total number of load repetitions for each load group during each period).

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line, or one load group, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>-<Del> keys. The NLG in the 'general' menu will be automatically reduced by 1.

(5) You can add a new line, or one load

*Data Set 1*

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

Şekil A.13. Sonsuz büyüklükte dingil yükü etkisi

```

BETON2

INPUT FILE NAME -E:\ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENT\paper)\BETON2.TXT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -TEXTYENI

TYPE OF FOUNDATION (NFOUND) = 1
TYPE OF DAMAGE ANALYSIS (NDAMA) = 1
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOTAL NUMBER OF SLABS (NSLAB) = 1
TOTAL NUMBER OF JOINTS (NJOINT) = 0

ARRANGEMENT OF SLABS
SLAB NO. NO. NODES (NX) IN X DIRECTION NO. NODES (NY) IN Y DIRECTION JOINT NO. AT FOUR SIDES (JONO)
LEFT RIGHT BOTTOM TOP
1 8 8 0 0 0 0

NUMBER OF LAYERS (NLAYER)-----= 1
NODAL NUMBER USED TO CHECK CONVERGENCE (NNCK)-----= 80
NUMBER OF NODES NOT IN CONTACT (NOTCON)-----= 0
NUMBER OF GAPS (NGAP)-----= 0
NUMBER OF POINTS FOR PRINTOUT (NPRINT)-----= 3
CODE FOR INPUT OF GAPS OR PRECOMPRESSIONS (INPUT)- -----= 0
BOND BETWEEN TWO LAYERS (NBOND)-----= 0
CONDITION OF WARPING (NTEMP)-----= 0
CODE INDICATING WHETHER SLAB WEIGHT IS CONSIDERED (NWT)-----= 0
MAX NO. OF CYCLES FOR CHECKING CONTACT (NCYCLE)-----= 1
NUMBER OF ADDITIONAL THICKNESSES FOR SLAB LAYER 1 (NAT1)-----= 0
NUMBER OF ADDITIONAL THICKNESSES FOR SLAB LAYER 2 (NAT2)-----= 0
NUMBER OF POINTS ON X AXIS OF SYMMETRY (NSX)-----= 8
NUMBER OF POINTS ON Y AXIS OF SYMMETRY (NSY)-----= 8
MORE DETAILED PRINTOUT FOR EACH CONTACT CYCLE (MDPO)-----= 1
TOLERANCE FOR ITERATIONS (DEL)-----= 0.001
MAXIMUM ALLOWABLE VERTICAL DISPLACEMENT (FMAX)-----= 2.54

SYSTEM OF UNITS (NUNIT)-----= 1
Length in cm, force in kN, stress in kPa, unit weight in kN/m^3
subgrade and dowel K value in MN/m^3, and temperature in C

MODULUS OF RUPTURE OF LAYER 1 (PMR(1))-----= 5410
MODULUS OF RUPTURE OF LAYER 2 (PMR(2))-----= 0

FOR SLAB NO. 1 COORDINATES OF FINITE ELEMENT GRID ARE:
X = 0 12.5 25 37.5 50 75 100 150
Y = 0 12.5 25 37.5 50 75 100 150

LAYER THICKNESS (T) POISSON'S YOUNG'S
NO. RATIO (PR) MODULUS (YM)
1 12.50000 0.24100 2.910E+07

Sayfa 1

```

Şekil A.14. Analiz çıktısı (1)

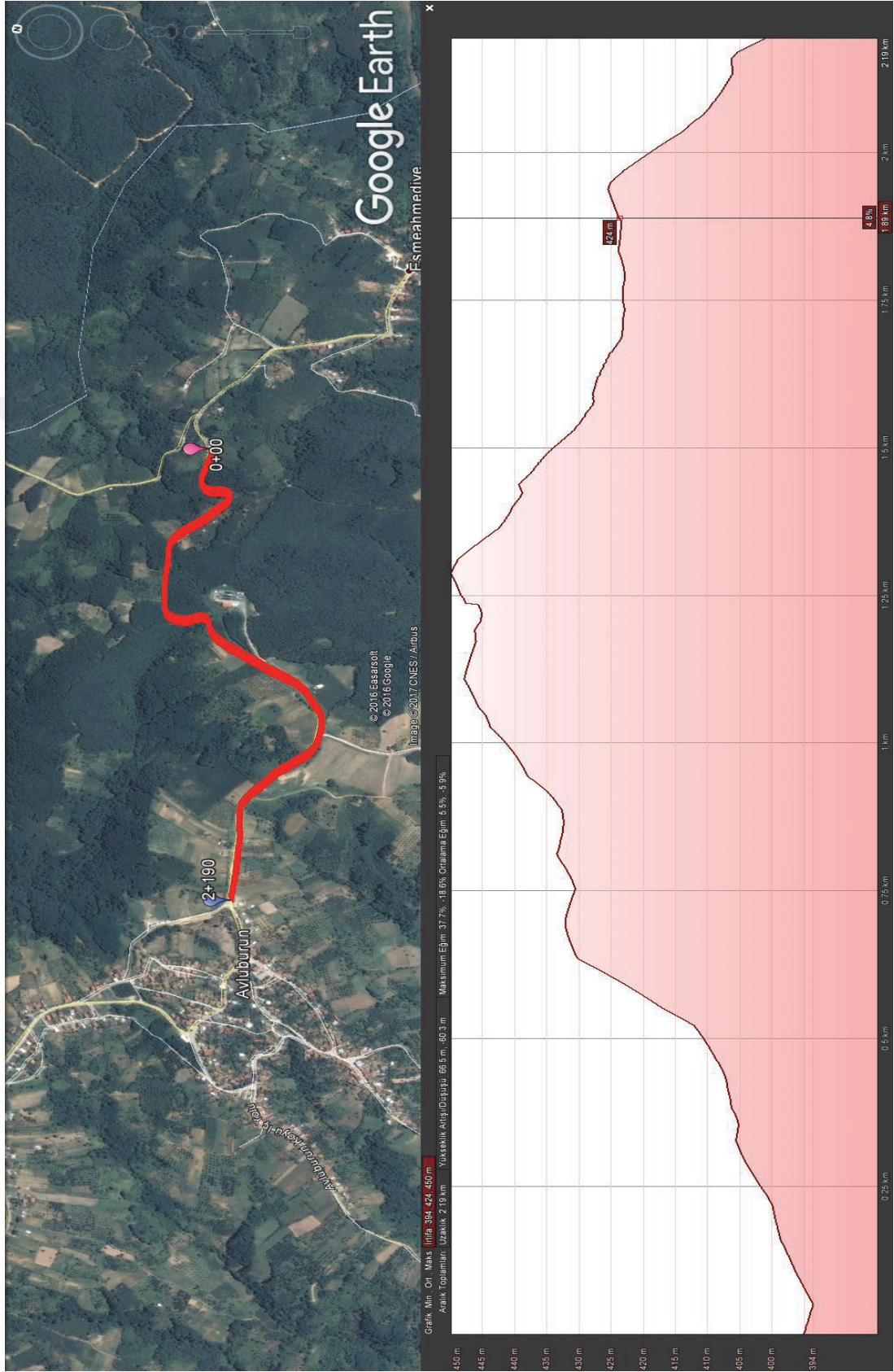
BETON2								
No. OF LOADED AREAS (NUDL) FOR EACH LOAD GROUP ARE: 1								
NO. OF NODAL FORCES (NCNF) AND MOMENTS (NCMX AND NCMY) ARE: 0 0 0								
FOR LOAD GROUP NO. 1 LOADS ARE APPLIED AS FOLLOWS:								
SLAB NO.	X COORDINATES		Y COORDINATES		INTENSITY			
(LS)	(XL1)	(XL2)	(YL1)	(YL2)	(QQ)			
1	0.00000	13.47000	0.00000	13.47000	552.00000			
NODES FOR STRESS PRINTOUT (NP) ARE: 1 9 17								
NODES ON X AXIS OF SYMMETRY (NODSX) ARE: 1 9 17 25 33 41 49 57								
NODES ON Y AXIS OF SYMMETRY (NODSY) ARE: 1 2 3 4 5 6 7 8								
FOUNDATION ADJUSTMENT FACTOR (FSAF) FOR EACH PERIOD ARE: 1								
YOUNG'S MODULUS OF FOUNDATION (YMS) = 138000								
POISSON'S RATIO OF FOUNDATION (PRS) = 0.4								
SLAB NO., INITIAL NODAL NUMBER(INITNP), LAST NODAL NUMBER(LASTNP), INITIAL ELEMENT NO.(INITEN), AND LAST ELEMENT NO.(LASTEN) ARE:								
1	1	64	1	49				
LOADS ARE APPLIED ON THE ELEMENT NO.(NE) WITH COORDINATES(XDA AND YDA)								
1	-1.000	1.000	-1.000	1.000	0.055			
2	-1.000	1.000	-1.000	-0.845	0.055			
8	-1.000	-0.845	-1.000	1.000	0.055			
9	-1.000	-0.845	-1.000	-0.845	0.055			
FOR PERIOD 1 TOTAL NO. OF LOAD REPETITIONS (TNLR) FOR EACH LOAD GROUP ARE: 1E+09								
THE GLOBAL COORDINATES (XO AND YO) OF EACH NODE ARE:								
1	0.000	0.000	2	0.000	12.500	3	0.000	25.000
4	0.000	37.500	5	0.000	50.000	6	0.000	75.000
7	0.000	100.000	8	0.000	150.000	9	12.500	0.000
10	12.500	12.500	11	12.500	25.000	12	12.500	37.500
13	12.500	50.000	14	12.500	75.000	15	12.500	100.000
16	12.500	150.000	17	25.000	0.000	18	25.000	12.500
19	25.000	25.000	20	25.000	37.500	21	25.000	50.000
22	25.000	75.000	23	25.000	100.000	24	25.000	150.000
25	37.500	0.000	26	37.500	12.500	27	37.500	25.000
28	37.500	37.500	29	37.500	50.000	30	37.500	75.000
31	37.500	100.000	32	37.500	150.000	33	50.000	0.000
34	50.000	12.500	35	50.000	25.000	36	50.000	37.500
37	50.000	50.000	38	50.000	75.000	39	50.000	100.000
40	50.000	150.000	41	75.000	0.000	42	75.000	12.500
43	75.000	25.000	44	75.000	37.500	45	75.000	50.000
46	75.000	75.000	47	75.000	100.000	48	75.000	150.000
49	100.000	0.000	50	100.000	12.500	51	100.000	25.000
52	100.000	37.500	53	100.000	50.000	54	100.000	75.000
55	100.000	100.000	56	100.000	150.000	57	150.000	0.000
58	150.000	12.500	59	150.000	25.000	60	150.000	37.500
Sayfa 2								

Şekil A.15. Analiz çıktısı (2)

BETON2								
61	150.000	50.000	62	150.000	75.000	63	150.000	100.000
64	150.000	150.000						
HALF BAND WIDTH (NB) = 192								
PERIOD 1 LOAD GROUP 1 AND CYCLE NO. 1								
NODE	ROTAT.X	ROTAT.Y	NODE	ROTAT.X	ROTAT.Y	NODE	RORAT.X	ROTAT.Y
1	3.758E-19	-3.758E-19	2	1.072E-04	-6.461E-19	3	1.631E-04	-4.416E-19
4	1.746E-04	-2.892E-19	5	1.673E-04	-2.635E-19	6	1.365E-04	-1.917E-19
7	1.021E-04	-1.235E-19	8	7.186E-05	-4.907E-20	9	6.460E-19	-1.072E-04
10	9.641E-05	-9.644E-05	11	1.507E-04	-7.397E-05	12	1.656E-04	-5.415E-05
13	1.610E-04	-3.967E-05	14	1.332E-04	-2.161E-05	15	1.004E-04	-1.204E-05
16	7.103E-05	-3.316E-06	17	4.415E-19	-1.631E-04	18	7.394E-05	-1.508E-04
19	1.229E-04	-1.229E-04	20	1.432E-04	-9.464E-05	21	1.444E-04	-7.156E-05
22	1.239E-04	-4.043E-05	23	9.541E-05	-2.296E-05	24	6.862E-05	-6.475E-06
25	2.890E-19	-1.746E-04	26	5.412E-05	-1.657E-04	27	9.458E-05	-1.433E-04
28	1.164E-04	-1.164E-04	29	1.225E-04	-9.165E-05	30	1.105E-04	-5.450E-05
31	8.792E-05	-3.193E-05	32	6.482E-05	-9.268E-06	33	2.633E-19	-1.674E-04
34	3.964E-05	-1.611E-04	35	7.151E-05	-1.445E-04	36	9.158E-05	-1.226E-04
37	1.002E-04	-1.003E-04	38	9.535E-05	-6.306E-05	39	7.879E-05	-3.834E-05
40	5.993E-05	-1.166E-05	41	1.914E-19	-1.366E-04	42	2.158E-05	-1.332E-04
43	4.038E-05	-1.239E-04	44	5.443E-05	-1.106E-04	45	6.298E-05	-9.542E-05
46	6.614E-05	-6.621E-05	47	5.929E-05	-4.357E-05	48	4.863E-05	-1.548E-05
49	1.231E-19	-1.021E-04	50	1.201E-05	-1.004E-04	51	2.292E-05	-9.545E-05
52	3.186E-05	-8.796E-05	53	3.827E-05	-7.883E-05	54	4.350E-05	-5.934E-05
55	4.210E-05	-4.215E-05	56	3.750E-05	-1.771E-05	57	4.882E-20	-7.187E-05
58	3.293E-06	-7.105E-05	59	6.432E-06	-6.863E-05	60	9.211E-06	-6.484E-05
61	1.160E-05	-5.994E-05	62	1.542E-05	-4.865E-05	63	1.767E-05	-3.753E-05
64	1.845E-05	-1.847E-05						
NODE	LAYER	STRESS X	STRESS Y	STRESS XY	MAX.SHEAR	MAJOR	MINOR	
1	1	-2430.408	-2430.049	0.000	0.180	-2430.049	-2430.408	
9	1	-1759.722	-2046.241	0.000	143.260	-1759.722	-2046.241	
17	1	-662.940	-1343.073	0.000	340.067	-662.940	-1343.073	
MAXIMUM STRESS (SMAX) IN LAYER 1 IS -2430.408 ( NODE 1 )								
FOR PERIOD 1 LOAD GROUP 1 CRACKING INDEX (CI) FOR LAYER 1 IS .00000E+00								
FOR LAYER 1 SUM OF CRACKING INDEX (SUMCI) = .00000E+00								
DESIGN LIFE (DL) IN YEARS = 1000.00								

Şekil A.16. Analiz çıktısı (3)

## Ek – B



Şekil B.1: Yolun boy profili

Ek – C



Şekil C.1. PMT tabakası (15 cm)



Şekil C.2. Taşıyıcı tırdaki SSB malzemesinin finişere nakli



Şekil C.3. Malzemenin ilk şeride finişerle serilmesi (1. faz)



Şekil C.4. Taze betonda yüzey görünümü



Şekil C.5. Vibrasyon sistemli düz çelik bandajlı silindirle sıkıştırma





Şekil C.6. Lastik (pnömatik) tekerlekli silindirle sıkıştırma işlemi



Şekil C.7. Eksende kaplama tabakası kalınlık kontrolü



Şekil C.8. Malzemenin ikinci şeride finişerle serilmesi (2. faz)



Şekil C.9. Malzemenin ikinci şeride finişerle serilmesi (2. faz)



Şekil C.10. Şerit ek yerlerinin 4 tonluk silindirle düzeltilmesi



Şekil C.11. Son silindiraj (mix-type compaction)



Şekil C.12. Nükleer cihaz ile kuru birim ağırlık ve nem muhtevası ölçümü



Şekil C.13. Arazöz ile su kürü uygulaması



Şekil C.14. Derz uygulaması



Prof.Dr.İ.Özgür YAMAN / 09.12.2016

Şekil C.15. Kaplama yüzey dokusunda görsel inceleme



Şekil C.16. Yolun yüzey dokusu



Şekil C.17. Proje tip kesite göre "V" tipi kanal yapılması



Şekil C.18. Yolun kuşbakışı görüntüsü



Şekil C.19. Kar küremeden sonra yol güzergâhının görünümü

**Ek – D**

**Tablo D.1. Numunelerde zamana bağlı su işleme derinlikleri**

s <sup>0,5</sup>	Numune Ağırlıkları (g)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	K
0	1324,98	1333,89	1397,93	1430,31	1361,79	1361,91	1428,21	1411,52	1438,45
8	1328,51	1338,74	1410,26	1432,70	1363,53	1367,25	1430,97	1413,65	1439,51
17	1330,01	1368,37	1425,91	1434,08	1366,26	1370,73	1433,27	1415,60	1440,17
24	1330,95	1375,29	1430,73	1434,68	1368,53	1373,05	1434,71	1416,98	1440,52
35	1331,75	1382,05	1436,94	1435,82	1371,85	1375,57	1436,31	1418,67	1441,37
42	1332,98	1384,10	1438,89	1436,56	1374,29	1377,17	1436,95	1419,86	1441,52
60	1334,75	1387,31	1441,80	1437,90	1379,97	1380,69	1439,29	1422,73	1442,38
85	1336,75	1390,31	1444,58	1439,21	1388,08	1384,83	1441,91	1426,47	1443,56
104	1338,46	1392,68	1447,11	1440,31	1393,66	1387,45	1443,45	1429,05	1443,69
120	1339,72	1393,56	1448,80	1441,17	1398,02	1389,41	1444,67	1431,26	1444,22
134	1340,77	1394,01	1450,11	1441,68	1398,77	1391,07	1445,65	1433,10	1444,58
147	1341,93	1394,17	1450,80	1442,21	1398,93	1392,87	1446,83	1435,03	1444,91
304	1350,39	1395,03	1453,39	1446,46	1399,21	1405,73	1455,21	1450,89	1448,81
440	1354,45	1395,65	1454,23	1449,57	1399,61	1413,23	1460,51	1460,82	1451,32
518	1357,32	1396,52	1455,00	1451,59	1399,86	1415,91	1464,03	1461,95	1453,05
657	1358,56	1396,61	1455,21	1452,82	1400,03	1418,73	1467,23	1465,01	1455,17
726	1359,05	1396,85	1455,57	1453,41	1400,20	1424,01	1468,69	1467,60	1455,95
789	1360,60	1397,01	1455,74	1454,61	1400,35	1424,31	1470,79	1467,90	1456,83
831	1360,90	1397,36	1456,11	1455,25	1400,49	1427,17	1471,55	1468,27	1457,22
Zamana Bağlı Hesaplanan Su İşleme Derinlikleri (I, mm)									
8	0,5552	0,7628	1,9391	0,3759	0,2736	0,8398	0,4341	0,2736	0,1884
17	0,7911	5,4227	4,4004	0,5929	0,7022	1,3871	0,7958	0,7022	0,3058
24	0,9389	6,5110	5,1584	0,6873	1,0592	1,7520	1,0223	1,0592	0,3680
35	1,0647	7,5741	6,1351	0,8666	1,5813	2,1483	1,2739	1,5813	0,5191
42	1,2582	7,8965	6,4418	0,9829	1,9659	2,3999	1,3745	1,9659	0,5458
60	1,5365	8,4014	6,8994	1,1937	2,8584	2,9535	1,7425	2,8584	0,6987
85	1,8511	8,8732	7,3366	1,3997	4,1346	3,6046	2,1546	4,1346	0,9084
104	2,1200	9,2459	7,7345	1,5727	5,0122	4,0167	2,3968	5,0122	0,9316
120	2,3182	9,3843	8,0003	1,7079	5,6979	4,3249	2,5887	5,6979	1,0258
134	2,4833	9,4551	8,2063	1,7882	5,8158	4,5860	2,7428	5,8158	1,0898
147	2,6657	9,4802	8,3149	1,8715	5,8410	4,8691	2,9284	5,8410	1,1484
304	3,9962	9,6155	8,7222	2,5399	5,8842	6,8916	4,2463	5,8842	1,8418
440	4,6347	9,7130	8,8543	3,0290	5,9479	8,0711	5,0798	5,9479	2,2880
518	5,0861	9,8498	8,9754	3,3467	5,9865	8,4926	5,6334	5,9865	2,5956
657	5,2811	9,8640	9,0084	3,5401	6,0132	8,9361	6,1367	6,0132	2,9724
726	5,3582	9,9017	9,0650	3,6329	6,0399	9,7665	6,3663	6,0399	3,1111
789	5,6020	9,9269	9,0918	3,8217	6,0635	9,8136	6,6965	6,0635	3,2676
831	5,6491	9,9819	9,1500	3,9223	6,0863	10,2634	6,8161	6,0863	3,3369

Tablo D.2. Beton kaplamada onarıma ait birim fiyat analizi

Analiz Format No: 1	<b>İNŞAAT İŞ KALEMLERİ BİRİM FİYAT ANALİZLERİ</b>				
İş Kalemi / İş Grubu No:	Beton Kaplamalı Yollarda Kaplama Bakımı Yapılması (15 cm kalınlığında)				Ölçü Birimi
KGM/70.042-AN-2					m <sup>2</sup>
Poz No:	GİRDİLER	Ölçü	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
KGM/18.185	PATLAYICI MADDE KULLANMADAN DEMİRLİ VE DEMİRSİZ BETON İNŞAATIN YIKILMASI	m <sup>3</sup>	0,05	26,44	1,32
KGM/21.011	DÜZ YÜZEYLİ BETON VE BETONARME KALIBI	m <sup>2</sup>	0,13	23,50	3,06
Y.16.050/16	Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompasıyla basılan, C 30/37 basınç dayanım sınıfında beton dökülmesi (beton nakli dâhil) satırların el ile tokmaklanarak sıkıştırılması karşılığı	m <sup>3</sup>	0,15	151,63	22,74
01.502	Erbab işçi	sa	0,75	8,45	6,34
KGM/60.006	YOL BAKIM VE ONARIMLARINDA GEÇİCİ TRAFİK İŞARETLEMESİ İÇİN MALZEME TEMİNİ, İŞARETLEME YAPILMASI VE EMNİYET TEDBİRLERİNİN ALINMASI	gün	0,01	352,03	3,52
NAKLİYE	$F = A_x K_x (0,0007 \times M + 0,01) \times G$				2,85
	A: Zorluk Katsayısı = 1				
	G: Taşınan Malzemenin Yoğunluğu = 0,375 ton/m <sup>3</sup>				
	K: Taşıtlar Katsayısı = 245				
	M: Taşıma Mesafesi = 30 km				
<b>Karsız Toplam</b>					39,83
<b>%25 Kar ve Genel Giderler</b>					9,96
<b>Toplam Tutar (TL/m<sup>2</sup>)</b>					<b>49,79</b>

Tablo D.3. Asfalt yama yapılması işçiliğine ait birim fiyat analizi

Analiz Format No: 1	<b>İNŞAAT İŞ KALEMLERİ BİRİM FİYAT ANALİZLERİ</b>				
İş Kalemi /İş Grubu No:	Sıcak Karışım Kaplamalı Yollarda Asfalt Yaması Yapılması İşçiliği				Ölçü Birimi:
KGM/70.031					m <sup>3</sup>
Poz No:	GİRDİLER	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
	Yama yapılacak asfalt zeminin sökülmesi, temizlenmesi, süpürülmesi, astarlanması, rodmiks malzemesi ile doldurulması ve sıkıştırılması karşılığı:				
01.501	Düz işçi (inşaat işçisi)	sa	7	7,95	55,65
01.409	Formen	sa	1	15,95	15,95
03.540	Her cins Titreşimli Darbeli Motorlu Kompaktörün 1 saatlik ücreti	sa	1	37,66	37,66
03.517	Kompresör'ün bir saatlik ücreti	sa	1	98,90	98,90
KGM/03.538/2	Kamyonun 1 Saatlik Ücreti	sa	1	82,40	82,40
03.538/1	Arasöz (pick-up) 1 saatlik ücreti	sa	1	46,38	46,38
<b>Karsız Toplam</b>					336,94
<b>%25 Kar ve Genel Giderler</b>					84,24
<b>Toplam Tutar (TL/m<sup>3</sup>)</b>					<b>421,18</b>
<b>Tarifi:</b>					
Karayolu Bakım El Kitabı ve KTS'nin ilgili kısımlarındaki esaslar ve şartlar dahilinde, sıcak karışım kaplamalı yollarda asfalt yaması yapılması işçiliği (bitümlü sıcak karışım, yapıştırıcı ve distribütör idareden verilecektir).					
Birim Fiyata Dahil Olan Masraflar:					
Makine, ekip ve ekipmanın iş başında temini, yama yapılacak asfalt zeminin kare ya da dikdörtgen şeklinde tebeşirle çizilmesi, çizgi üzerinden kesilmesi, kazma ve kürek gibi aletlerle gevşetilerek sökülmesi, temizlenmesi, varsa kompresörle tozunun uçurulması, bitümlü sıcak karışımın ve yapıştırıcının yüklenmesi, boşaltılması, distribütörde yapıştırıcının ısıtılması ve temizlenen zemine ve yama cidarına püskürtülmesi, yama alanının bitümlü sıcak karışım ile doldurulması, doldurulan malzemenin tırmık ve gelberi ile düzeltilmesi, kompaktör ya da bakım silindiri ile sıkıştırılması, yama etrafındaki serbest malzemenin süpürülerek temizlenmesi, yama yapılacak alandan çıkan malzemenin çevre kirliliğine sebep olmayacak şekilde çalışma alanından uzaklaştırılması ile aşağıda "Birim Fiyata Dâhil Olmayan Masraflar" başlığı altında sayılanlar dışında kalan diğer bütün işlerin yapılması için gerekli olan her türlü işçilik, malzeme, makine, alet ve araç giderleri ile yüklenici karı ve genel masraflar.					
Birim Fiyata Dâhil Olmayan Masraflar: Bitümlü sıcak karışımın taşınması.					
Ölçü: Kullanılan asfalt yama malzemesinin metreküp cinsinden miktarıdır.					



Şekil D.4. Asfalt yama malzemesi temini ve nakliyesine ait birim fiyat analizi

Analiz Format No: 1	<b>İNŞAAT İŞ KALEMLERİ BİRİM FİYAT ANALİZLERİ</b>				
İş Kalemi /İş Grubu No:	Asfalt Betonlu Binder Tabakası Malzemelerinin Temini (Kırılmış ve Elenmiş Ocak Taşı İle) Bitüm Bedeli Dâhil				Ölçü Birimi: ton
KGM/6300-Özel					
Poz No:	GİRDİLER	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
KGM/4102/B	OCAK TAŞINDAN KONKASÖRLE KIRILMIŞ VE ELENMİŞ 25 MM (1") VE 19 MM (3/4")LİK AGREGA HAZIRLANMASI	TON	0,306	14,85	4,54
KGM/4105/B	OCAK TAŞINDAN KONKASÖRLE KIRILMIŞ VE ELENMİŞ 12.5 MM (1/2") VE 9,5 MM (3/8") LİK AGREGA HAZIRLANMASI	TON	0,259	16,83	4,36
KGM/4107/B	OCAK TAŞINDAN KIRILMIŞ VE ELENMİŞ 4,75 MM (NO.4) VE DAHA KÜÇÜK AGREGA HAZIRLANMASI	TON	0,392	17,81	6,98
KGM/4365	SARNIÇLI VAGON,TANKER, KAMYON VE ROLEY TANK GİBİ KAPLARLA TAŞINAN BİTÜMLÜ MALZEMENİN DEPOLANMASI	TON	0,043	2,15	0,09
KGM/4358	KATI BİTÜMLÜ MALZEMENİN SARNIÇ VEYA TANKLARDA EMİŞ DERESESİNE KADAR ISITILMASI	TON	0,043	30,28	1,30
KGM/4366	BİTÜMLÜ MALZEMENİN ASFALT POMPASI İLE BİR KAPTAN DİĞER BİR KABA AKTARILMASI	TON	0,086	1,07	0,09
Nak-07.006	BSK Nakli (10 km)	TON	1	4,17	4,17
04.610/1A	Dökme Asfalt (İzmit Rafinerisi)	KG	1,09	43	46,90
<b>Karsız Toplam</b>					68,43
<b>%25 Kar ve Genel Giderler</b>					17,11
<b>Toplam Tutar (TL/ton)</b>					<b>85,54</b>
Poz No:	BSK NAKLİYE ANALİZİ	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
	$F = A \times K \times (0,0007 \times M + 0,01) \times G$				4,17
A	A: Zorluk Katsayısı = 1				
G	G: Taşınan Malzemenin Yoğunluğu = 1 ton/m <sup>3</sup>				
K	K: Taşıtlı Katsayısı = 245				
M	M: Taşıma Mesafesi = 10 km				
<b>Karsız Toplam</b>					4,17

Tablo D.5. Bazı ulaştırma hizmetleri için hedeflenen bütçe dağılımı (KBB, 2016)

Ulaşım Hizmetleri	Ödenek (TL)						(%)
	2015	2016	2017	2018	2019	TOPLAM	
Cadde ve sokak (300 adet)	56.000.000	103.300.000	103.900.000	150.000.000	40.000.000	<b>453.200.000</b>	28,4
Kavşak ve yol (29 adet)	50.000.000	60.000.000	70.000.000	70.000.000	80.000.000	<b>330.000.000</b>	20,7
Toplu taşıma araçlarının yenilemesi	173.066.500	22.969.150	25.266.065	27.792.672	30.569.938	<b>279.664.325</b>	17,5
Raylı sistem projesi (6 adet)	74.500.000	78.000.000	43.500.000	26.000.000	25.000.000	<b>247.000.000</b>	15,5
Sinyalize kavşak (100 adet)	26.000.000	16.000.000	16.000.000	18.000.000	19.000.000	<b>95.000.000</b>	5,9
Ulaşım projeleri ve trafik dolaşım planları	14.500.000	16.000.000	18.000.000	18.500.000	23.500.000	<b>90.500.000</b>	5,7
Deniz ulaşımında arıza nedeniyle iptal edilen seferler %1'e düşürülecektir.	12.000.000	12.600.000	13.230.000	13.891.500	14.586.075	<b>66.307.575</b>	4,2
Otopark projesi (4 adet)	0	5.000.000	15.000.000	0	0	<b>20.000.000</b>	1,3
Bisiklet yolu (30 km)	1.750.000	1.925.000	2.117.500	2.329.250	2.562.175	<b>10.683.925</b>	0,7
Toplu ulaşım hizmetleri	2.536.165	743.665	345.782	358.110	371.671	<b>4.355.393</b>	0,3
Trafik zabıta hizmetleri	250.000	150.000	30.000	25.000	25.000	<b>480.000</b>	0,03
<b>TOPLAM</b>	<b>410.602.665</b>	<b>316.687.815</b>	<b>307.389.347</b>	<b>326.896.532</b>	<b>235.614.859</b>	<b>1.597.191.218</b>	100,0

Tablo D.6. Yol yapım ve bazı ulaştırma hizmetleri için hedeflenen işler (KBB, 2016)

Hedeflenen İş	2019 Yılı Hedefi
Trafik dolaşım planlaması	12 Adet
Projesi yapılan transfer merkezi	3 Adet
Toplu taşıma sistemi güzergâh uzunluğu	50 km
Geometrik düzenleme projesi yapılan kavşak	100 Adet
KUAP önerilerine göre projelendirilen karayolu koridoru	100 km
Yol, kavşak, köprü uygulama projeleri	175 km
Karayolu köprülü kavşak imatları	7 Adet
Kent merkezlerinde yol ve kavşak imatları	7 Adet
Karayolu imatları	5 Adet
Eş düzey kavşak düzenleme	10 Adet
Cadde ve sokak düzenleme projesi	300 Adet
Bakım onarım ve yapımı yapılan yollar	600 km
Üretilen asfalt	600.000 ton
Üretilen asfalt yama	250.000 ton
Sathi kaplama	35 km
Beton kaplama	400 km

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Abut Y.**, Cankaya T., Beton Yollar – Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Örneği, *Hazır Beton Dergisi*, 2016, **133**, 77-83.

**Abut Y.**, Düşük Hacimli Yollarda Donatısız Beton Üstyapılar İçin Bir Dizayn Kataloğu Önerisi, *Hazır Beton Kongresi ve Beton, Agregası, İnşaat Teknolojileri ve Ekipmanları Fuarı*, İstanbul, Türkiye, 13-15 Nisan 2017.

**Abut Y.**, Elektrikli Ark Ocağı Cürufu'nun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği, *6. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 11 Kasım 2013.

**Abut Y.**, Yıldırım S.T., Structural Design and Economic Evaluation of Roller Compacted Concrete Pavement with Recycled Aggregates, *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium (WMCAUS)*, Prague, Czech Republic, 12-16 June 2017.

Bozbey İ., Kamal N. A., **Abut Y.**, Effects of Soil Pulverisation Level and Freeze and Thaw Cycles on Fly-Ash- And Lime-Stabilised High Plasticity Clay: Implications on Pavement Design and Performance, *Road Materials and Pavement Design*, DOI:10.1080/14680629.2016.1207553.

## ÖZGEÇMİŞ

1982’de Van’da doğdu. 2006 yılında Erciyes Üniversitesi, Yozgat Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2008-2010 yılları arasında, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yapı Ana Bilim Dalında yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2007 yılında, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Dairesi Başkanlığı’na bağlı Yapı Malzemeleri Laboratuvarında, Laboratuvar Şefi olarak başladığı görevine halen devam etmektedir. 2012 yılından bu yana, 4708 Sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun’a istinaden, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nca zemin ve yapı malzemeleri deney süreçlerinde Laboratuvar Denetçi Mühendisi olarak yetkilendirilmiştir. Başta beton ve asfalt olmak üzere, yapı malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri, malzeme kalite kontrolü, üstyapı tasarımı ve optimizasyonu konularında laboratuvar ve saha çalışmalarını sürdürmektedir.