

# Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar\*

İsmail Özgür YAMANI

Halil CEYLAN2

## Özet

Rijit yol üstyapı yapım yöntemlerinden biri olan silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) kaplamalar geleneksel beton kaplamalara göre nispeten yeni bir beton kaplama türü olup yola serilmesi

ve sıkıştırılması esnasında esnek üstyapı yapımına benzer teknikler kullanılarak inşa edilmektedir. Geleneksel beton kaplamalara göre çok daha düşük su/çimento içeriğiyle üretilen SSB kaplamalar, bitümlü kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınmakta, serilmekte ve sıkıştırılmaktadır. Bu özellikleriyle SSB kaplamalar hızlı ve ekonomik bir şekilde inşa edilebilmekte, böylece de alternatif bir üstyapı olarak kendini göstermektedir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü nedeniyle dünyada önceleri daha çok ağır yük taşıyan ve düşük hızla gidilen endüstriyel saha zeminlerinde tercih edilen SSB kaplamalar, son yıllarda şehiriçi yollar

da ve şehirlerarası anayollarda da uygulanmaya başlanmıştır. Türkiye'de ise önceleri baraj yapımında kullanılmaya başlanan SSB uygulamaları, son yıllarda bazı yerel yönetimler tarafından tercih edilmeye başlanmış ve şehiriçi yol üstyapısında kullanılmaya başlanmıştır. Bu bildiride önce SSB kaplamaların temel özellikleri tanıtılacak, ardından yapım ve tasarım metodlarına ilişkin bilgiler verilecek ve son olarak Türkiye'deki uygulamalarından örnekler verilecektir.

\*1) Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

\*2) ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, ioyaman@metu.edu.tr

\*3) IOWA Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, IOWA Ulaştırma Enstitüsü ve Ulusal Beton Kaplama Teknoloji Merkezi, hceylan@iastate.edu

## Roller Compacted Concrete Pavements

Roller compacted concrete (RCC) pavements, a type of rigid pavement construction, is a relatively new concrete pavement type which is paved and compacted using similar techniques of flexible pavements. RCC is usually produced with lower water/cement ratios when compared to traditional concrete pavements and are transported, paved and compacted with the same machinery of asphalt pavements. With these characteristics, RCC pavements can be produced fast and are economical, thus it presents itself as a suitable paving method. Due to its high surface roughness, its usage in the World was limited to industrial sites with heavy loads and low speed areas. In recent years, it has been used in urban roads, and even in intercity roadways.

## 1. GİRİŞ

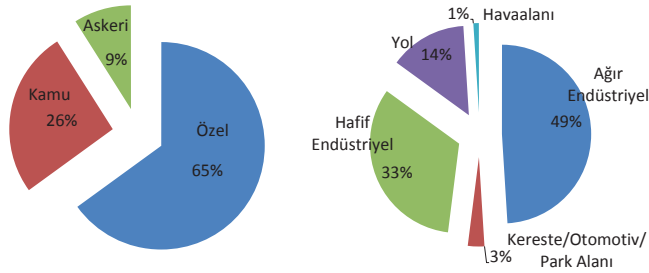
İsmi yapıyı esnasında betonun sıkıştırılması ve son şeklinin verilmesinde kullanılan ağır vibrasyonlu çelik tambur ve lastik tekerlekli silindirlerden alan SSB yollar, rijit üstyapı yapımında kullanılan geleneksel beton malzemesi ile benzer dayanım özellikleri göstermekte ve aynı bileşenlerin -düzgün bir gradasyona sahip agrega, bağlayıcı malzemeler ve su- farklı oranlarda birleştirilmesiyle üretilmektedir (Şekil 1). SSB karışımı ile geleneksel beton karışım arasındaki temel farklılık SSB üretiminde daha yüksek oranda ince agreganın kullanılarak betonun daha iyi sıkıştırılması ve sıkı bir iç yapı elde edilmesidir [1].



Şekil 1. Silindirle sıkıştırılmış beton yollar, geleneksel beton malzemeleri kullanılarak asfalt yol ekipmanları ile inşa edilebilirler [1].

1930'lu yıllarda inşaat mühendisliğinin bir çok alanında sıkıştırılmalar titreşim uygulanarak yapılmasına karşın, titreşimsiz sıkıştırma kadar iyi kalite sağlayabilecek silindir bulunmadığı için sıkıştırmada silindir kullanılmamıştır. Silindir, yalnızca çimento içeren temel tabakalarının yapımında kullanılmıştır [2]. Kuzey Amerika'daki ilk SSB yol uygulaması Washington'daki bir havaalanı pistinde 1940'lı yıllarda yapılmıştır [1]. 1970'li yıllardaki petrol krizi nedeniyle bitümlü bağlayıcı fi-

yatlarının yükselmesi, SSB yolların gündeme gelmesini sağlamıştır. Bu yıllarda özellikle Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki kereste fabrikalarında ve askeri alanlarda SSB yol uygulamaları yapılmaya başlanmıştır [2]. SSB yolların bilinen ilk modern örneği ise 1970 yılında, İspanya'da, düşük hacimli trafiğe sahip olan bir yolda uygulanmış, ağır trafik taşıyan diğer bir SSB yol uygulaması da 1976 yılında Kanada'da yapılmıştır [2]. 1980 yılından sonra, Fransa, Almanya, Norveç, İsveç, Finlandiya, Danimarka, Almanya, Avusturya, Arjantin ve Japonya gibi ülkelerin her birinde 100.000 m<sup>2</sup> den fazla SSB yol inşa edilirken, Şili, Uruguay, Meksika, Kolombiya, Ekvator ve Güney Afrika gibi ülkelerde çok az veya deneme yolu olarak kullanılmıştır [2]. 2011 yılına gelinceye kadar Amerika Birleşik Devletlerinde inşa edilen SSB yol miktarı 12.000.000 m<sup>2</sup>'yi aşmıştır. Bunun kullanım alanlarına ve idarelere göre dağılımı ise Şekil 2'de gösterilmiştir [3].



**Şekil 2.** Amerika Birleşik Devletlerinde SSB Yolların Dağılımı [3] SSB yolların özelliklerinin geleneksel beton kaplamalarla bir karşılaştırması Çizelge 1'de verilmiştir [1]. Bu tabloda da görüleceği üzere SSB üretimi geleneksel betona göre aynı bileşenlerin farklı oranlarda karşılaştırılması ile elde edilmekte, dolayısıyla işlenebilirlik özellikleri farklı olmakta, ancak bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınabilmekte, serilebilmekte ve sıkıştırılabilmektedir. Buna karşın hidratasyon reaksiyonları değişmediği için geleneksel beton yollara benzer kür gereksinimlerine ihtiyaç duymaktadır.

SSB yolların en önemli üstünlüğü gerek beton kaplamalara gerekse çok tabakalı asfalt kaplamalara kıyasla çok daha hızlı ve ekonomik olarak inşa edilebilmesidir. Yurtdışındaki birçok uygulama sonrasında edinilen tecrübe ışığında SSB'nin birim maliyeti genellikle benzer bir kesitteki beton veya asfalt kaplamadan daha ucuzdur [4]. İleride anlatılacak olan Denizli Belediyesi uygulamasında da bu gözlemlenmiş ve SSB tercih nedeni olmuştur. Maliyetteki net tasarruf yüzdesi ise genellikle yerleştirme işlemlerindeki karmaşıklığa ve betonun toplam miktarına bağlı olarak değişmektedir. SSB'nin geleneksel betona göre daha ekonomik olmasının sebebi çimento mikta-

In Turkey, RCC was first used in dam construction, but nowadays is being used by some local authorities as a paving method for urban roads. In this article, the basic properties of RCC pavements will first be introduced, later its design and construction methods will be discussed, and finally examples of Turkish practice will be provided.

rındaki, yerleştirme maliyetindeki ve inşaat süresindeki azalmalarla açıklanmaktadır. Buna ilave olarak SSB yollarda hiçbir zaman kalıp kullanılmamakta, genellikle yüzey düzeltme işlemi yapılmamakta ve kayma donatısı, bağ donatısı gibi herhangi bir çelik donatı maliyeti olmamaktadır. SSB yolların diğer bazı üstünlükleri aşağıda listelenmiştir [1]:

SSB karışımındaki düşük hamur içeriği betondaki rötreyi azaltmakta ve rötreye kaynaklı gerilmeler dolayısıyla çatlamalar azalmaktadır.

■ SSB ağır sanayi, madencilik ve askeri uygulamalar gibi ağır ve tekrarlanır tekil darbe

yüklerine karşı koyabilecek yüksek eğilme, basınç ve kesme dayanımına sahip olacak şekilde tasarlanabilir.

- Düşük geçirgenliği sayesinde, SSB donma-çözülme koşullarına, kimyasal etkilere karşı direnç ve mükemmel dayanıklılık gösterir.
- Diğer rijit kaplamalar gibi SSB kullanımı da yolda oluşacak tekerlek izini önler ve buna bağlı onarımları ortadan kaldırır.
- Atık toplama alanları, kereste sahaları ve paletli araçların kullanıldığı endüstriyel SSB saha uygulamalarında derzler gerekmediğinden derzlerin bakımıyla ilgili maliyetler ortadan kalkar.
- SSB geleneksel beton yollarda olduğu gibi ağır yükler ve yüksek trafik hacimleri altında bile aşınmaya karşı dayanıklıdır.
- SSB yolların yüzeylerinin açık renkli olması sebebiyle otopark ve depolama alanları için aydınlatma gereksinimlerini azaltır.
- Otomobil ve hafif kamyon gibi ağır olmayan araçlar SSB yol imalatı tamamlandıktan kısa süre sonra kaplamaya zarar vermeden düşük hızlarda seyahat edebilirler.
- SSB karışımları doğal veya endüstriyel ince agregalar içerebilir. Asfalt kaplamalar için uygun olmayan ince agregalarla üretilebilir.
- Karışıma ve kullanılan beton sericisi tipine bağlı olmak üzere tek bir tabakada 25 cm kalınlığa kadar sıkıştırılabilir.
- SSB kaplamaların güneş yansımaya indeksi (SRI), Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik (LEED) Kredisi 7.1: "Isı Adası Etkisi" için gereken minimum 29 puandan daha yüksektir.
- SSB karışımında hava sürüklenmemesine rağmen donma-çözülme dayanıklılığı oldukça yüksektir. Onlarca yıldır, Kanada ve Kuzey Amerika'da soğuk bölgelerde SSB kaplamalar mükemmel donma-çözülme dayanıklılığı göstermiştir.

Yukarıda sayılan bu üstün özellikleriyle SSB kaplamalar hızlı ve ekonomik bir şekilde imal edilebilmekte böylece de uygun bir kaplama yöntemi olarak kendini göstermektedir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü nedeniyle dünyada önceleri daha çok ağır yük taşıyan ve düşük hızla gidilen ticari bölgelerde tercih edilen SSB yollar, son yıllarda şehirci yollarda ve şehirlerarası anayollarda da uygulanmaya başlanmıştır. Aşağıda özellikle yurtdışında SSB yolların son zamanlarda tercih edilerek uygulanmaya başladığı yerler verilmektedir:

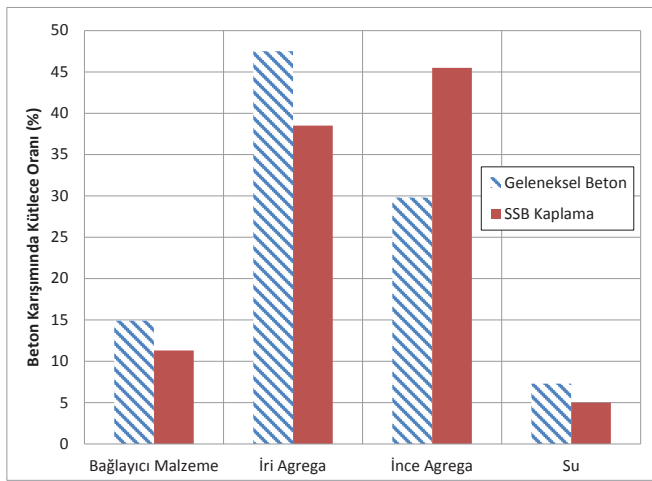
- Endüstriyel tesislerin saha içi yolları ve park alanları
- Araç bakım alanları
- Intermodal taşımacılık sahaları, limanları, ve yükleme iskeleleri
- Uçak park alanları
- Tır yükleme alanları, toplu eşya depolama alanları ve dağıtma merkezleri
- Eğlence aracı depolama alanları
- Büyük ticari otoparklar
- Düşük hacimli kırsal ve kentsel yollar
- Kereste ve tomruk tesislerinin sahaları ve saha içi yolları
- Askeri yükleme alanları, ön ve arka operasyon sahaları, hava meydanları
- Otoyol banketleri
- Trafiği yönlendirmek için hızla inşa edilen geçici seyahat şeritleri

**Çizelge 1.** Geleneksel beton ve SSB yolların karşılaştırılması

Malzemeler ve Uygulamalar	KAPLAMA TİPİ	
	Geleneksel Beton Yollar	Silindire Sıkıştırılmış Beton Yollar
Malzeme Karışım Oranları	İyi gradasyonlu iri ve ince agregalar genellikle karışım hacminin % 60 ila 75' ini oluşturur. Çimento hamurunun agregaya tanelerini bir araya getirecek ve taneler arasındaki boşlukları dolduracak kadar ıslak olmasını sağlayan tipik su / çimento oranı 0.40 ila 0.45'tir.	Yoğun ve iyi gradasyonlu iri ve ince agregalar genellikle hacimsel olarak SSB karışımlarının % 75 ila 85' ini oluşturur. SSB karışımları yüksek dozda ince agregaya, düşük çimento ve su içerikleri nedeniyle geleneksel betondan daha kurudur.
İşlenebilirlik	Karışım plastik ve akışkandır, bu nedenle özel beton yol sericileri ile işlenebilir. Beton serici tarafından sıkıştırılıp çıktıktan sonra şeklini koruyabilecek kıvamda (çökme değeri ~5 cm) olmalıdır.	Karışım nemli ve yoğun bir agregaya gradasyonundan oluşmaktadır. Dolayısıyla, SSB karışımı nispeten kuru ve rijittir (Sıfır çökme değerindeki bir betondan daha rijit) dolayısıyla karışım geleneksel beton yol sericileri ile şekil verilebilecek kadar akışkan değildir.
Kaplama Yapılması	Karışım, betonu titreşim aracılığıyla yayan, seviyelendiren, sıkıştıran ve çıkaran bir kayar kalıp sericinin önüne dökülmektedir.	SSB karışımı ağır bir iş makinesi olan kendinden tahrikli asfalt kaplama sericisi ile serme işleminde tabaka kalınlığının kontrolü için yüksek ağırlıktaki tek veya çift master yardımıyla yerleştirilir. Bu tip sericiler, özellikle kalın kaplama uygulamalarında yüksek kaliteli yerleştirme için gereklidir.  Herhangi bir kalıp gerekli değildir. SSB genellikle minimum 15 ile 20 cm'lik maksimum ise 25 cm'lik tabakalar halinde yerleştirilir.
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 agregaya) çökmesi ve suyun yüzeye yukarı doğru hareketi (terleme) aracılığıyla ilave bir sıkışma meydana gelir.	SSB'de esas sıkıştırma işlemi betonun silindirelerle 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.	Silindirelerle 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 doğaç 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.

## 2. SSB KARIŞIM TASARIMI

Daha önce belirtildiği üzere SSB yollar; iri ve ince agrega, bağlayıcı malzemeler (çimento, uçucu kül, cüruf vb.), su ve gerektiğinde kimyasal katkılarla yani geleneksel beton kaplama karışımındaki aynı malzemelerin farklı oranlarda karıştırılmasıyla imal edilir (Şekil 3). Tıpkı geleneksel beton üretiminde olduğu gibi bileşenlerin doğru seçimi kaliteli bir SSB karışımı için önemlidir.

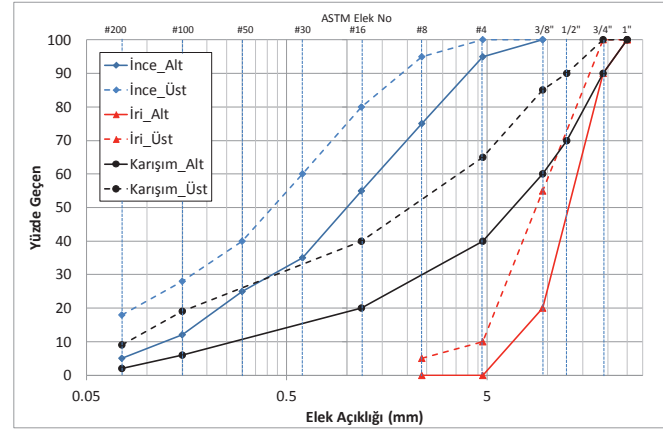


Şekil 3. Geleneksel Beton ve SSB Yol İçin Beton Karışım Oranlarının Karşılaştırılması [2]

### 2.1. Agregalar

Şekil 3'den de görüleceği üzere beton karışımının ağırlıkça yaklaşık %85'ini iri ve ince agregalar oluşturmaktadır. Dolayısıyla, SSB kaplamanın işlenebilirliği, yoğunluğu, basınç ve eğilme dayanımları, termik özellikleri ve dayanıklılığı açısından agrega seçimi oldukça önemlidir. Agregaların tane boyu dağılımı, su emme miktarı, özgül ağırlığı, plastisite indisi, aşınma dayanımı, alkali-silika reaktivite özellikleri ve dayanıklılıkları kontrol edilmelidir. Bunlardan özellikle tane boyu dağılımı geleneksel beton üretiminden farklıdır. Şekil 4'te SSB beton karışımında kullanılacak iri ve ince agregalar ile bunların belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen toplam agrega karışımının alt ve üst limitlerini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere SSB kaplama imalatında genelde maksimum dane boyutu 19 ile 25 mm arasında seçilmektedir. Betonun daha rahat karıştırmak, ayrışmaları azaltmak ve yüzey düzgünlüğünü sağlamak amacıyla tane boyutu yüksek seçilmemektedir. Yüzey düzgünlüğü artırılmak istenirse bu boyut düşürülmekte ancak bu durumda karışımında daha fazla bağlayıcı malzeme kullanılmaktadır. Yüksek oranda plastik olmayan silt parçacıkları içeren ince agregalar, mineral filler olarak görev yapıp beton içerisindeki boşlukları doldurduğu

için kullanılabilir. Dolayısıyla, ince malzeme miktarı fazla olan ve asfalt karışımında kullanılmayan kumlar, plastik olmadıkları sürece SSB karışımında kullanılabilir.



Şekil 4. SSB kaplama karışımında kullanılacak agregaların tane boyu dağılımı [1]

### 2.2. Bağlayıcı Malzemeler

SSB karışımında TS EN 197-1'e uygun herhangi bir çimento tipi kullanılabilir. Geleneksel beton karışımlarında olduğu gibi çimento tipi seçiminde de SSB kaplamanın yapılacağı iklim ve yapım koşulları belirleyicidir. Genelde CEM I ve CEM II tipi çimentolar tercih edilebilmekte, ayrıca çimentoya ikame olarak beton santrallerinde mineral katkıları özellikle uçucu kül ve cüruf kullanılabilir. Mineral katkıların kullanımı betonun dayanıklılığını artırmakta ve özellikle uçucu kül kullanımı betonu işlenebilirliğini olumlu yönde etkilemektedir.

Uçucu kül genelde toplam bağlayıcı malzeme miktarının hacimce %15 ile %20'si oranında kullanılmaktadır. Uçucu kül genelde beton kaplamaların tuza karşı soyulma direncini azalttığı için %25'ten daha az bir miktarda kullanılması önerilmektedir [5-7]. Ayrıca, soğuk yapım zamanlarında, örneğin Kanada'da 15 Eylül'den sonra uçucu kül tercih edilmemektedir [1].

Uçucu kül dışında cüruf ve silis dumanı da SSB karışımlarında kullanılabilir. Silis dumanı uçucu kül ve cüruf gibi betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve dayanıklılığını artırmaktadır, ancak silis dumanı betonun işlenebilirliğini düşürmekte ve sıkıştırma için daha fazla çaba gerektirmektedir [1, 5-6]. Silis dumanı yüksek maliyeti ve yapımda karşılaşılabilecek diğer zorluklardan dolayı genelde tercih edilmese de, özellikle Kanada'nın doğusunda son 10 yıldır, katkı çimentonun bir bileşeni olarak %7-8 oranında kullanılmaktadır [1].

### 2.3. Su

Geleneksel beton üretiminde olduğu gibi SSB üretiminde de karışımda kullanılacak olan suyun belirli özelliklerde olması gerekir. Beton karışımında kullanılacak olan su TS EN 1008 standardına uygun olacak şekilde klorürler, sülfatlar, alkali, şekerler, fosfatlar ve nitratlar gibi bazı kimyasallardan mümkün olduğunca arındırılmış olmalıdır.

### 2.4. Kimyasal Katkılar

Beton karışımında kullanılacak olan kimyasal katkıların seçimi esas olarak beton karışımındaki etkisine ve oranına bağlı olarak belirlenir. SSB karışımında akışkanlaştırıcılar, priz hızlandırıcı ve geciktirici kimyasal katkıları yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

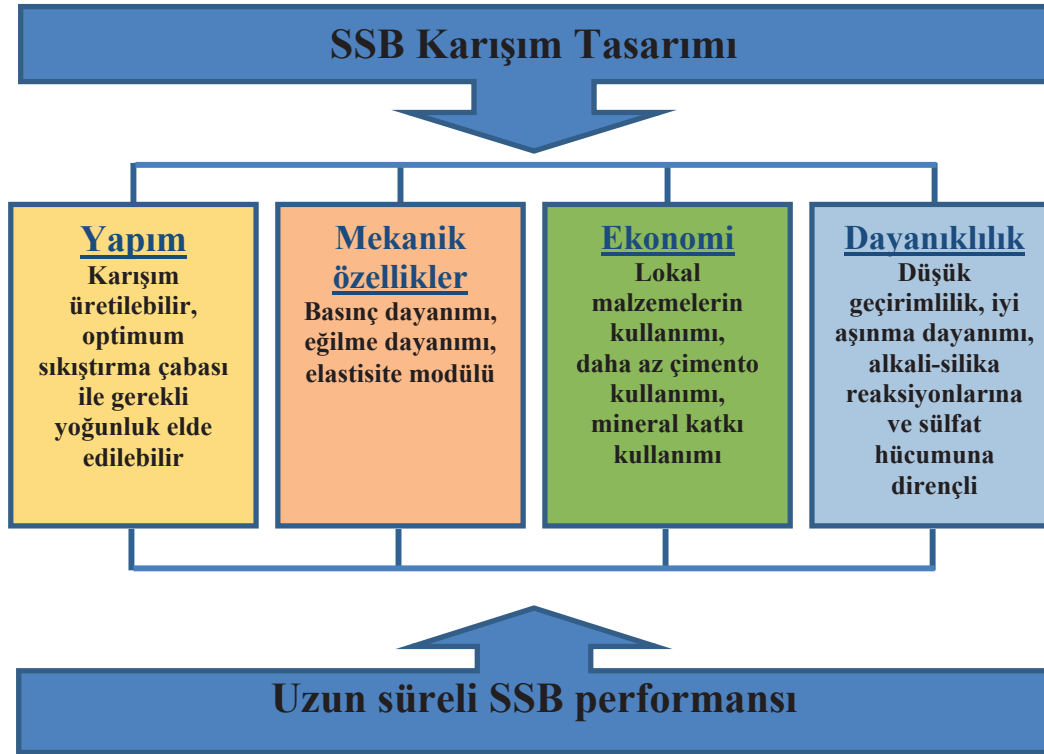
Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları bazen kuru beton karışım tesislerinde karışım ve boşaltma sürelerini azaltmak üzere kullanılırlar [1]. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcıların kuru beton karışım tesislerinde kullanımı sonucu, betonda işlenebilirlik artışının yanısıra önemli ölçüde üretim artışı sağladığı bildirilmiştir [1].

Priz hızlandırıcı kimyasal katkıları yolu trafiğe erken açmak ya da soğuk havada beton dökümü gibi başka bir nedenle betonun prizini hızlandırmanın gerektiği durumlarda kullanılırlar. Priz geciktirici katkıları ise sıcak havada beton dökülmesi gerektiğinde, betonun uzun mesafelerde taşınması gerektiğinde ya da birden fazla katman dökülmesini gerektiren kalın tasarımlarda kullanılırlar.

Hava sürükleyici katkıların ise SSB karışımlarında kullanılması pek yaygın değildir. Bu tür katkıların saha şartlarında istenen hava boşluk dağılım parametrelerini sağladığı henüz ispatlanmamıştır [1].

### 2.5. Karışım Tasarımı

Kaliteli bir SSB elde edebilmek için bileşen malzemelerin kalitesi kadar bunların doğru oranda kullanımı da çok önemlidir. Beton karışım tasarımında betonun taze ve sertleşmiş özellikleri, yapım gereksinimleri ve ekonomi gözönüne alınmalıdır. Dayanıklı ve uzun performanslı bir SSB yol elde edebilmek için beton karışım tasarımında gözönüne alınması gereken parametreler ve kısa açıklamaları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. SSB karışım tasarımını etkileyen parametreler [1]

SSB karışım tasarımında genellikle iki yöntem kullanılır. Bunlardan birincisi olan zemin sıkıştırma yöntemi, genellikle SSB yollar için kullanılmaktadır. Bu yöntemde göre öncelikle maksimum sıkıştırma için gerekli olan su oranı belirlenir, daha sonra ise bu su kullanılarak betonda istenilen mühendislik özelliklerine ulaşabilmek için gereken bağlayıcı miktarı belirlenir. İkinci yöntem olan klasik beton karışım tasarımı ise daha çok SSB baraj beton tasarımında kullanılır [1]. Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın laboratuvarında tasarlanan beton karışımını doğrulamak için bir test şeriti dökümü yapılmalı ve sahada kullanılacak olan ekipman ile beton işlenebilirliği kontrol edilmelidir. Çizelge 2’de ABD ve Kanada’da yapılan bazı SSB karışım tasarımları ve betonun özellikleri verilmektedir.

Avrupa ülkelerine bakılacak olursa Fransa ve İspanya’da yarmada çekme dayanımının 3,3 MPa olması gerektiği, düşük hacimli yollar için ise 2,8 MPa’nın yeterli olacağı belirtilmiştir. Almanya’da SSB kaplamalar için önerilen yarmada çekme dayanımı 3,0 MPa, basınç dayanımı 40 MPa olup, SSB ile yapılmış temeller için yarmada çekme dayanımı 2,7 MPa ve basınç dayanımı 30 MPa’dır. Testlerin uygulanma zamanı genellikle 28. gündür. İspanya’da çimentolara büyük oranda uçucu kül gibi puzolanik malzemeler katıldığı için 90. gün sonunda testler yapılmaktadır. İsveç’te ise SSB karışımında uçucu kül gibi puzolanik malzemeler kullanılmamakta ve sağlanması gerekli olan 28. gün basınç dayanımı 40 MPa’dır [2].

**Çizelge 2.** Bazı SSB karışım tasarımı örnekleri [1]

SSB Yol Yapım Yeri			Takoma Limanı	CTL Karışım	Chattanooga	Brownsville	Güney Karolina	Atlanta	Kanada		
Bağlayıcılar	Çimento	(kg/m <sup>3</sup> )	267	300	178	300	263	300	300 <sup>1</sup>		
	Uçucu Kül	(kg/m <sup>3</sup> )	59	0	89	0	0	0	0		
Agregalar	Max. Agregada Dane 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 <sup>2</sup>		(kg/m <sup>3</sup> )	152	125	113	140	128	158	95		
Kimyasal Katkıları	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	3	MPa	12.7	-	-	21.3	25.0	27.1	-	
		7		-	38.2	35.6	-	-	-	-	
		28		42.4	55.3	42.7	34.6	36.5	36.1	58.6	
	Eğilme	3		3.7	-	-	3.5	-	-	-	-
		7		-	4.8	4.3	-	-	-	-	-
		28		5.4	6.3	4.9	4.5	-	-	-	-
	Eğilme/Basınç Oranı, 28 Günlük	(%)		12.7	11.4	11.5	12.9	-	-	-	-

**Notlar:**

1. %7 silis dumanlı katkılı çimento kullanılmıştır.
2. Kanada ve Chattanooga karışımlarında su miktarı agreganın doygun kuru yüzey ağırlığına dayanarak, serbest su olarak belirtilmiştir. Diğer karışımlarda ise su miktarı fırın kuru agregada ağırlığına dayanarak toplam su olarak belirtilmiştir.

### 3. SSB YOLLARIN YAPISAL TASARIMI

Silindirle sıkıştırılmış beton yolların mühendislik özellikleri geleneksel üstyapılara benzerdir. En önemli fark ise SSB kaplamaların daha az su ve çimento içermelerinden dolayı daha az rötre değerine sahip olmalarıdır.

SSB yollar düz, bağırsız ve donatısız şekilde inşaa edilirler. Bu yolların yapısal davranışı eşdeğer beton yolların davranışı ile benzerdir. Kalınlık belirleme prosedürü de geleneksel beton yolların prosedürü ile aynıdır. Kalınlık belirlenirken tekerlek yüklerinden kaynaklı eğilme gerilmesi ve yorulma kabul edilmiş limitler arasında tutulmaya çalışılır. Beton kaplamalarda yol kalınlığı, beklenen yükler, beton dayanımı ve zemin özelliklerinin bir fonksiyonudur. SSB kaplamalarda en düşük kalınlık 10 cm ve tek seferde en fazla 25 cm kalınlığındaki bir katman yerleştirilecek şekilde olmalıdır.

SSB kaplamaların limanlar, terminaller gibi ağır yükler altındaki kalınlık belirleme esasları Amerikan Portland Çimento Birliği (PCA) ve Amerikan Ordu Birliği Mühendisleri (USACE) tarafından belirlenmiştir. Tasarım esası, üstyapının yani kaplamanın, tekrarlı ağır yükler altında bozulmadan belirli bir dereceye kadar dayanmasıdır. Bu üstyapılarda eğilme gerilmesi kritik olduğu için eğilme gerilmesine bağlı yorulma kalınlık hesabında kullanılır. Yorulma ilişkisinde aşağıdaki gerilme oranı kullanılır.

Gerilme Oranı (GO) = Uygulanan Kritik Eğilme Gerilmesi / Eğilme Dayanımı

Burada "Uygulanan Kritik Eğilme Gerilmesi" beton üstyapı tabakasının tabanındaki en büyük çekme gerilmesidir. "Eğilme Dayanımı" ise ASTM C78; AASHTO T97 veya CSA A23.2-8C ile üç noktalı yükleme ile elde edilen kırış dayanımıdır.

Tasarım aşamasında kalınlık veya yapının dayanımı artırılarak gerilme oranı yorulmanın etkilerini düşürecek şekilde düşük tutulur.

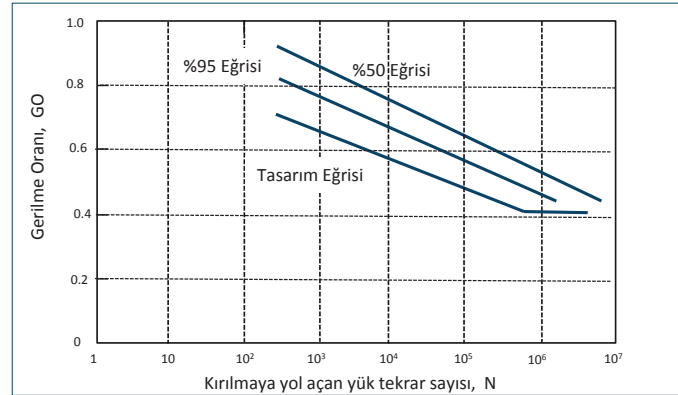
SSB üstyapıların eğilme gerilmesi üzerine yapılan çalışmalar yorulma davranışlarının geleneksel beton üstyapılarla benzer olduğunu göstermiştir. Şekil 6, dört farklı silindirle sıkıştırılmış üstyapı örneğinden alınmış kırışların yorulma test sonuçlarını göstermektedir. Şekilde %50 çizgisi araştırma veri noktalarının arasından geçirilmiş ve onları temsil eden en uygun çizgidir. %95 çizgisi ise noktaların %95'ini temsil eder. Bu çizgilerin altında, tasarım çizgisi Amerikan Portland

Çimentosu Birliği'nin karayolları ve havalimanları için önerdiği prosedürlerde olduğu gibi güvenli tasarım noktasını temsil eder.

Kalınlığa etki eden en önemli parametreler eğilme gerilmesi ve yorulma davranışıdır. Kalınlık tekerlek yüklerinden kaynaklı eğilme gerilmesini ve yorulmayı güvenli limitler altında tutacak şekilde seçilir. Üstyapının bağlantı noktalarında köşelerde oluşan eğilme gerilmesi ve yorulma orta noktalardan daha fazladır [8]. Bu nedenle derz noktaları ve buradaki yük aktarım performansı verimliliği yapının ömrü açısından son derece önemlidir.

Bu noktalardaki gerilmeyi düşürmek için üstyapı 30 cm kadar genişletilebilir ve bu genişletilen kısımlar destekleyici olarak düşünülebilir. Ticari ve endüstriyel park alanlarında ise yapının boş köşelerinin yanında çok az alan mevcuttur ve buralarda yükler genellikle iç tabakalara uygulanır. Bu nedenle yapı destekleyici köşeler dikkate alınarak tasarlanır.

Derz noktalarında gerilmeyi düşürebilmek için bu noktalardaki bağlantının yeterli miktarda olması gerekir. Tasarım programları kullanıldığı zaman bu noktalardaki yük transfer kabullerine dikkat etmek gerekir.



Şekil 6 Silindirle sıkıştırılmış beton üstyapılar için yorulma ilişkisi (PCA 1987)

#### 3.1. Zemin, Temel Altı ve Temel Tasarımı

SSB yolların altında yer alan doğal zeminler, granüler alttemel ve bağlayıcılarla güçlendirilmiş temel tabakaları geleneksel beton üstyapılarınki ile aynı özelliklere sahip olmalıdır. Doğal zeminin, alttemel ve/veya temelin taşıma kapasitesi her bir SSB tabaka yerleştirmesi için yapılacak sıkıştırmaya izin verecek (dayanacak) şekilde olmalıdır. Bu üstyapılar granüler temel altındaki nem oranına duyarlıdır. Bu üstyapıların en alt tabakası en fazla

eğilme gerilmesi ile karşılaşacağı için burada bulunacak fazla bir su/su/çimento oranını artırarak betonun oradaki mekanik dayanımını azaltacaktır. Bulunan fazla su kurutulmalıdır, ya da tekrar sıkıştırılmalıdır veya başka bir malzeme ile değiştirilmelidir. Zemin ve alttemel tabakaları yeterli dreneja sahip olmalıdır.

### 3.2. Tasarım Prosedürleri

Bu üstyapılar tasarım açısından iki ana kategoriye ayrılırlar. a) limanlar ve havalimanları gibi ağır yüklere maruz kalanlar, b) değişik tipte kamyonlar ve diğer trafik araçlarının yüklerine maruz kalanlar. Ağır yükler altında çalışan üstyapılar maruz kalacağı en ağır araç yükünün belirli sayıdaki tekrarlı yükü altında tasarlanır ve diğer hafif yüklü araçlar dikkate alınmaz [9]. Bu yaklaşım PCA ve USACE tarafından kullanılmaktadır.

Değişik tipteki araç yüklerine maruz kalan üstyapılar için önerilen PCA ve USACE yöntemi ise çok karmaşık ve detaylıdır. Bunlar için bağlantısız beton üstyapılar için kullanılan ACI tabloları veya StreetPave programı gibi tasarım seçenekleri kullanılabilir. Bazı mühendisler ise bunlara ek olarak kontrol amaçlı WinPAS kullanmaktadır [1].

### 3.3. RCC-PAVE Programı (Amerikan Portland Çimento Birliği Prosedürü)

Bu program SSB yolların ağır yükler altında tasarlanıp değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu program ayrıca geleneksel yükler altındaki üstyapılar için de kullanılabilir ama bu oldukça karışık ve zahmetlidir. RCC-PAVE prosedürü Amerikan Portland Çimento Birliğinin (PCA) prosedürlerine bağlı olarak Westergaard'ın temel üzerine yapılmış rijit üstyapılar için elastik analiz yöntemini kullanmaktadır [10]. RCC-PAVE programı PCA'nın programından ve PCA'nın Endüstriyel Üstyapılar için Silindire Sıkıştırılmış Betonun Yapısal Tasarımı yayınından geliştirilmiştir. Windows 98, Windows 2000, Windows NT, ve Windows XP ortamlarında çalışmaktadır.

Tasarım aşağıdaki kabulleri içermektedir.

- Eğer birkaç tabaka şeklinde inşaa yapılacaksa yapı yekpare olarak düşünülür ve tabakalar arasında yeterli bağ olmasına özen gösterilir.
- Tasarım sırasında güvenilir tarafta kalmaya özen gösterilir.
- Şekil 6'daki yorulma çizgisi yorulma testlerindeki sonuçlara göre daha güvenli taraftadır.
- Bu üstyapılar yıllar geçtikte sağlamlık kazanmaktadır ve böylece eğilme dayanımı tasarım dayanımından daha fazla olacaktır.
- Bunlar genel olarak 700,000 den daha az yük tekrarına göre tasarlanmışlardır. Şekil 6'da gerilme oranı 0.38 civarında düzleşmeye başlamaktadır ve 700,000 den daha fazla tekrarlar için izin verilen yükler dikkate alınmamaktadır.

Kalınlık tasarımı için aşağıdaki bilgilere ihtiyaç vardır [8].

1. Zemin ve alttemel tabakaları ve bunların kombinasyonu için k değeri
2. Araç bilgileri
3. Dingil yükleri
4. Dingil açıklıkları
5. Tekerlek özellikleri (değer yüzey alanı ve basıncı)
6. Yapının ömrü boyunca maruz kalacağı tekrar sayısı
7. Üstyapının eğilme dayanımı
8. Üstyapının elastiklik modülü

RCC-PAVE programı SSB üstyapının herhangi bir araç yükü altındaki kritik bükülme dayanımını belirler. Burada esas yükler içteki tabakalardadır. Köşelerdeki kalınlık artırılması köşelere gelen yüklemenin sıkıntılarını çözer ve böylece tüm yapının kalınlığının artırılmasına gerek kalmaz. Tasarım açısından gelecek trafiğe bağlı olarak tabaka kalınlığı belirlenir.

Bu program kolay anlaşılabilir şekilde menülere ve yardım araçlarına sahiptir. Çok değişik araç tipleri ve yükleme özellikleri mevcuttur. Ayrıca kullanıcılarda kendi istedikleri yükleme tipini ve tekrarlarını uygulayabilirler.

Önceden girilmiş malzeme özellikleri kullanılabileceği gibi kullanıcı kendi belirleyeceği malzeme özelliklerini de girebilir. Hassasiyet grafikleri kullanıcıya tasarımdaki değişikliklerin etkilerini değerlendirme şansı sağlar.

RCC-PAVE programı gibi elektronik tasarım yöntemine ek olarak tablolar ve grafikler kullanılarak PCA yöntemi kullanılabilir. PCA yöntemine ait ve RCC-PAVE yöntemine eşdeğer örnekler 1 nolu referanstan görülebilir.

## 4. SSB ÜRETİMİ VE YOL YAPIMI

SSB yol yapımı genel hatlarıyla aşağıdaki 5 işlemde oluşmaktadır:

- Taban zemini, temel ve alttemel hazırlanması
- Beton karışımının hazırlanması
- Taşıma
- Yerleştirme
- Sıkıştırma
- Gerektiğinde derz yapımı
- Kül ve bakım
- Test şeridi yapımı



#### 4.1. Taban zemini, alttemel ve temel hazırlanması

Yoltabanı üzerine inşa edilecek olan alttemel veya temel ASTM D 1557 standardına göre maksimum kuru yoğunluğun minimum %95'ine kadar sıkıştırılmalıdır. Bütün bu tabakalar SSB yolun sıkıştırılmasına izin verecek rijitlikte olmalıdır. Granüler bir malzemeden imal edilen alttemel SSB yolun altındaki suyun drenajı amaçlı imal edilmektedir. Alttemel ve temel tabakasının düzgünlüğü SSB yolun düzgünlüğünün de önemli bir anahtarıdır. Betonun serilmesinden önce temel tabakası nemsiz, yabancı malzemelerden arındırılmış ve donmamış olması gerekmektedir. SSB nisbeten kuru bir karışım olduğu için temel ve alttemeldeki nem değişimlerinden etkilenmemektedir. Dolayısıyla, beton dökümü öncesi mümkün olduğunca homojen bir nemde olan temel tabakası elde etmek önemlidir. Kuru bir temel tabakası betonun nemini alacağından gerektiğinde fiskiyelerle temel in ıslatılması gerekebilir. Ancak, bu gibi durumlarda göllenmeye veya bir çamur tabakasının oluşmamasına dikkat edilmelidir [1].

#### 4.2. Beton karışımının hazırlanması

Yukarıdaki bu işlemlerden ilki olan beton karışımının hazırlanması Türkiye'de oldukça fazla miktarda mevcut olan yağ veya kuru karışım hazır beton tesislerinde yapılabilmektedir. Ancak, karışımın nispeten kuru olmasıyla bu tür kesikli üretim olarak tabir edilen tesislerde tesisin kapasitesinin oldukça altında çalıştırılması gerekmektedir. Yurtdışında, ABD ve İsveç'te SSB yol imalatlarında yüksek üretim kapasitesine sahip olan sürekli karıştırma tesislerinin kullanımı tercih edilmektedir [1, 2]. Sürekli karışım tesisleri, kolayca taşınabilmekte ve kurulabilmekte olup kesikli karışım tesislerine göre birim zamanda daha fazla üretim sağlayabilmektedir. En çok kullanılan ve önerilen tesis, malzemeler için ağırlık kontrolüne sahip olan sürekli karışım tesisleridir. Tesisin üretimi hızlı ve kesintisiz olduğunda, serme işleminin sürekliliği de sağlanmış olacaktır. Tesisin üretimi, sericinin yerleştirme ve sıkıştırıcının sıkıştırma hızıyla benzer olmalı ve tesis mümkün olduğunca uygulama alanına yakın bir yere kurulmalıdır.

#### 4.3. Beton karışımının taşınması

SSB'nun taşınması esnasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- SSB yol taşınması esnasında kullanılacak olan filonun özelliklerinin (kapasite ve tip) belirlenmesinde, beton karıştırıcının ve sericinin kapasitesi, taşıma mesafesi, iklim koşulları ve yerleştirme zamanı (gündüz / gece) gibi etkenler gözönüne alınmalıdır. Genelde, seçilen beton üretim tesisinden bağımsız olarak SSB, tesisten yol sahasına kadar damperli kamyonlarla taşınmaktadır.

- Damperli kamyonlar betonun yağmur, aşırı soğuk veya sıcak gibi çevresel koşullardan etkilenmemesi için su geçirmez bir branda ile kaplanmalı ve o şekilde sahaya doğru yola çıkmalıdır. Ayrıca, ulaşım esnasında meydana gelecek nem kaybını gözönüne alarak beton karışımının su miktarı sıkıştırma için gerekli optimum nem miktarından biraz daha fazla olacak şekilde ayarlanmalıdır.
- Damperli kamyonlar her taşıma işleminden sonra yıkanarak temizlenmelidir. SSB'nun dampere yapışması betonun sericiye dökülmesi esnasında problemlere yol açabilmektedir. Ayrıca, damperde kalması muhtemel nemini kaybetmiş eski betonun bir sonraki harman ile karışmaması sağlanmış olacaktır.
- Genelde SSB damperli kamyonlar ile serici önüne doğrudan boşaltılmaktadır. Ancak, kamyonların manevra yapamayacağı dar ve sıkışık alanlarda kepçeler veya özel taşıma bantları kullanılarak da boşaltma yapılabilir.
- SSB'nun kamyonlara yüklenmesi, taşınması ve boşaltılması esnasında ayrışmaması için gereken önlemler alınmalıdır. SSB damperli kamyonun önüne, ortasına ve arkasına olacak şekilde eşit harmanlar kullanılarak boşaltılmalıdır. Sericinin önüne boşaltma yapıma işlemi esnasında da gerekli özen gösterilmelidir.
- Düzenli bir yerleştirme yapabilmek için beton karıştırıcıdan sericinin önüne kadar geçen taşıma süresi mümkün olduğunca azaltılmalıdır. SSB işlenebilirliği zamanla azaldığından çimentonun suyla buluştuğu andan betonun sericinin önüne boşaltıldığı ana kadar geçen süre genelde 45 dakika ile sınırlandırılmalıdır. Bu süre gerektiğinde priz geciktiriciler kullanılarak uzatılabilmektedir. Ancak, özellikle ortam sıcaklığının 27 °C'yi aştığı durumlarda bu süreler daha da kısalabileceği unutulmamalıdır.

#### 4.4. Beton karışımının yerleştirilmesi

SSB genelde bir asfalt serici ile yerleştirilebilmektedir. Asfalt sericide bazen küçük bazı modifikasyonlar (besleme kovası ve master tablası arasındaki açıklığın büyütülmesi, master tablası önündeki helezonların ayarlanması gibi) yapılması gerekmektedir. Asfalt serici SSB'nu tüm şerit genişliği boyunca referans yağ yoğunluğun en az %80'ine kadar sıkıştırabilmelidir. Titreşimli master ve en az bir tokmağa (bıçağa) sahip olan gelişmiş bir beton asfalt sericisi ile kabul edilir performans elde edilmiştir. Bazı yüksek sıkıştırılmalı serici tipleriyle bu yoğunluk %90'a kadar çıkabilmektedir.

Bazı yüksek sıkıştırılmalı tablalar ihtiva eden sericilerde tek bir tabakada 25 cm kalınlığa kadar yerleştirme yapılmış olsa da genelde asfalt sericiler ile hazırlanan tabaka kalınlıklarının 15 cm'yi geçmemesi, tabaka kesitinde homojen bir yoğunluğun elde edilebilmesi için, önerilmektedir. Öte yandan saha uygulamalarında sıkıştırma öncesi ve sonrası tabaka kalınlıkları arasında,

## MAKALE ARTICLE

serici tipi, karışım özellikleri ve tabaka kalınlığına bağlı olarak, yaklaşık %10 ile 25 arasında bir fark olduğu gözlenmiştir. Eğer SSB iki farklı tabaka halinde dökülecekse iki eşit kalınlıkta dökülmesi önerilmektedir. Üst ve alt tabakalar arasındaki zaman farkı karışım özellikleri ve ortam şartlarına bağlı olarak değişse de mümkünse 60 dakikayı geçmemesi her iki tabakanın bağlanarak birlikte çalışması için önemlidir. Eğer bu süre aşılmışsa iki tabaka kısmi olarak bağlanmış kabul edilmekte bu da yapısal kapasitenin tam olarak edinilememesine neden olmaktadır. Dolayısıyla, böylesi durumlarda üst tabaka yerleştirilmeden önce alt tabaka hava veya su jeti ile temizlenmeli ve arada ince bir yüksek kıvamlı harç karışımı uygulanmalıdır.

Ayrışmanın engellenmesi için besleme kovanının hiçbir zaman boş bırakılmaması gerekmektedir. Sericinin durup kalkması yüzey kalitesinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla, gereksiz dur-kalklardan kaçınmak gerekmektedir. Beton yerleştirme hızı sericinin kapasitesine, serilen tabakanın kalınlığına, beton karıştırıcının kapasitesine, taşıma mesafesi gibi diğer etkenlere göre sabit olacak şekilde önceden planlanmalıdır.

### 4.5. Beton karışımının sıkıştırılması

SSB karışımının sıkıştırılması aşaması, kaplamanın yoğunluğu, dayanımı, geçirimsizliği - dolayısıyla dayanıklılığı - ve yüzey düzgünlüğü açısından oldukça önemlidir. İlk sıkıştırma genellikle 10 ton ağırlığa sahip çift tamburlu titreşimli çelik bandajlı silindir ile yapılmaktadır (Şekil 7). İlk sıkıştırmanın ardından, 20-30 tonluk lastik tekerlekli silindir ile geçiş yapıldığında titreşimli sıkıştırma sonrasında ortaya çıkan kusurlar ve küçük boşluklar kapatılmaktadır. Sıkıştırma, serme işleminden sonraki 15 dakika içinde başlamalı ve tesiste beton karışımı hazırlandığı andan itibaren 45 dakika geçmeden tamamlanmalıdır. Sıcak havalarda ise, karıştırmanın bitişi ile sıkıştırmanın bitişi arasında geçen süre 35 dakikayı aşmamalıdır.



**Şekil 7 .** SSB kaplamanın çelik ve lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılması [1]

Genelde, 10 ton ağırlıktaki çift tamburlu titreşimli çelik bandajlı silindir ile yapılacak dört ile altı geçiş 15-25 cm kalınlıktaki tabakaların %98'inde gereken yoğunluğa ulaşılmasını sağlamıştır. Fazla geçişlerden dolayısıyla fazla sıkıştırmadan, özellikle kesitin üst kısmında yoğunluk azalmasına yol açabileceği için kaçınılmalıdır. Yoğunluğun anında belirlenmesi için tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan nükleer yoğunluk ölçme cihazları kullanılmalıdır (Şekil 8). Özellikle yol şeridinin kenarlarında sıkıştırma yaparken, fazla sıkıştırma buralarda stabilitenin kaybolarak kenar göçmelerine yol açabileceğinden titreşimli silindirlerin kullanılmasında özen gösterilmelidir.



**Şekil 8.** Yoğunluk ölçümünde nükleer cihazların kullanımı [1]

### 4.6. Derz Yapımı

SSB yollarda rötire, ve dolayısıyla çatlak genişlikleri azalmış olacağından genelde bir derz kesimi işlemi yapılmamaktadır. Çatlaklar, betonun özelliklerine ve kaplama kalınlığına göre değişmekle birlikte, genelde 6 ile 18 m aralıklarda oluşmaktadır [1]. Bu çatlakların ileride sorun yaratmaması için SSB yollarda diğer beton yollarda olduğu gibi gerekli drenaj önlemleri alınmalıdır.

Ancak, herhangi bir derz kesme işlemi yapılacaksa, diğer beton yollarda olduğu gibi kesme zamanlaması ayarlanmalı ve kesme zamanı kesme işlemi esnasında agregaların hamurdan ayrılmaması sağlanacak kadar geç ve rastgele çatlaklar oluşmadan önce yapılmalıdır. Kesme derinliği kaplama kalınlığının yaklaşık 1/4'ü kadar olmalıdır.

Enine derzler genelde 20 cm'den daha az kaplama kalınlıkları için 6 m civarında seçilmektedir. 20 cm'den daha kalın olan kaplamalar içinse bu miktar 3 kat kadar artırılabilir. Boyuna derzler ise enine derzlerden genelde daha kısa seçilmektedir. Ancak, endüstriyel tesislerin sahaları gibi oldukça

geniş bir kaplama alanı varsa, genelde kare şeklinde derzler oluşturulmaktadır. Böylesi uygulamalarda, derz aralıkları 20 cm'den daha az kaplama kalınlıkları için genelde 4.5 ile 6 m., daha kalın kaplamalarda ise kaplama kalınlığının (m olarak) yaklaşık 2.3 katı kadar aralıklarda olmalıdır.

#### 4.7. SSB'nun bakımı

SSB'nun bakımı ya da kürü betonun istenilen mukavemete ve dayanıklılığı sahip olması için çok önemlidir. SSB'da terleme gözlenmeyeceği için buharlaşma ile yüzeyden su kaybı betonun yerleştirilmesini takiben başlayacaktır. Dolayısıyla, kür işlemine sıkıştırma işleminin tamamlanmasından sonra hemen başlanmalıdır. Bu işlem için genellikle kür kimyasalları kullanarak beton yüzeyinde bir film tabakası oluşturulması sağlanmakta ve nem kaybı engellenmektedir (Şekil 9). Ancak, bu tür kimyasallar SSB'nun yüzeyindeki açık yapısından dolayı normal saha beton uygulamalarına göre daha 1.5-2 kat daha fazla kullanılmalıdır. Geleneksel kür yöntemleri olan sulama, fiskeleme, ve ıslak branda ile yolun üzerinin örtülmesi uygulamaları SSB yollar için çok uygun görünmemektedir [1].



Şekil 9. SSB yolda beyaz renkli kür kimyasalı uygulanması [1]

#### 4.8. Test şeridi yapımı

Yol müteahhidinin deneyimi ve yol projesinin büyüklüğüne göre bir test şeridi yapımı SSB yolun tasarımı, yapımı, kürü, derz oluşturulması ile sahada ve laboratuvarında gerekli testlerin yapılması aşamalarının gözlenmesi açısından oldukça yararlıdır. Test şeridi benzer bir yol taban zemini üzerinde aynı malzemeler ve ekipmanlarla yapılmalıdır. Bütün işlemleri gözlemleyebilmek için, yeterince uzun bir test şeridi inşa edilmeli ve derzlerin oluşturulması aşamasını da izleyebilmek için en az iki serici genişliğinde olmalıdır.

SSB yol yapımı öncesi bir test şeridi imalatı ile aşağıdakilerin yapılması mümkün olacaktır [1]:

- Temel tabakasının eğim, yoğunluk ve nem gibi özellikleri incelenecek
- Bütün malzemelerin şartnamelere ve standartlara uygunluğu test edilecek
- Beton üretim tesisinin istenen üretim hızında ve homojenlikte beton üretebildiği doğrulanacak
- Beton karışımının tasarım şartlarını sağladığı doğrulanacak
- SSB'nun depolama, işleme ve taşınmasının uygunluğu kontrol edilecek
- Yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin kalitesi incelenecek
- Silindirlerin sıkıştırma zamanlaması ve sıralaması ile istenen yoğunluğun kaç geçiş sonrası elde edileceği onaylanacak
- Bitişik kaplama şeritlerinin yerleştirilmesi ve zamanlaması doğrulanacak ve derz kalitesi incelenecek
- Yapım esnasında alınacak olan numunelerin örnekleme metodları değerlendirilecek
- Gerekirse beton karışım oranlarında düzeltme yapılabilecek.
- Yüzey düzgünlüğü ve uniformitesi değerlendirilecek
- Proje şartnamesinin gereği olan yoldan karot ve giriş numunesi alımı ve bunlar üzerinde deneyler yapılabilecek.

## 5. TÜRKİYE'DE SSB YOLLAR

Yukarıdaki tarihesinden de anlaşılacağı üzere SSB yollar yurtdışında son 40-50 yıldır inşaa edilmekte olup uzun vadedeki performansları ve olumlu özellikleri gözlenmiştir. Ancak, ne yazık ki ülkemizde bu teknolojinin kullanılmaya başlanması oldukça yenidir. Ülkemizde ilk SSB uygulaması 1982-1983 yıllarında Karakaya Barajı mansap batardosunda yapılmıştır [11]. Ardından, Suçatı, Çine, Cindere ve Beydağ Barajlarının gövdesinde 1990'lı yılların ortalarından itibaren kullanılmaya başlanmış olup, halen birçok hidroelektrik santrali imalatında tercih edilmeye başlanmıştır [12]. SSB yol uygulaması ise sadece iki tanedir. Bunlar biraz sonra detaylı bilgi verilecek olan Antalya ve Denizli Belediyesi uygulamalarıdır.

### 5.1. Antalya Büyükşehir Belediyesi Uygulaması

Antalya Büyükşehir Belediyesi, dahil olduğu bir Avrupa Birliği 6. Çerçeve Projesi kapsamında Türkiye'nin ilk SSB yol imalatını gerçekleştirmiştir. Kısaca "Ecolanes" olarak isimlendirilen ve İngiltere'deki Sheffield Üniversitesi tarafından yürütülen bu proje, "Karasal Ulaşım İçin Ekonomik ve Sürdürülebilir Kaplama Üstyapısı" başlığını taşımaktadır. Proje kapsamında araç lastiklerinden elde edilen çelik tellerin rijit beton üstyapı imalatında kullanılabilirliği çeşitli laboratuvar deneyleri ve saha uygulamalarıyla gösterilmiştir [13].

Bu bağlamda projenin Türkiye ortağı olan Antalya Büyükşehir

## MAKALE ARTICLE

Belediyenin'ce belirlenen Necip Fazıl Kısakürek Caddesi'nin 150 m boy ve 8.6 m genişliğindeki bir kısmının rehabilitasyonu yapılmıştır (Şekil 10). Yol rehabilitasyonu kapsamında eski asfalt yol ve temel tamamen kaldırılmıştır. Yeni yol, 20 cm kalınlığında bir temel, 10 cm kalınlığında bir alttemel, 19 cm kalınlığında SSB ve en üstte 4 cm kalınlığında bir asfalt tabaka olmak üzere dört katmandan oluşturulmuştur. SSB ise dört farklı karışım olarak imal edilmiştir. 70 m boyunda ve 5.1 m genişliğindeki ilk kısmında %3 oranında araç lastiğinden geridönüştürülmüş çelik tel; 40 m boyunda ve yine 5.1 m genişliğindeki ikinci kısmında %2 oranında çelik tel; 40 m boyunda ve 5.1 m genişliğindeki üçüncü kısmında herhangi bir çelik tel kullanılmamış ve son olarak 150 m boyunda ve 3.5 m genişliğindeki dördüncü bir kesimde ise %3 oranında araç lastiğinden geridönüştürülmüş çelik tel kullanılmıştır [13].

Antalya'daki uygulamada SSB yol ve karışım tasarımı Sheffield Üniversitesi tarafından yapılmıştır. Uygulama esnasında Belediye'ye ait bir asfalt serici, üzerinde çok küçük bazı modifikasyonlar yapıldıktan sonra kullanılmıştır (Şekil 11). Temmuz 2009 yılında inşa edilen bu yol halen kullanımdadır.



Şekil 10. Antalya'daki SSB Uygulanan Yolun Önceki Görünümü [10z]



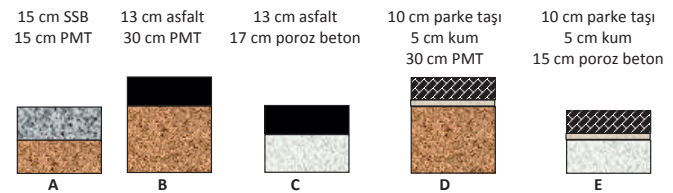
Şekil 11. Antalya'daki SSB Uygulaması

### 5.2. Denizli Belediyesi Uygulaması

Türkiye'deki gerçek anlamdaki ilk SSB yol uygulaması ise Denizli Belediyesi tarafından Antalya'daki pilot uygulamanın görülmesinin ardından yapılmış ve halen de Belediye tarafından daha fazla tercih edilen bir kaplama türü olarak yapılmaya devam edilmektedir. Aralık 2009 yılından beri Denizli Belediye'since yapılan SSB kaplama miktarının 500,000 m<sup>2</sup>'yi aştığı tahmin edilmektedir. Belediye'nin SSB yol tercihi ise yapmış oldukları bir yol üst yapısı kesit değerlendirme analizi sonucunda olmuştur (Şekil 12).

Şekil 12'de belirlenen 5 alternatif yol üst yapısı kesitinde birim maliyet açısından D numaralı kesidin ardından SSB beton yol en ucuz ikinci seçeneği oluşturmuştur. SSB yolun diğer kesitlere göre üstünlükleri, daha az kazı yapılması ihtiyacı dolayısıyla altyapıya daha az zarar verme ihtimali ve hızlı inşa edilebilmesi sayılabilir.

Denizli Belediye'since yapılmış olan SSB yol ve karışım tasarımı ise Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nce yapılmıştır. Yol inşaatında kullanılan ekipmanlar özel bir firma tarafından getirilmiş ve serici üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır (Şekil 13). Beton karışımında yaklaşık 300 kg çimento ve 20 kg çelik tel kullanılmış, agrega maksimum dane boyutu ise 15 mm olarak seçilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı hazırlanan kirişi numunelerden belirlenmiş ve karışımın eğilme dayanımının 3.5 MPa'nın üzerinde olması hedeflenmiştir.



Şekil 12. Denizli Belediyesi Yol Üstyapı Kesitleri Karşılaştırması



Şekil 13. Denizli'deki SSB Uygulaması

## 6. SONUÇ

Ülkemizde halen karayollarının yük taşımacılığındaki payı %92, yolcu taşımacılığındaki payı ise %95'tir [14]. Öte yandan, ülkemizde, yaklaşık 2 000 km'si otoyol, 31 000 km'si devlet yolu, 30 000 km'si il yolu olmak üzere toplam 63 000 km'lik bir karayolu ağı şebekesi bulunmaktadır. Bu yolların yaklaşık %80'i asfalt sathi kaplama, %7'si BSK olarak kaplanmış olup geri kalanı stabilize veya toprak yoldur. Yaklaşık, 300 000 km uzunluğundaki köy yollarımızın ise yaklaşık %30'u asfalt sathi kaplama olarak kaplanmış olup geri kalanı stabilize veya toprak yoldur [14]. Son on yılda Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nin (TÇMB) gayretleriyle başlatılan ve birkaç ilde daha oldukça az miktarda yapılan beton yol uygulamaları oldukça sınırlı kalabilmiş, ve bir alternatif olarak beton yolların gelişmesi mümkün olamamıştır.

Ayrıca, ülkemizdeki yollarda bulunan ağır taşıt oranının Avrupa'ya göre yaklaşık dört kat daha fazla olduğu belirtilmekte [15], ağır taşıtların ise istihap hadlerinin oldukça üzerinde yük taşıdığı bilinmektedir.

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) 2007-2011 yıllarına ait stratejik planına [16] göre KGM'nün GZFT (Güçlü Yanlar, Zayıf Yanlar, Fırsatlar, Tehditler) analizi yapıldığında en önemli tehditlerden biri olarak "petrol ve petrol ürünlerinin fiyatlarının artması ile yapım, bakım ve işletme masraflarının artması" belirlenmiş durumdadır. Nitekim, geçtiğimiz yıl düzenlenen 2. Karayolu Ulusal Kongresi sunumlarında, Gürkan ve ark. Karayolları 7. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde kalan BSK'lı yolların bir performans değerlendirmesini yapmış, ve çok çarpıcı bir şekilde 7. Bölge BSK'lı yol ağının sadece %25.4'lük bir bölümünde yolların iyi durumda olduğu saptamasını yaparak, %23.6'lık bir bölümünde hemen iyileştirme çalışmalarına başlanması gerektiğini saptamışlardır [17]. Dolayısıyla, yukarıda belirtildiği üzere oldukça fazla sayıda ağır taşıtın yola çıktığı ülkemizde böylesi saptamalar hiç de şaşırtıcı değildir.

Yapımında asfalt sericiler ve silindirler gibi asfalt ekipmanları kullanılarak inşa edilebilen ve yukarıda kısaca özellikleri

## MAKALE ARTICLE

ile üstünlüklerinden bahsedilen SSB yollar ağır taşıtlar dolaşımıyla ağır yükler için ideal bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Yukarıda verilen örneklerden de görüleceği üzere yurtdışında birçok ülkede ekonomik ve kalıcı bir çözüm olduğunu göstermiş ve gittikçe artan bir şekilde kullanılmaya başlanılmıştır. Dolayısıyla, SSB yollar gerek KGM'nün yetki alanında bulunan ve özellikle ağır taşıt trafiği bulunan yollarda, ayrıca belediyelerin kontrolü alanındaki şehiriçi yollarda ve il özel idareleri yetki alanında bulunan köy yollarında yapım yöntemlerindeki kolaylık, ekonomikliği ve kalıcılığı gözönünde bulundurulduğunda, önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

**Teşekkür:** Yazarlar, özellikle Denizli Belediyesi uygulaması ile ilgili bilgileri ve resimleri bizimle paylaşan Modern Beton Kalite Güvence Müdürü Sayın Nagehan Haldenbilen'e teşekkürü bir borç bilir.

## Kaynaklar

1. Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C., (2010). Guide for Roller Compacted Concrete Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University.
2. Açar, E., Taşdemir, Y., (2007). "Silindir ile sıkıştırılabilen Beton Yollar", Türkiye Hazır Beton Birliği web-sitesi, <http://www.thbb.org>
3. Pittman, D., (2012). "U.S. Army Corps of Engineers Experience with Roller-Compacted Concrete Pavements", Presented at a Symposium on Integrated Cement Based Pavement Solutions, Part 2: Roller Compacted Concrete Pavements, American Concrete Institute web-sitesi, <http://www.concrete.org>
4. Adaska, W., (2006). Roller-Compacted Concrete (RCC), PCA Research & Development Information Serial No. 2975. Skokie, IL: Portland Cement Association.
5. Taylor, P.C.; S.H. Kosmatka; G.F. Voigt; et al. (2006). Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements, and Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual, National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University.
6. Neville, A.M., (1995). Properties of Concrete, Pearson Education Limited.
7. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Mc-Graw Hill.
8. Portland Cement Association. 1987. Structural design for roller-compacted concrete for industrial pavements, Concrete Information. Publication IS233.01. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
9. Delatte, N. (2008). Concrete Pavement Design, Construction, and Performance, Abingdon, UK: Taylor and Francis.
10. Portland Cement Association. (2002). RCC-PAVE Computer Program. Item Code MCO43. Skokie, IL: Portland Cement Association.
11. Öztürk, A., Yıldız, D. (1998). "Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj Teknolojisi ve Türkiye'deki Uygulamaları", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Mühendislik Haberleri, No. 393, p. 39-46
12. Özcan, S. (2008). "Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Farklı Yastık Karışımları ile Yapışma Verimliliği", ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
13. Ecolanes publishable final report. (2010), <http://ecolanes.shef.ac.uk/>
14. Yeğinobalı, A., Başkoca, A., (2005). "Geleceğin Yolu: Afyonkarahisar'daki Beton Yolun Hikayesi", Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü Yayınları, Ankara.
15. THBB Beton Yollar Teknik Çalışma Grubu, (2003). "Beton Yollar", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Mühendislik Haberleri, No. 427, p. 38-44.
16. Karayolları Genel Müdürlüğü, (2007). "T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2007-2011 Stratejik Planı".
17. A.G. Güngör, B. Hacak, ve N. Ünal, (2011). "Üstyapı Yönetim Sistemi KGM Uygulamaları", 2. Karayolu Ulusal Kongresi Sunumlar Kitapçığı, 11-13 Ekim, Ankara, 441-478.