








Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Dayanıklılık Performansı ve Boyutsal Kararlılığı: Kapsamlı İnceleme

 Ali MARDANI-AGHABAGLOU^{a,*},  Sultan Husein BAYQRA^a,  Süleyman ÖZEN^a,  Zia Ahmad Faqiri^a,  Kambiz Ramyar^b

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Nilüfer, Bursa, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, Bornova, İzmir, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: alimardani@uludag.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.541786

ÖZET

Silindirle sıkıştırılmış betonların (SSB), geleneksel betonlara kıyasla üretiminin hızlı olması, maliyetinin düşük olması ve daha iyi dayanıklılık performansı göstermesi nedeniyle günümüzde yaygın olarak tercih edilmektedir. SSB karışımları hava limanları, fabrikalar, petrol istasyonları, çeşitli endüstriyel zeminler ve özellikle barajlar, yollar gibi birçok alanda uygulanmaktadır. Bu çalışmada SSB uygulamalarının avantaj, dezavantaj, tarihçesi, mekanik ve durabilite özellikleri üzerine yapılan araştırmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Mekanik özellikler kapsamında uçucu kül, yüksek fırın cürufu, çelik ve polipropilen lifler, geri kazanılmış malzemeleri içeren SSB karışımların basınç, eğilme dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, yorulma davranışı ve sünme performansı araştırılmıştır. Durabilite performansı olarak SSB karışımların yoğunluk özellikleri, geçirgenlik, boyutsal kararlılığı, donma-çözülme direnci ve termal özellikleri kapsamında literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silindirle sıkıştırılmış beton, Mekanik özellikler, Durabilite performansı, Mineral katılar, Boyutsal kararlılık

Durability Performance and Dimensional Stability of Roller Compacted Concrete: Comprehensive Review

ABSTRACT

Nowadays, roller compacted concretes (RCC) are preferred because of their fast production, low cost and better durability performance than the conventional concretes. RCC mixtures are applied in many areas such as airports, factories, oil stations, different industrial floors and especially in dams and roads. In this study, a comprehensive literature review about the advantages, disadvantages, history, mechanical and durability performance of RCC application was made. For this purpose, the mechanical properties, such as compressive, flexural, tensile strengths, modulus of elasticity, fatigue behavior and creep performance of RCC mixtures containing fly ash, blast furnace slag, steel and polypropylene type fibers and recycled materials were reviewed. Besides, Studies about the durability performance of RCC mixtures, such as transport properties, freeze-thaw

resistance, dimensional properties, density and thermal characteristics in the literature were investigated.

Keywords: Roller compacted concretes, Mechanical properties, Durability performance, Mineral admixtures, Dimensional stability

I. GİRİŞ

Silindire Sıkıştırılmış Beton (SSB), 80'li yılların başında geliştirilmiş, geleneksel beton gibi çimento, su, ince agrega ve iri agregalardan oluşan bir beton türüdür. Ancak, SSB geleneksel betona göre çok daha düşük çimento dozajına sahip olup, daha kuru kıvamdadır (sıfır çökme). Düşük çimento dozajı nedeniyle ekonomik bir beton olduğundan, SSB'nin yol inşaatlarında ve barajlarda kütle beton olarak kullanımı uygundur. SSB karışımı, damperli kamyonlar veya nakliye araçlarıyla uygulama alanına götürülür. Uygulama alanında finişer ile yayılır daha sonra silindirler ile sıkıştırılır [1]. Çok kuru kıvamından dolayı yeterli ve etkili bir sıkışmanın sağlanabilmesi için SSB'de normal betona oranla çok daha yüksek bir sıkıştırma enerjisi gerekmektedir.

SSB'ler tek veya çift tamburlu, kendiliğinden tahrikli ve titreşimli ağırlığı 10, 15 veya 20 ton olan silindirler ile uygulanmaktadır. İstenilen derecede sıkıştırma işlemi gerçekleşmediği durumlarda el tipi sıkıştırma ekipmanları kullanılmaktadır. SSB uygulamasında kullanılan silindirlerin işletme frekansı en az 1800-3200 devir/dakika, amplitude ise 0,4-0,8 mm arasında olması gerekmektedir. Ayrıca, silindir tamburunun her bir metresi 6000-8000 kg arasında dinamik kuvvet uygulaması istenmektedir.

SSB karışımları, belirli bir tabaka kalınlığında döküldüğünde, istenilen özellikleri tam sıkışmış bir malzeme olarak sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. SSB'nin sıkıştırılabilirlik özelliği; karışımın serbest su içeriği, çimento ve puzolan içeriği, kum miktarı, maksimum agrega çapı, agrega tane boyutu dağılımı ve kullanılan katkıların özellikleri gibi karışım parametrelerinden etkilenir [2]. Bunlardan sıkıştırılabilirlik derecesini en fazla etkileyen parametre karışımın serbest su içeriğidir. Karışımın su miktarı optimum seviyenin üzerine çıktığında, işlenebilirlik artar, ancak bu kez de titreşimli silindirin ağırlığının etkisi ile serilen beton tabakası mesnet oluşturacak kadar rijit olmaz. Bundan dolayı tasarım mümkün olduğunca kuru kıvamda olacak şekilde ayarlanmalıdır [1]. Çok kuru kıvamdan dolayı, geleneksel çökme deneyi ile ölçülebilen bir çökme değeri yoktur. İşlenebilirlik düzeyi Vebe deneyi gibi kuru kıvamlı beton karışımlar için uygun olan bir deney yöntemi ile belirlenebilir. Çökme değeri sıfır, Vebe süresi 5 saniye olan kıvamdaki bir karışımın silindir titreşimi olmadan sıkıştırılması zor olabilir. Baraj inşaatları için, Vebe süresi 15 saniye civarında olan karışımlarda, 10 tonluk titreşimli silindirin tabaka üzerinden 4-6 defa geçişinin uygun sıkışmanın sağlanması için yeterli olduğu ve genel olarak 15-20 sn'lik Vebe süresine sahip karışımların uygun olduğu belirtilmektedir [2].

SSB karışımlardaki ince agrega miktarı, su miktarı kadar olmasa da karışımın sıkıştırılabilirliğini etkiler [2]. Uçucu kül, su azaltıcı ve priz geciktirici katkıların kullanımı da SSB'nin sıkıştırılabilirliği açısından yararlıdır. Uçucu kül, çimento yerine ikame olarak kullanıldığında, belirli bir kıvama sahip karışımın su ihtiyacını azaltabilir [1].

Uçucu kül, aynı zamanda düşük hamur hacmine sahip karışımlarda işlenebilirliği ve SSB'nin yoğunluğunu arttırmak için mineral filler olarak da kullanılabilir. Uçucu kül içeren SSB'lerin daha az boşluk hacmine sahip olduğu (Cheng ve diğerleri 2000), ayrıca çimentoya ikame olarak %15 standart dışı uçucu kül kullanılan SSB karışımlarının 28 günlük dayanım özelliklerinin uçucu kül içermeyen

karışımlara eşit veya daha iyi olmasının yanı sıra SSB'nin de işlenebilirliği ve donma-çözülme etkilerine karşı direncini de arttırmaktadır.

A. AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

SSB, barajlar, kereste depoları, ağır nakliye yolları, yükleme rıhtımları, liman tesisleri ve otoparklar gibi çeşitli uygulamalarda uzun yıllardır kullanılmaktadır. Son zamanlarda, SSB karışımları, şehir sokakları, otoyollar ve şehirlerarası yollar olmak üzere karayolu uygulamalarında daha yaygın hale gelmiştir [3].

Söz konusu betonların avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

Avantajları;

- İnşaat sırasında maliyetin düşürülmesi ve inşa zamanının azalması [1],
- Geleneksel betona göre daha düşük su/çimento oranı kullanılması [4],
- Geleneksel betona göre maliyetinin düşük olması [5,6],
- Küçük inşaat ekipmanları, asfaltlama parkuru, el işi imalatı gerektirmemesi ve uzun süreli yükler altında sünme davranışının ihmal edilebilir olmasıdır [7].

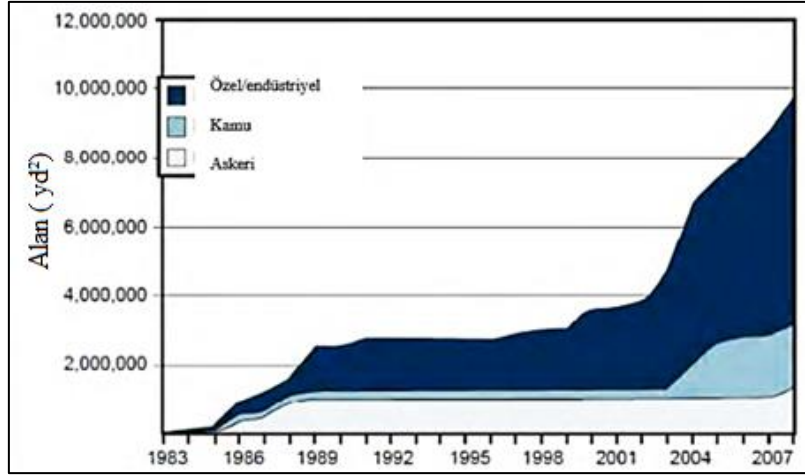
Dezavantajları;

- Uygulama sırasında yüzeylerde elmas taşlama uygulaması olmadığından, SSB'nin yapısı ve yüzey düzgünlüğü yüksek hız ve yoğun trafik altında hizmet verecek kaplamalar için uygun olmayabilir.
- Bir transmikser veya hazır karıştırıcı kamyonunda hazırlanmış SSB'nin miktarı karışımının kuru olmasından dolayı aynı araçlarda hazırlanan geleneksel betonun miktarından daha düşük olmaktadır [8].

B. TARİHÇE

Silindirle sıkıştırılmış beton kaplama yapımı çimento stabilize toprak veya çimento esaslı malzemeler gibi gelişen malzeme teknolojisinin yeni bir uygulamasıdır. SSB, yollarda kaplama tasarımı ve inşası için temel ve alt temel olarak uzun süredir kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar 1. dünya savaşından önce birçok ülkede kullanılmıştır [9]. SSB ilk olarak 1942 yılında Kuzey Amerikada Yakima-Washington yol inşaatında ABD Ordusu askeri birliklerinin (U.S.A.C.E.) Seattle Bölümü tarafından uygulanmıştır. 1976 yılında, SSB kaplamalar ağaç gövdelerine bir zemin oluşturmak için Kanada'nın Vancouver kentinde ilk kez kullanılmıştır. Vancouver'de 1976-1978 yılları arasında, Kraliçe Charlotte Adalarında SSB kullanılarak üç benzer muhafaza kutusu yapılmıştır. 1980'lerin başlarında, ABD Ordusundaki mühendisler, askeri tesislerin yapımında SSB kullanmaya başlamıştır. Bu amaçla, 1983 yılında, 229-330 mm kalınlığında ve 392 m²'lik bir yol ile 254-330 mm kalınlığında ve 493 m²'lik bir deponun geçiş yolu, silindirle sıkıştırılmış beton kullanılarak yapılmıştır [10]. 1984 yılında, Almanya'nın Hannover kentinde bulunan Araştırma Laboratuvarındaki ABD Ordusu mühendisleri, SSB'nin donma-çözölmeye karşı dayanıklılığını incelemek amacıyla, SSB ile yol inşa etmiş ve araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu uygulamadan alınan olumlu sonuçtan sonra askeri yollarda SSB kullanımı onaylanmıştır [11]. Yine 1984 yılında ABD Ordusu mühendisleri Teksas'taki askeri araçların park alanında SSB kullanarak ilk tam ölçekli yolu inşa ettiler [12]. 1980'lerin ortalarında, ağır sanayide silindirle sıkıştırılmış beton kullanma eğilimi, odun ve maden endüstrisinin genişlemesi ile

artmıştır. 1985'te, Teksas'ta 44313 m²'lik meydan inşa etmek için SSB kullanılmıştır [13]. 1986 yılında, bir depo zeminini kaplamak amacıyla 107021 m²'lik alanda SSB kullanılmıştır. 1985 yılında, ABD Ordusu mühendisleri Washington'da silindirle sıkıştırılmış beton kullanarak toplam 6,9 hektarlık iki büyük cadde inşa etmiştir [14]. 1986 ve 1988 yılları arasında Boston'da Moran Marine ve Conley terminallerinin yapımında SSB kullanılmıştır [15]. Japonya'da ilk olarak 1987 yılında SSB kullanılmaya başlanmıştır. Bu süreç 1997 yılına kadar devam etmiştir ve yaklaşık 1.800.000 m² SSB uygulaması gerçekleştirilmiştir [16]. 1985 yılında ilk defa Portland Uluslararası havaalanının pisti inşasında SSB kullanılmıştır [17-18]. Kuzey Amerika'da, kaldırım uygulamaları için SSB kullanımı, özellikle düşük hacimli yollar ve otoparkların yapımında 2000'li yılların başından itibaren önemli ölçüde yaygınlaşmıştır (Şekil 1) [19].



Şekil 1. Kuzey Amerika'da SSB kaplamaların kullanımının artışı [20]

SSB yöntemi uygulanarak yapılmış bazı barajlar Şekil 2'de, askeri park alanlarında ve tren istasyonlarındaki SSB uygulamalarından örnekler ise Şekil 3'te gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 2. a) Etiyopya'da Gilgel Gibe III Barajı, b) Güney Afrika'daki Wolwedans Barajı



Şekil 3. a) Askeri park alanı, b) Tren istasyonu

II. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETONUN ÖZELLİKLERİ

A. MEKANİK ÖZELLİKLER (BASINÇ, EĞİLME ve ÇEKME DAYANIMI)

SSB'lerin basınç dayanımı öncelikli olarak bağlayıcı malzeme türü ve içeriği, agreganın kalitesi ve gradasyonu, su muhtevası ve sıkıştırma derecesinden etkilenmektedir [21]. SSB'lerin mekanik özellikleri dikkate alındığında, SSB'nin basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkinin geleneksel betondakine benzer olduğu tespit edilmiştir. SSB karışımlarının çekme dayanımı, silindir numuneler üzerinde yarmada çekme deneyi yaparak kolay ve güvenilir bir şekilde ölçülmektedir. Seçilen bazı projelerde SSB uygulamalarındaki tipik eğilme ve yarmada çekme dayanımı verileri Tablo 1'de listelenmiştir [5]. Aşağıda, SSB konusunda yapılan bazı araştırmalardan bahsedilmiştir.

Tablo 1. Amerika'daki SSB projelerinde kullanılan betonların eğilme ve yarmada çekme dayanımları

Proje	Yaş (Gün)	Kiriş ve silindir numunelerin test sonuçları	
		Ortalama eğilmede- çekme dayanımı (MPa)	Ortalama yarmada- çekme dayanımı (MPa)
Ft. Stewart	90	6,96	-
Ft. Hood	7	4,56	-
	28	5,72	-
Harvey kışlası	7	-	2,33
	28	5,4	2,78
Ft. Cambell	7	-	2,75
	28	4,46	-
Aberden Deneme alanı	7	3,81	2,61
	28	4,32	3,12

a. UÇUCU KÜLÜN SSB'nin MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Mardani-Aghabaglou ve Ramyar [22], tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül kullanımının SSB'lerin bazı mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çimento dozajı ve maksimum agrega tane çapı sırasıyla 250 kg/m³ ve 25 mm olarak belirlenmiş ve karışımların tasarımı maksimum yoğunluk metoduna göre yapılmıştır. Uçucu külün etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, uçucu kül içermeyen kontrol serisine ilaveten hem çimento yerine hem de agrega yerine ağırlıkça %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanılarak SSB karışımları üretilmiştir. Böylece toplamda, 0,30, 0,35, 0,40 ve 0,45 su/bağlayıcı oranlarında 28 farklı karışım grubu hazırlanmış ve optimum su içeriğine sahip 7 karışım grubu seçilerek bu karışımların 7, 28, 90 ve 180 günlük basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Sonuçta, uçucu külün çimento yerine kullanıldığı karışımlarda (A serisi) uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte tüm yaşlarda mekanik özelliklerin kontrol serisine göre azaldığı tespit edilmiştir. Uçucu külün agrega yerine kullanıldığı SSB serisinde (B serisi) ise uçucu kül kullanım oranı atışı ile tüm yaşlarda mekanik özelliklerin kontrol serisine göre arttığı gözlemlenmiştir. A serisindeki azalmanın su/bağlayıcı oranından kaynaklandığı, B serisindeki artışın ise uçucu kül miktarının fazla olmasının işlenebilirliğe ve dolayısıyla sıkışmaya sağladığı olumlu katkıdan kaynaklandığı belirtilmiştir.

Rao ve diğerleri [23], granit kırma kumun uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılmış betonun (UKSSB) dayanımına etkisini incelemişlerdir. Çimentonun uçucu kül ile kısmen yer değiştirdiği UKSSB karışımlarında, ince agregaların tüm kombinasyonları için uçucu külün %0'dan %60'a çıkmasıyla dayanım değerleri azalmıştır. Ancak, kontrol karışımına kıyasla, granit kırma kum içeren UKSSB karışımlarının dayanımındaki azalma oranı daha düşük olmuştur. Bunun nedeni, uçucu külün puzolanik reaksiyonunun çimentodan daha yavaş olmasıdır. Hatta 90 güne kadar bile dayanıma katkısı çimentodan oldukça düşük olmuştur.

Atiş ve diğerleri [24], tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda uçucu kül kullanımının SSB'lerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda maksimum agrega tane çapı 16 mm, çimento dozajları 200, 300 ve 400 kg/m³ ve uçucu kül oranları ise çimento yerine ağırlıkça %15, 30 ve 45 olacak şekilde belirlenmiştir. Tüm bu parametreler doğrultusunda üretilen SSB karışımları üzerinde 1, 3, 28 ve 90 günlük basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Sonuçta, %15 oranında uçucu kül kullanımının SSB numunelerinin mekanik özelliklerini kontrol grubuna göre iyileştirdiği, %30 oranında uçucu kül kullanımının çok fazla bir fark oluşturmadığı ve %45 oranında uçucu kül kullanımının ise olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca ekonomik ve çevresel katkısı da dikkate alındığında SSB'lerde çimento yerine ağırlıkça %15 ve 30 oranlarında uçucu kül kullanılabilmesi belirtilmiştir. Cao ve diğerleri [25], tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda uçucu kül kullanımının SSB'lerin dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Su miktarı ve kum oranı, Marshall sıkıştırma yöntemi ile belirlenmiştir. Bu doğrultuda maksimum agrega tane çapı 25 mm ve çimento dozajı 300 kg/m³ olan SSB karışımları hazırlanmıştır. Uçucu kül kullanımının etkisinin araştırıldığı bu çalışmada uçucu kül oranları çimento yerine ağırlıkça %45, 55, 65, 75, 85 ve 95 olarak belirlenmiştir. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uçucu kül kullanımının erken yaşlarda dayanımı olumsuz etkilediği, ileri yaşlarda ise olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca hem basınç dayanımları hem de eğilme dayanımları açısından en yüksek sonuçları %45 oranında uçucu kül katkılı SSB'lerin verdiği gözlemlenmiştir.

Rao ve diğerleri [26], karışımlarda uçucu kül içeriğinin artmasının; her yaşta eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımı değerlerinde azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Pavan ve Rao [27], çimentonun uçucu kül ile ikame edildiği SSB karışımlarında uçucu kül içeriğinin artırılması, tüm yaşlarda basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının azalmasına neden olduğunu belirtmiştir.

Rao [28], uçucu küllü SSB karışımlarında uçucu külün olumlu etkilerinin, 28 günden sonraki yaşlarda ortaya çıktığını belirtmiştir. Rao ve diğerleri [29], çimentonun yerine belirli oranda uçucu kül ikame edildiği yerlerde uçucu kül içeriğindeki artışla basınç dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir. Bu durum 90 gün kürlemeden sonra bile uçucu külün çimentoya göre dayanıma daha az katkısı olduğuna bağlanmıştır.

b. YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN SSB'nin MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Rao ve diğerleri [30], granit kırma kumların öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) içeren SSB'nin dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. YFC'nin erken yaşlarda daha yavaş puzolanik reaksiyon göstermesine bağlı olarak, çimentonun kısmen YFC ile yer değiştirdiği SSB karışımlarında tüm ince agrega kombinasyonları için YFC'nin %0'dan %60'a yükselmesiyle, 3 günlük dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür. Ancak, numune yaşı ilerledikçe, YFC içeren karışımlar, kontrol karışımına kıyasla, daha yüksek dayanım göstermiştir. Ayrıca, granit kırma kum içeren SSB karışımlarının, zamanla dayanım artışının daha yüksek olduğu görülmüştür. Rao ve diğerleri [31], SSB karışımlarında YFC'nin 6 farklı oranda (%10, %20, %30, %40, %50 ve %60) çimento ile ikame edilmesi, 3 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımını azalttığını tespit etmişlerdir. Ancak 7, 28 ve 90 günlük numunelerin dayanımında sürekli artan ve belirgin bir iyileşme olmuştur.

Karimpour [32], karıştırma ve sıkıştırma arasındaki zaman aralığı değişiminin, geleneksel betonun ve yüksek fırın cürufu içeren SSB'nin mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Sonuçta, sıkıştırma süresinin artmasının, geleneksel betonun bazı özelliklerinin kaybına yol açtığı saptanmıştır. Ancak, YFC bağlayıcı karışımlarda sıkıştırma süresindeki artışın özellik kaybına neden olmadığı, hatta bazı durumlarda, betonun basınç dayanımı, geçirgenlik, su emme ve adsorpsiyon özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Lam ve diğerleri [33], SSB yollarda cüruf agregası kullanımının bütün yaşlarda basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı ve elastisite modülünü azalttığını tespit etmişlerdir.

c. LİFLERİN SSB'nin MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Madhkhan ve diğerleri [34], puzolanların çelik ve polipropilen (PP) liflerle birlikte kullanıldığı SSB yol kaplamalarının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Puzolan kullanılan karışımlarda, basınç dayanımındaki maksimum artışın 28 ve 90 günlük yaşlarda meydana geldiği, bunun yanında, kırılma modülünün azaldığı, fakat tokluk indekslerinin önemli ölçüde değişmediği bulunmuştur. SSB karışımlarda çelik liflerin basınç dayanımına etkisinin çoğunlukla PP liflerden daha fazla olduğu, fakat puzolanlardan bağımsız olarak ne çelik ne de PP lifler karışımların kırılma modülünü artırmıştır. Ancak çelik lif kullanıldığında tokluk indekslerinin arttığı görülmüştür.

Benouadah ve diğerleri [35], SSB karışımlarına polipropilen (PP) lif ilave edilmesinin karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Metreküpte 1 kg PP lif içeren karışımın lif içermeyen karışımlara kıyasla dayanımı yaklaşık %23 mertebesinde arttığı görülmüştür. PP liflerin SSB'de kullanılmasının dayanım açısından tatmin edici sonuçlar verdiğini bulmuşlardır. Neocleous ve diğerleri [36], SSB'lerin statik yükler altındaki eğilme davranışının, çelik liflerin eklenmesiyle artırılabilirliğini göstermiştir. Yazıcı ve diğerleri [37], polipropilen lif içeren SSB karışımlarının

mekanik özelliklerinin lif içermeyen karışımlara göre %20 oranında daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sonucun, polipropilen lif kullanıldığında SSB karışımının su/çimento oranındaki artıştan meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Karadelis ve Lin [38], tarafından yapılan çalışmada çelik lif ve polivinil alkol (PVA) lif kullanımının SSB'lerin eğilme dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda çelik lif kullanım oranı hacimce %1, 1,5 ve 2 olarak, PVA oranı ise %1,5 olarak belirlenmiştir. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 28 günlük basınç ve eğilme testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre lif kullanımının SSB'lerin basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca polimer lifle güçlendirilmiş çelik lifli SSB'lerin eğilme dayanımlarının, polimer lifle güçlendirilmemiş çelik lifli SSB'lerin eğilme dayanımlarından çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Üte [39] tarafından yapılan çalışmada polipropilen lif ve çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül kullanımının SSB özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda maksimum agrega tane çapı 25 mm ve çimento dozajı 300 kg/m^3 olarak üretilen SSB numunelerinde çimento yerine ağırlıkça %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ve betonun hacimce %0,25, 0,50 ve 0,75 oranlarında polipropilen lif ilave edilmiştir. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 7, 28 ve 90 günlük basınç, yarmada çekme, eğilme ve darbe deneyleri yapılmıştır. Sonuçta, %40 ve %60 oranlarında uçucu kül kullanımının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği, polipropilen lif kullanımının ise, mekanik özellikler ve darbe etkisi açısından önemli oranda fayda sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca liflerin sadece kırılma davranışlarını olumlu etkilediği gözlemlenmiştir.

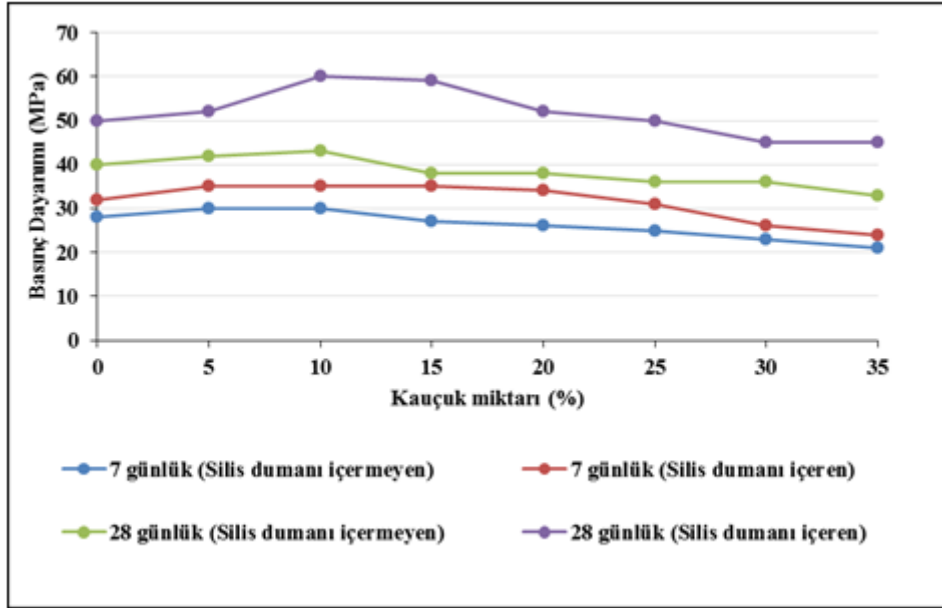
d. GERİ KAZANILMIŞ MALZEMELERİN SSB'lerin MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Fakhri ve Amosoltani [40], çalışmalarında geri kazanılmış asfalt kaplamasının (GKAK) kullanılmasının, özellikle GKAK içeriğinin %50'den yüksek olması durumunda, SSB karışımlarının basınç dayanımını azalttığı belirtmiştir. Dayanım azalmasının çimento hamuru ve GKAK arasındaki zayıf aderanstan kaynaklandığı bildirilmiştir. Moderres ve Hosseini (2014), normal ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregası ile pirinç kabuğu külü içeren SSB'nin mekanik özelliklerini araştırmıştır. İri ve ince geri kazanılmış asfalt kaplama (GKAK) agregasının SSB'nin basınç dayanımını azalttığı tespit edilmiştir. Ancak, iri agrega kullanılan GKAK karışımlar, ince agrega kullanılan GKAK karışımlarından daha yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. Ayrıca puzolanik reaksiyonların doğası gereği, kürlenme süresinin artmasıyla SSB karışımların basınç dayanımı, elastisite modülü ve sünekliği artmıştır. Settari ve diğerleri [42], iri ve ince doğal agreganın (DA) yerine çeşitli geri kazanılmış asfalt agregası (GKA) kullanarak, GKA boyutlarının SSB'nin mekanik özellikleri üzerine etkisini değerlendirmişlerdir. SSB karışımlarda ince ve iri doğal agrega ayrı ayrı GKA ile değiştirildiğinde 28 günlük basınç dayanımındaki azalma yaklaşık %32,5; hem ince hem de iri doğal agrega GKA ile ikame edildiğinde ise bu azalmanın yaklaşık %55 olduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte hem ince hem de iri agregaların %50 oranında GKA ile ikame etmenin daha yüksek yarma çekme dayanımına sebep olduğu görülmüştür. Debieb ve diğerleri [43], kirli geri kazanılmış (GK) agregalarla üretilen SSB'ler üzerine araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Sadece geri kazanılmış beton parçaları kullanılarak üretilen SSB, sadece doğal agregalarla üretilen SSB ile sıkıştırılabilirlik açısından karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, doğal agregalarla hazırlanan SSB'lerin basınç dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Courard ve diğerleri [44], SSB yolda GKA kullanımını incelemişlerdir. Doğal ve geri kazanılmış betondan elde edilen agregaların kullanıldığı SSB'nin sıkıştırılabilirlik açısından normal SSB'ye benzer olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte,

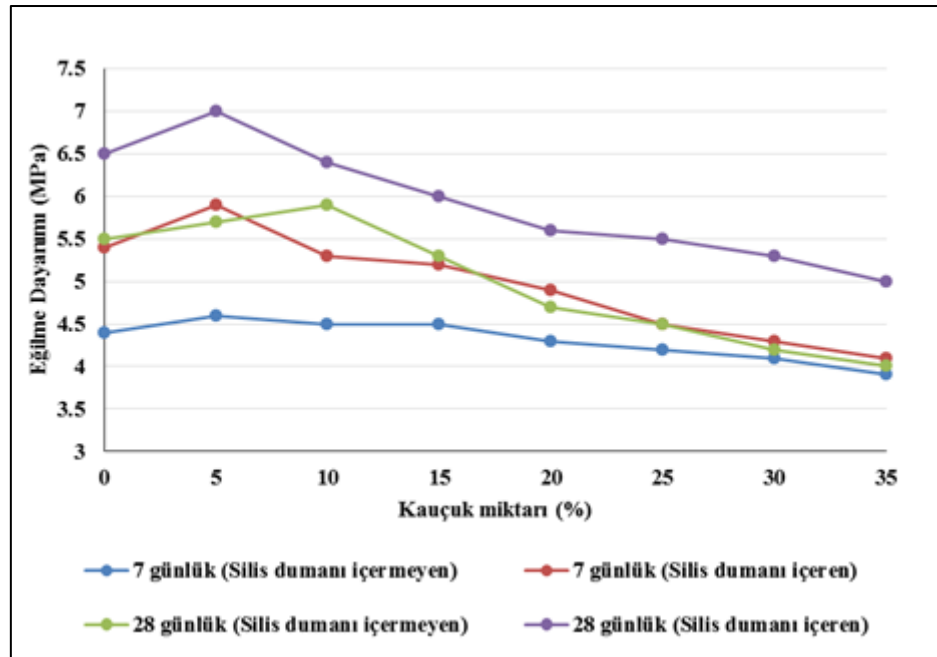
doğal agregaya kullanılan SSB karışımlarının basınç dayanımı daha yüksek olmuştur. Ayrıca karışımlarda 175 ila 250 kg/m³ arasında değişen miktarlarda çimento kullanılmasının kompasite üzerinde önemli bir etkisi olmadığını belirlenmiştir. Karışımın basınç dayanımının çimento içeriği ile doğrudan ilişkili olduğu dikkate alınarak minimum çimento içeriğinin 200 kg/m³ ile sınırlı olması önerilmiştir. Fakhri ve Amoosoltani [40] tarafından yapılan çalışmada geri kazanılmış asfalt agregası ile kauçuk agregası kullanımının SSB'lerin bazı mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda maksimum agregaya tane çapı 10 mm ve çimento dozajları 250, 300, 350 ve 400 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca geri kazanılmış asfalt agregası ve kauçuk oranları agregaya yerine sırasıyla %25, 50 ve 100 ve %5, 10 ve 25 olarak kullanılmıştır. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 7 günlük basınç, eğilme ve tokluk deneyleri yapılmış olup, elde edilen sonuçlar regresyon ve ANOVA istatistiksel yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçta, söz konusu atık malzemelerin SSB üretiminde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca yapılan regresyon ve ANOVA analiz sonuçlarına göre %10 kauçuk ve %50 geri kazanılmış asfalt agregası katkılı SSB'lerin optimum sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Lopez-Uceda ve diğerleri [45], geri kazanılmış beton agregası (GKBA) ile üretilen SSB'nin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Doğal agregalı (DA) ve GKBA'lı SSB karışımlarında basınç ile eğilme dayanımları arasında, yarmada çekme ve eğilme dayanımları arasında doğru bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Üretilen SSB karışımlarının, 28 ve 90 günlük eğilme ve yarmada çekme dayanımı 2 MPa'nın üzerinde, basınç dayanımları ise sırasıyla 18 ve 21 MPa'nın üzerinde değer göstermiştir. Angelakopoulos ve diğerleri [46], geri kazanılmış agregalarla yapılan saha betonunun basınç dayanımının doğal agregalarla yapılanlara göre %40 daha az olduğunu belirlemişlerdir.

Meddah ve diğerleri [47], parçalanmış kauçuk lastiğinin SSB karışımlarda kullanılma olasılığını araştırmışlardır. Kauçuk yüzeylerin pürüzlülüğü değiştirildiği takdirde, kauçuk agregası içeren SSB'nin çekme dayanımının %15-20 oranında, basınç dayanımının ise %11-28 oranında artırılabilirliğini belirlemişlerdir. Meddah ve diğerleri [48] karışımlarda lastik parçacığı kullanımının SSB yollarında sünekliğin artmasına neden olduğunu buna karşın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini tespit etmiştir. Meddah ve diğerleri [47], tarafından yapılan çalışmada ömrünü tamamlamış lastiklerin kullanımının SSB'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda maksimum agregaya tane çapı 20 mm ve çimento dozajı 295 kg/m³ olan SSB karışımları hazırlanmıştır. Uygun boyutlara getirilen ömrünü tamamlamış lastikler agregaya yerine ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 oranlarında ikame edilmiştir. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 7, 14 ve 28 günlük basınç, yarmada çekme eğilme ve elastisite modülü testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler doğrultusunda elde edilen sonuçlara göre ömrünü tamamlamış lastiklerin kullanımının SSB'lerin mekanik özelliklerini zayıflatığı tespit edilmiş olup, bu malzemelerin çevresel ve ekonomik katkıları göz önüne alınarak daha az trafik yoğunluğuna sahip yollarda az miktarda da olsa kullanılması gerektiği savunulmuştur.

Fakhri'nin [49] bir çalışmasının sonucunda %5 ve %10 oranında kauçuk içeren karışımlar için, silis dumanı içermeyen ve %5, %10, %15 ve %20 oranında silis dumanı içeren numunelerin 28 günlük basınç dayanımında bir artış görülmüştür. Bununla birlikte, kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında diğer numuneler için basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Buna karşılık, diğer karışımlar için eğilme dayanımı azalmasına rağmen, %5 oranında ufalanmış kauçuk içeren, silis dumanlı ve silis dumanlı numuneler için 28 günlük eğilme dayanımında bir artış olduğu görülmüştür. Şekil 4 ve 5'te 7 ve 28 günlük kürelemeden sonra basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişim diyagramları görülmektedir.



Şekil 4. Kauçuk içeren karışımların basınç dayanımları [49]



Şekil 5. Kauçuk içeren karışımların eğilme dayanımları [49]

e. FARKLI MİNERAL KATKILARIN SSB'lerin MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ghahari ve diğerleri [50], tras ve hava sürükleyici katkı içeren SSB karışımların mekanik ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Tras içeren numunelerin basınç dayanımının erken yaşlarda mineral katkı içermeyen numunelere göre %35 daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun trasın düşük puzolanik aktivitesinden kaynaklandığı öne sürülmüştür. 90 gün boyunca, tras içeren

numunelerin basınç dayanımının kısmen geliştiği ve trasın C-S-H jeli oluşumunda meydana gelen gecikmeyi telafi ettiği görülmüştür. Ayrıca, tras içeren numunelerin çekme dayanımının mineral katkı içermeyen SSB'lerden %12 daha düşük olduğunu tespit edilmiştir. Hava sürükleyici katkı içeren karışımların hem basınç hem de çekme dayanımlarının düşük olduğu görülmüştür.

Chi ve Huang [51] tarafından yapılan çalışmada sirkülasyonlu akışkan yataklı kazanlardan çıkan külün SSB karışımının bazı özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda çimento dozajı 270 kg/m^3 olarak belirlenen SSB kontrol karışımlarına ek olarak, ince agrega yerine sirkülasyonlu akışkan yataklı kazandan çıkan kül, ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında ikame edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca SSB numunelerinin üretimi, yerleştirme ve sıkıştırma sırasında $25, 50$ ve 75 g/cm^2 olmak üzere 3 farklı basınç tercih edilmiştir. Karışımların 3, 7 ve 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Sonuçta, söz konusu külün SSB'nin basınç ve yarmada çekme dayanımına katkı sağladığı tespit edilmiş olup, kullanım oranının %5 olması gerektiği önerilmiştir. Ayrıca, SSB'lerin sıkıştırması için gereken basıncın 75 g/cm^2 olduğu ifade edilmiştir. Hesami ve diğerleri [52], tarafından yapılan çalışmada kömür külü, kömür tozu ve kireç tozu ilavesinin SSB'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Maksimum agrega tane çapı 19 mm, çimento dozajı 264 kg/m^3 ve ilave edilen katkı oranları ise çimento yerine ağırlıkça %5, 10 ve 20 olacak şekilde belirlenmiştir. Üretilen SSB karışımları üzerinde 7, 28 ve 90 günlük basınç, yarmada çekme, eğilme ve elastisite modülü deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlara göre kömür külü ve kömür tozu kullanımının SSB'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin benzer olduğu tespit edilmiştir. En iyi sonuçları ise %5 oranında kömür külü ve kireç tozunun birlikte kullanıldığı SSB numunelerinin verdiği belirlenmiştir. Ayrıca söz konusu malzemelerin kullanılarak çimento miktarının azaltılacağı ve dolayısıyla hem çevre dostu hem de ekonomik SSB üretilebileceği ifade edilmiştir. Vahidi ve diğerleri [53], SSB yol kaplaması karışımlarına farklı oranlarda eklenen pirinç kabuğu (PK) külünün basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Laboratuvar test sonuçları ve yapılan modellemeler değerlendirildiğinde, karışımlarda çimentonun %9'unun yerine PK külü kullanılması, basınç dayanımının artırılması için en uygun uygulama olarak görülmüştür. Ancak, %15'ten biraz daha fazla PK külünün eklenmesi basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. Villena ve diğerleri (2011), SSB karışımlara pirinç kabuğu (PK) külü ilavesinin SSB'nin mekanik özelliklerinde önemli bir iyileşme sağlayacağını göstermiştir. Zhang ve diğerleri [54], teorik ve deneysel verilerden dinamik mekanik özelliklerin ayrıklığının şekil değiştirme oranının artmasıyla arttığını bulmuştur.

Salih ve Abed [55], çeşitli kürlenme yöntemlerinin ve porselenitin farklı oranlarda ince agrega yerine kullanıldığı karışımlarda, SSB'nin bazı özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. SSB karışımlarda ince agreganın porselenit ile hacimce %5 ikameli olarak kullanıldığı durumda karışımların ultrases geçiş hızı ve boşluk hacmi bakımından en iyi performansı göstermiştir.

Zdiri ve diğerleri [56], SSB karışımlarda deneysel olarak belirlenen veya sayısal modellerle tahmin edilen basınç dayanımı / çekme dayanımı oranının (f_c/f_t) yaklaşık 8 ile 9 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bu oran geleneksel betonlar için yaklaşık 12 civarındadır. Bu bağlamda eşit basınç dayanımı durumunda SSB'lerin geleneksel betona kıyasla daha yüksek çekme dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Zdiri ve diğerleri [4], dip çökelti (sediments) içeren SSB karışımları ile elde edilen basınç ve çekme dayanımlarının, bu malzemenin yol mühendisliğinde uygulanmasına yeterli olduğunu göstermiştir. Çökeltinin, SSB karışımlarına yeterli dayanım ve daha iyi bir kompazite kazandırdığı bu da SSB kaplamaların daha sert bir yüzeye sahip olmasına neden olduğu açıklanmıştır.

B. ELASTİSİTE MODÜLÜ

SSB karışımların elastisite modülleri ile ilgili bilgi nispeten kısıtlıdır. Ancak elde edilen veriler, SSB'lerin elastisite modülünün geleneksel betonlara kıyasla eşit veya biraz daha fazla olduğunu göstermektedir [5]. SSB'nin elastik özelliklerini etkileyen temel faktörlerin yaş, dayanım, hamur hacmi ve agrega türü olduğu bilinmektedir. Genel olarak, belirli bir agrega tipi için, elastisite modülü dayanımın bir fonksiyonudur [1]. Fakhri ve Amosoltani [40], geri kazanılmış asfalt kaplama (GAK) ve kauçuk malzemelerin kullanılmasının SSB'nin enerji sönümlenme performansının artırdığını göstermiştir. Ayrıca karışımlara GAK veya Kauçuk eklenmesinin SSB'nin rijitliği ve elastik modülünü azalttığı, ancak tokluğunu artırdığı rapor edilmiştir. Albuquerque ve diğerleri [57], cüruf içeren SSB karışımlarının, sıkıştırılması için daha büyük miktarlarda su gerektiğinden elastisite modülünde düşüş olduğunu belirlemişlerdir. SSB üzerinde yapılan bir çalışmanın sonucunda, elastisite modülü artışının, hidrasyon reaksiyonlarının ilk günlerinde yüksek hidrasyon sıcaklığına bağlı olarak hızlandığı tespit edilmiştir. Söz konusu bu ilk günlerde elastisite modülü %42 kadar artmıştır [58]. Bir araştırmada elastisite modülünün hem SSB matrisi hem de ara yüzeyi için bu fazların basınç dayanımının kareköküne ayrıca, en büyük agrega tane boyutu/numune ebatlarına oranına bağlı olduğu gösterilmiştir [59].

C. YORULMA DAVRANIŞI

Yorulma, malzemenin dayanımından daha az gerilmelere neden olan yüklerin sürekli tekrarlanmasından kaynaklanan kırılmadır. Dört farklı SSB karışımlarından hazırlanan gerçek boyutlu kirişler üzerinde yapılan deneylerden yorulma davranışının geleneksel betonlara benzer olduğu tespit edilmiştir [5]. Araştırmacılar, geri kazanılmış asfalt kaplama (GAK) malzemelerini içeren SSB karışımlarının yorulma ömrünün geleneksel betondan daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, iri agreganın GAK ile değiştirildiği karışımların, ince agreganın değiştirilmesine göre daha fazla yorulma ömrüne sahip olduğu görülmüştür. Araştırmalar %3 pirinç kabuğu (PK) külü ilavesinin, özellikle 120 günlük kürlenmeden sonra boşlukları azalttığını ve yorulma direncini artırdığını göstermiştir. Ancak, PK külü ikame oranını %52'ye yükseltilmesi SSB'lerde boşlukların daha yüksek, yorulma direncinin ise daha düşük olmasına neden olmuştur [41]. Wu ve diğerleri [60] bir toprak çimento temel üzerine inşa edilmiş üç adet tam ölçekli SSB yol kesitini, hızlandırılmış kaplama testinde (APT) incelemiştir. SSB yol kalınlıkları sırasıyla 102 mm, 152 mm ve 203 mm arasında değişmiştir. Döşeme kalınlığı ve temel/alt temel desteğinin birleşik etkileri nedeniyle, kalınlığı fazla olan kesitte ince olanlara kıyasla yorulma çatlaklarının daha geniş olduğu tespit edilmiştir.

Sun ve diğerleri [61] tarafından yapılan çalışmada uçucu kül kullanımının SSB'lerin yorulma dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, karışımlardaki maksimum agrega tane çapı 20 mm, çimento dozajı 300 kg/m^3 olarak belirlenmiş ve uçucu kül, çimento yerine ağırlıkça %15, %30 ve %45 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen SSB'ler üzerinde 28 ve 90 günlük eğilme ve yorulma deneyleri yapılmış ve deney sonuçları geleneksel beton ile kıyaslanarak irdelenmiştir. Ayrıca hem uçucu kül ilave edilmiş hem de ilave edilmemiş SSB karışımlarının yorulma dayanımları verileri kullanılarak regresyon analiz yapılmış ve yorulma dayanımı ile ilgili eşitlikler belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, SSB'lerin eğilme ve yorulma dayanımlarının geleneksel betonlara nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir. SSB numunelerde uçucu kül kullanımının betonların eğilme ve yorulma dayanımlarını artırdığı tespit edilmiş olup, kullanım oranı artışı ile birlikte SSB'lerin eğilme ve yorulma dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan regresyon

analizi neticesinde belirlenen eşitliklerin hem uçucu kül kullanılmadan hem de uçucu kül kullanılarak üretilen SSB'lerde geçerli olduğu tespit edilmiştir.

D. SÜNME

Uygulanan sabit gerilme nedeniyle malzemenin zamanla artan bir deformasyon göstermesine sünme denilmektedir. Malzeme özelliklerine ve oranlarına bağlı olan sünme, betonun elastisite modülü ve basınç dayanımı ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle yükleme esnasındaki beton yaşının bir fonksiyonudur [21]. Araştırmacılar, temel kısıtlaması ile termal ve dış yüklerden kaynaklı şekil değiştirmelerin ve bunların sonucu oluşan gerilmelerin azaltılması bakımından yüksek sünme özelliklerinin makbul olduğunu bildirmiştir [5].

E. HACİM DEĞİŞİMİ

a. KURUMA BÜZÜLMESİ

Beton karışımlarda kuruma-büzülmesi (rötre), öncelikle betonun su muhtevasına ve daha az ölçüde de agreganın kısıtlama derecesine bağlı olmaktadır. SSB'lerde meydana gelen kuruma büzülmesi, karışımlarda bulunan düşük su miktarından dolayı, geleneksel kütle betonuna göre benzer veya daha az olmaktadır [5].

Won ve diğerleri [62] tarafından yapılan çalışmada, farklı oranlarda uçucu kül kullanılarak üretilen SSB'lerin kuruma büzülme özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneylerde çimento dozajı 115 kg/m^3 olarak belirlenmiş ve uçucu kül, çimento yerine ağırlıkça %20, 30, 40 ve 50 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Üretilen SSB karışımları üzerinde 28 gün boyunca $75 \times 75 \times 275 \text{ mm}$ boyutlarında numuneler üzerinde kuruma-büzülme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, karışımlarda uçucu kül kullanım oranının artışıyla SSB'lerin kuruma büzülme miktarlarının azaldığı tespit edilmiştir.

b. OTOJEN HACİM DEĞİŞİMİ

Otojen hacim değişimi, karışımdaki malzeme özelliklerinin ve oranlarının bir fonksiyonudur. Geleneksel betona benzer şekilde, SSB'lerde de otojen hacim değişimi laboratuvar testleri yapılmadan güvenilir bir şekilde tahmin edilemez. Bu durum özellikle farklı tipte çimento, puzolan veya agrega ile yapılan karışımlar için geçerlidir [5].

F. KATMANLAR ARASI BAĞ DAYANIMI

SSB yapıların katmanları arasındaki bağ dayanımı önemli bir mühendislik özelliğidir. Bağ dayanımı, SSB kaplamaların tek tabaka, kısmen bağlanmış veya bağlanmamış kaplama olarak davranıp davranmayacağını belirler. Kısmen bağlı veya bağlanmamış kaplamaların yük taşıma kapasitesi, tek tabaka olarak davranan kaplamalardan önemli ölçüde daha düşüktür [5].

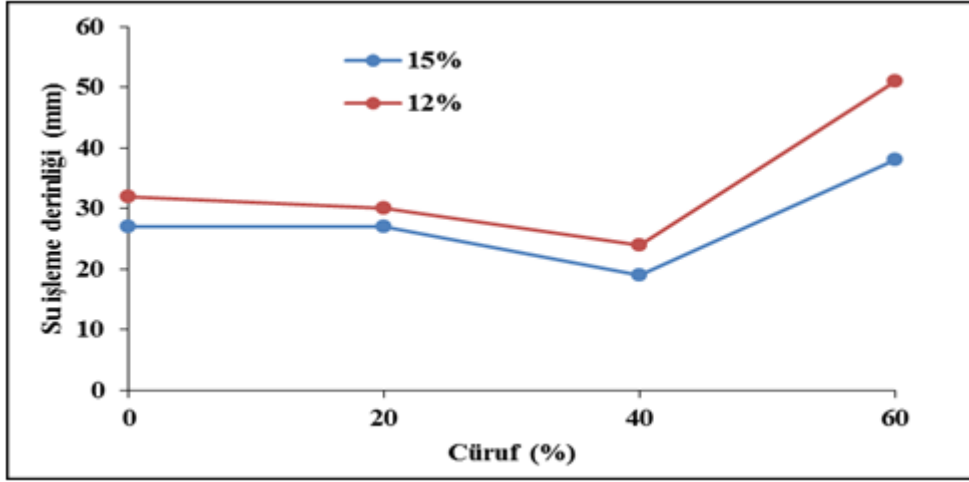
G. TERMAL ÖZELLİKLER

Özgül ısı, iletkenlik, ısı genleşme katsayısı ve adyabatik sıcaklık artışını içeren termal özellikler hem geleneksel hem de silindire sıkıştırılmış kütle betonu için birincil öneme sahiptir. Termal özellikler, karışım bileşenlerinin termal özellikleri tarafından kontrol edilir. Geleneksel beton ve silindire sıkıştırılmış betonlar için değerler benzer olsa da gerçek ölçülen değerler agrega, çimento ve puzolan tipi ve içeriğine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir [1]. Uçucu kül, hidrasyon ısını azaltarak termal gerilmeleri azaltır. Bu durumda erken elastisite modülünün düşük olması nedeniyle sıcaklığa bağlı çatlama azalır. Sonuç olarak baraj yapım maliyetini azalır ve dayanıklılığın gelişimine yol açar [63].

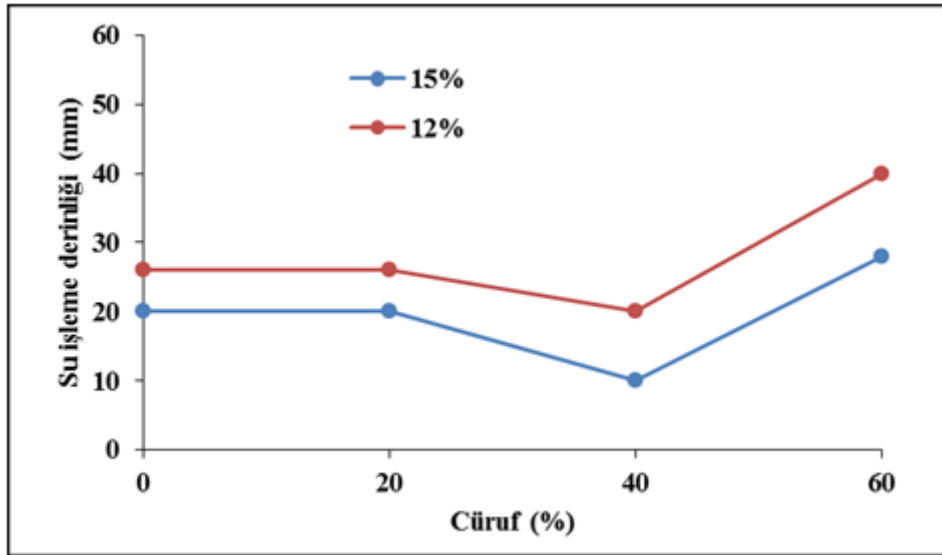
H. GEÇİRGENLİK

SSB'nin geçirgenliği büyük ölçüde sıkıştırılmış beton kütlelerinin içindeki boşluklara ve matrisinin gözenekliliğine göre değişiklik göstermektedir. Söz konusu bu boşluklar ve gözenekler SSB'nin karışım oranlarına, yerleştirme metoduna ve sıkıştırma derecesine bağlıdır. Genellikle yekpare dökülen ve yeterli oranda hamur içeren SSB'nin geçirgenlik performansı geleneksel betona benzer olmaktadır [1].

Yapılan bir araştırmada, tras ve hava sürükleyici katkı içeren 90 günlük SSB numunelerin geçirgenliği incelenmiştir. SSB karışımlarının geleneksel betona göre %14 daha düşük su işleme derinliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak, çimento içeriğinin düşük olması ve trasın düşük puzolanik aktivitesi, traslı karışımların erken yaşlarda yüksek geçirgenlik göstermesine sebep olmuştur. Ayrıca, hava sürükleyici katkı kullanıldığında, her iki karışım türü için su işleme derinliklerinin azaldığı görülmüştür [50]. Mohammadi Rad ve Modarres [64] SSB karışımlarında çimento yerine %3'e kadar kömür atık külü (KAK) kullanılmasının boşluk içeriğini azalttığını bildirmiştir. Ancak, karışımlarda KAK %3'ün üzerine çıktığında boşluk oranının arttığı görülmüştür. KAK'ın portland çimentosuna göre daha ince olması ve puzolanik reaksiyon göstermesi, agrega-hamur ara yüzeyinin güçlenmesine, mikro çatlakların azalmasına ve geçirimsizliğin artmasına neden olduğu belirtilmiştir. Yapılan bir diğer araştırmada farklı miktarda puzolan içeren karışımlarda puzolan miktarı arttığında geçirgenliğin azaldığı görülmüştür [65]. Aghaeipour ve Madhkhan [66] yüksek fırın cürufunun SSB yollarının durabilite üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Karışımların çimento yerine %20 ve %40 oranlarında yüksek fırın cürufu içermesi geçirgenliği azaltırken, bu oranın %60'a kadar yükselmesi karışımların geçirgenlik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Ayrıca, beton geçirgenliğini azaltmak için bağlayıcı malzemelerin hacimce %12'den %15'e kadar çıkartılmasının gerekli olduğu görülmüştür. Şekil 6 ile 7'de yüksek fırın cürufu oranı ve su işleme derinliği ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 6. 90 gün kür uygulanmış numunelerde cüruf miktarına göre su işleme derinliği [66]



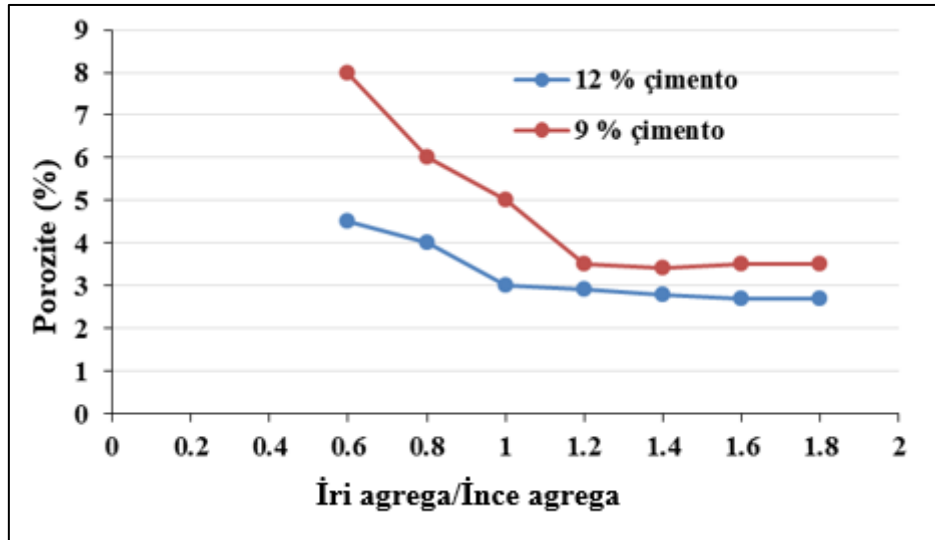
Şekil 7. 150 günlük numunelerde cüruf miktarına göre su işleme derinliği [66]

Yerramala ve diğerleri [67], tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül kullanımının ve maksimum agrega büyüklüğünün 20 mm olan SSB'lerin bazı geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çimento dozajı 50, 90, 150, 190, 250 ve 260 kg/m³, uçucu kül ikame oranı ise ağırlıkça %40, 50, 60, 70, 75 ve 85 olarak alınmıştır. 90 günlük SSB numuneleri üzerinde geçirimsizlik, kılcal geçirimsizlik ve klor geçirgenliği deneyleri yapılmıştır. Sonuçta, 150 kg/m³ çimento ve %70 oranında uçucu kül ile 190 kg/m³ çimento ve %60 oranında uçucu kül kullanılarak üretilen SSB karışımlarının geçirimsizlik özelliklerinin diğer karışımlara nazaran daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca SSB'lerde çimento yerine ağırlıkça yüksek oranda uçucu kül kullanılabileceği belirtilmiştir. Tüm betonlar 1000 C'nin altında klor geçirgenliği gösterdiğinden ASTM C1202 standardına göre çok düşük klor geçirgenlik sınıfına girdiği bildirilmiştir.

Mardani-Aghabaglou ve diğerleri [68] tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül kullanımının SSB'lerin bazı durabilite özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çimento dozajı ve maksimum agrega tane çapı sırasıyla 250 kg/m³ ve 25 mm olarak belirlenmiş ve karışımların tasarımı maksimum yoğunluk

metoduna göre yapılmıştır. Bu çalışmada, uçucu kül içermeyen kontrol serisine ilaveten hem çimento yerine hem de agrega yerine ağırlıkça %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanılarak iki farklı seri SSB üretilmiştir. Böylece toplamda, 0,30, 0,35, 0,40 ve 0,45 su/bağlayıcı oranlarında 28 farklı karışım hazırlanmış, optimum su içeriğine sahip 7 karışım seçilerek bu karışımlar üzerinde 56 günlük kılcal geçirimsizlik ve basınç altında su işleme derinliği deneyleri ile 90 günlük donma çözülme deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uçucu külün çimento yerine kullanıldığı SSB serisinde (A serisi) uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte durabilite özelliklerinin kontrol serisine göre azaldığı gözlemlenmiştir. Uçucu külün agrega yerine kullanıldığı SSB serisinde (B serisi) ise uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte durabilite özelliklerinin kontrol serisine göre arttığı bildirilmiştir. A serisindeki azalmanın su/bağlayıcı oranının azalmasından kaynaklandığı, B serisindeki artışın ise uçucu kül miktarının fazla olmasının işlenebilirliğe ve dolayısıyla sıkışmaya sağladığı olumlu katkıdan kaynaklandığı belirtilmiştir.

Hashemi ve Shafiqh [69], çalışmalarında SSB karışımlarında iri agreganın ince agregaya kütlece oranının (C/F) ve çimento içeriğinin değişiminin SSB'nin boşluk yapısına etkisini incelemiştir. Ayrıca SSB karışımlarında tüm katı malzemelerin %9'u (204 kg/m^3) ve %12'si (268 kg/m^3) oranlarında farklı miktarlarda çimento kullanılmıştır. Üretilen SSB numuneleri üzerinde Vebe ve porozite deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, iri agreganın ince agregaya oranı 0.6'dan 1.8'e yükseldiğinde Vebe zamanı 3 kat artmıştır. Çimento miktarı %9'dan %12'ye yükseldiğinde ise Vebe zamanı %12 mertebesinde azalma göstermiştir. C/F oranının 0.6'dan 1.2'ye yükseldiğinde porozite önemli ölçüde azalmıştır. Bu azalma %9 çimento içeren karışımda %60 olurken, %12 oranında çimento içeren karışımda %38 olduğu görülmüştür. Genel olarak en uygun C/F oranı 1,2 ile 1,4 arasında olduğu görülmüştür. En iyi işlenebilirlik, dayanım ve durabilite performansı %12 çimento miktarı ile 1.2 C/F oranına sahip karışımda görülmüştür. SSB karışımlarda bulunan C/F oranı ve porozite ilişkisi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. İri agreganın ince agregaya oranı ve porozite ilişkisi [69]

İ. AŞINMA

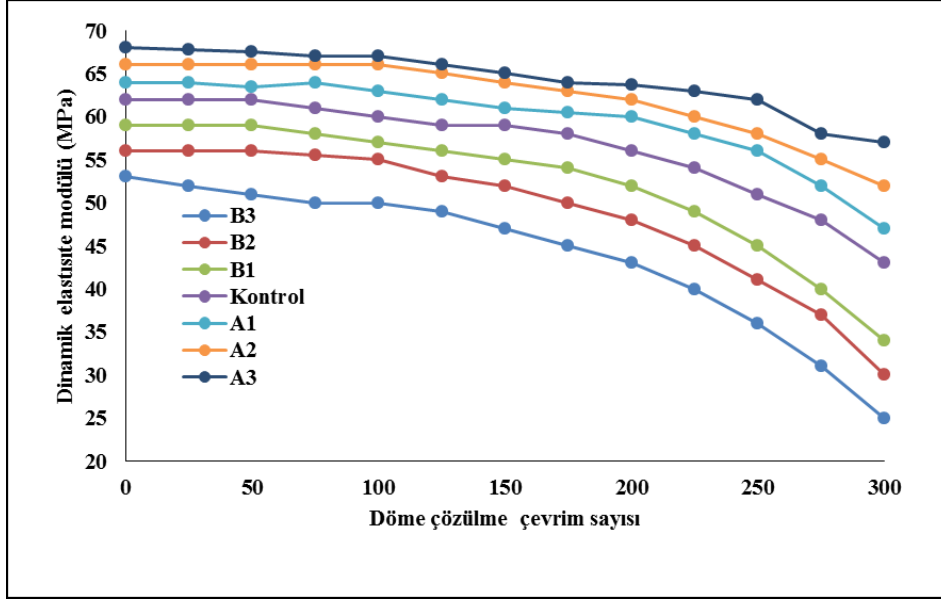
Aşınma direnci esas olarak betonun basınç dayanımı ve agreganın kalitesi ile ilgilidir. Günlük depolama sahaları ve kömür depolama alanları gibi ağır hizmet tesislerindeki SSB kaplamaları, ağır şartlar altındaki trafikten ve endüstriyel aşınmadan çok az etkilenmiştir [1]. Bazı araştırmacılar, yüksek fırın cürufu (YFC) içeren SSB'nin aşınma direncinin, YFC içeriğinden ve kum miktarından bağımsız olarak SSB'nin dayanımından fazlasıyla etkilendiğini göstermiştir. Üç farklı ince agrega içeriği ile hazırlanan ve YFC içeren SSB karışımlarında kütleme süresindeki artışla SSB'nin aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir [29]. Rao ve diğerleri [29], uçucu kül (UK) içeren SSB'nin aşınma direncinin UK içeriğinden ve kum miktarından bağımsız olarak SSB'nin dayanımından büyük oranda etkilendiğini göstermiştir. SSB'nin aşınma direncinin, ince agreganın üç farklı ince agrega içeriği ile hazırlanan uçucu kül içeren SSB karışımları için kütleme süresindeki artışla arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca söz konusu aşınma direncinin eğilme dayanımı yerine basınç dayanımına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Won ve diğerleri [62] tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül kullanılarak üretilen SSB'lerin aşınma performansları incelenmiştir. Bu amaçla kontrol karışımına ilaveten ağırlıkça çimento yerine %20, 30, 40 ve 50 oranlarında uçucu kül, ikameli olarak kullanılmış, 150x60 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. 7, 28 ve 91 günlük SSB numuneler üzerinde, ASTM C944 standardına uygun olarak aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, numunelerin zamanla aşınma direncinin arttığı, karışımlar arasında ise %30 uçucu kül içeren SSB karışımının en yüksek aşınma direncine sahip olduğu bildirilmiştir.

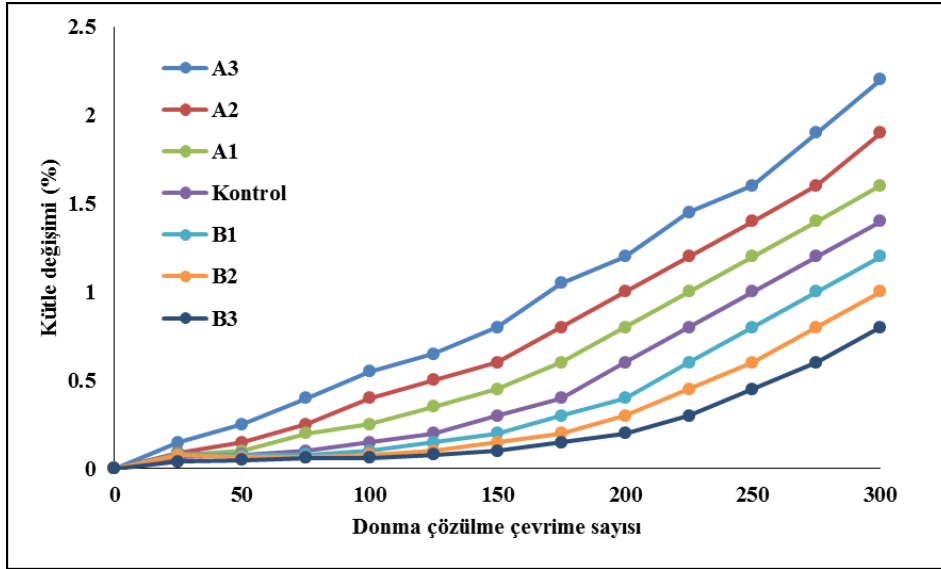
J. DONMA VE ÇÖZÜLME

SSB kaplamaların donma-çözülme koşullarındaki dayanıklılığı, 1976 yılında Kanada'da ilk kullanımından sonra bazı kaygılara neden olmuştur [5]. Çalışmalar, hava sürükleyici katkıların silindire sıkıştırılmış betonunun donma-çözülme direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [70]. Ghahari [50], tras ve hava sürükleyici katkının etkisini araştırmıştır. Tuz çözeltisine maruz kalan traslı karışımların kütle kaybı, geleneksel betondan %51 daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun, çimento ile kıyaslandığında trasın daha düşük reaksiyon hızına sahip olduğundan kaynaklanabileceği vurgulanmıştır. Karışımlarda tras kullanımının kümelenmiş hava boşlukları oluşmasına yol açtığı, dolayısıyla donma-çözülme ve tuz etkisi, kütle kayıplarına sebep olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, karışımlarda tras kullanılmasının basınç dayanımına olumlu bir etkisi olmadığı da açıklanmıştır.

Mardani-Aghabaglou ve diğerleri [68], çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül kullanıldığında, SSB karışımlarının taze hal özellikleri ve donma-çözülme kaynaklı kütle kaybının kontrol karışımına göre artış gösterdiğini rapor etmiştir. SSB'lerde agrega yerine belirli oranlarda uçucu kül kullanıldığında ise söz konusu özelliklerde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum uçucu külün ikame miktarı arttığında daha da belirgin olmuştur. Şekil 9 ile 10'da donma-çözülme çevrimlerinde SSB karışımların dinamik elastisite modülü ve ağırlık değişimi yüzdesi gösterilmiştir. Söz konusu şekillerde A1, A2, A3 sırasıyla çimento yerine %20, %40, %60 oranlarında uçucu kül ve B1, B2, B3 ise sırasıyla agrega yerine çimento ağırlığının %20, %40, %60 oranların uçucu kül ile ikame edilen karışımları ifade etmektedir.



Şekil 9. SSB'de donma-çözülme çevrim sayısı- dinamik elastisite modülü ilişkisi [68]



Şekil 10. Donma-çözülme çevrimleri sırasında SSB karışımlarının ağırlık değişimi [68]

Nili ve Zaheri [71], uzun ve kısa periyotlu donma-çözülme çevrimi koşullarında SSB karışımların buz çözücü tuz etkisinde pullanmaya karşı direncini araştırmıştır. Sonuçta, donma periyodunun 18 saate çıkmasıyla, pullanma oranının önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, pullanmadan dolayı dökülen parçacıkların kütlelerini dikkate alarak, ASTM C672'de belirtilen 18 saatlik donma periyodunun gerçek koşullardan uzak ve ağır olduğunu tespit etmişlerdir. Donma-çözülme çevrimlerinde, donma periyodunun uygun seçilmesiyle, SSB kaplamanın pullanma direncinin daha iyi değerlendirilebileceği açıklanmıştır. Araştırmalar, cam tozu (CT) kullanılmasının, SSB'lerin donma-çözülme çevrimlerine karşı direnci açısından olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. CT kullanımının, SSB'nin yapısında işlenebilirlik için gerekli suyun buharlaşmasından dolayı meydana gelen boşlukların ve geçirgen boşluk hacminin azalmasına neden olabileceği öne sürülmüştür [72]. Yapılan bir araştırmada, SSB karışımlarında bağlayıcı yerine belirli oranlarda ponza kullanılması durumunda, kontrol karışımına kıyasla, donma-çözülme direnci ve basınç dayanımının olumsuz etkilendiği

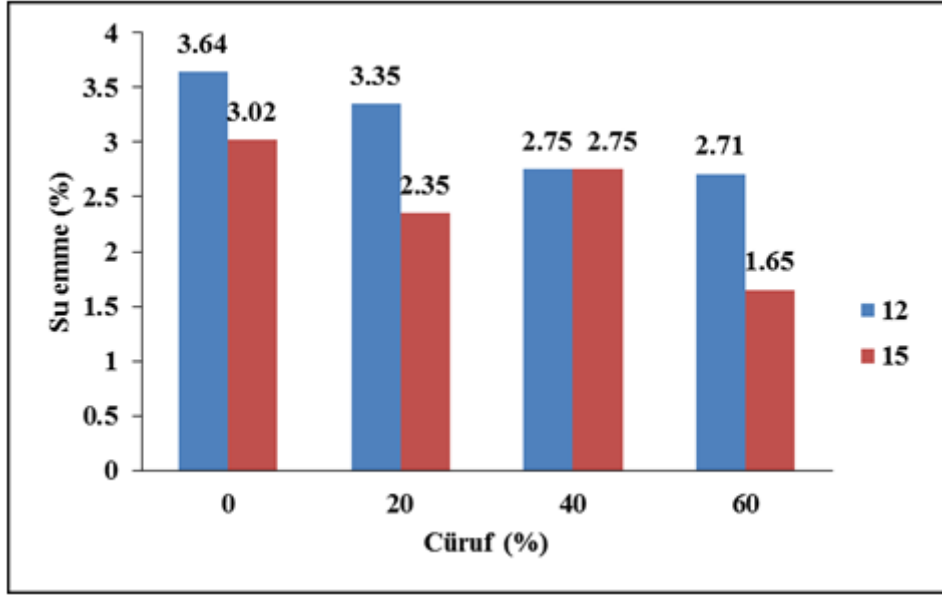
açıklanmıştır. Taze halde ise karışımlarda ponza kullanımı SSB'lerde işlenebilirliği önemli ölçüde artırmış ve az miktarda çimento içeren ponza içerikli karışımların da donma karşı dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir. Ancak, genelde ponza kullanılarak arzu edilen dayanımı elde etmenin daha zor olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, ponzanın SSB karışımlarının işlenebilirliği ve donma dayanıklılığını arttırmak için yararlı bir katkı maddesi olduğu açıklanmıştır. Ayrıca, silis dumanının SSB karışımlarının donma-çözülme karşı dayanıklılığını arttırmak için etkili bir mineral katkı olduğu bazı araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [73].

Aghaeipour ve Madhkhan [66], çimento yerine ağırlıkça %40 oranında cüruf kullanılmasının SSB karışımlarında boşluklarının azalmasına, daha düşük su emme oranına ve geçirgenliğin azalmasına neden olduğunu belirtmiştir. Ancak, doymun numunelerin, donma-çözülme çevrimleri sonucunda aşırı derecede hasar gördüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, SSB karışımlarda çimento yerine ağırlıkça %60 cüruf kullanımının karışımlarda su işleme derinliğinin artmasına ve su emmesinin azalmasına neden olduğu görülmüştür. Bu karışım tasarımı kullanılarak üretilen numuneler hiçbir zaman doymunluğa ulaşmamış ve donma-çözülme çevrimleri nedeniyle bozulmaları kısıtlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, çimento içeriği arttıkça SSB numunelerinin donma ve çözülme direncinin de arttığı sonucuna varılmıştır [74]. Araştırmacılar, silindirle sıkıştırılmış beton kaplamaların soğuk bölgeler için uygun bir yapı malzemesi olduğunu göstermiştir [75]. SSB karışımlarda hava sürükleyici katkı kullanılması karışımların dayanım özelliklerini kontrol karışımına göre olumsuz etkilerken, donma-çözülme döngüsünde tuz etkisinden dolayı pullanmaya karşı iyi performans göstermiştir [76].

K. SU EMME

Chi ve Huang [51], sirkülasyonlu akışkan yataklı yakma (SAYY) külünün, SSB özelliklerine etkisini araştırmıştır. SAYY külü SSB karışımlarının su emmesini artırabilir ve daha yüksek miktarlarda kalsiyum oksit (CaO), sülfür trioksit (SO₃) ve kızdırma kaybı nedeniyle başlangıç yüzey emilimini etkili bir şekilde azaltabilir sonucuna varılmıştır. Fakhri [49], geri kazanılmış lastik parçacıklarının kumun yerine ikame edilmesiyle, karışımların su emmesinin azaldığını, bu azalmanın silis dumanı içeren karışımlarda daha da belirgin olduğunu göstermiştir. Yerramala ve Babu [67], %85 uçucu kül içeren SSB karışımlarında maksimum su emmenin %2,11 olduğunu tespit etmiştir.

Genel olarak SSB karışımlarında çimentonun bir kısmının yerine cürufun kullanılması karışımların su emme kapasitesinin azalmasına neden olmuş, çimentolu malzemelerin %12'den %15'e artmasıyla su emmede daha da belirgin azalmalar meydana gelmiştir. İncelenen tüm karışım tasarımlarında su emme oranının %4'ten az olduğu bulunmuştur. İki farklı oranda çimentolu malzeme içeren karışımların cüruf miktarının artışıyla su emme oranının ilişkisi Şekil 11'de gösterilmiştir [66].



Şekil 11. %12 ve %15 oranında bağlayıcı malzeme içeren numunelerin su emme oranları [66]

Karimpour [32], tarafından granüle yüksek fırın cürufu (YFC) katkılı SSB’lerde üretim ile sıkıştırma arasında geçen sürenin karışımların su emme kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla maksimum agrega tane çapı 37,5 mm, çimento dozajı 150 ve 210 kg/m³, cüruf oranları ise %25, 50 ve 75 olarak belirlenmiştir. Ayrıca SSB üretimi ile sıkıştırma işlemi arasındaki en ideal zamanı tespit etmek amacıyla 30, 60, 120 ve 180 dk. olmak üzere 4 farklı zaman tercih edilmiş olup, söz konusu SSB numuneleri üzerinde 90 günlük su emme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda söz konusu zaman aralığının artmasıyla YFC içermeyen karışımların su emmelerinde artışlar görülmüştür. Ancak YFC içeren karışımlarda zaman aralığı arttıkça su emme miktarı belirli bir değere kadar azalmış, belirli bir zamandan sonra su emme değerlerinde artış meydana gelmiştir. Üretim ile sıkıştırma işlemi arasındaki süre 60 dk. olduğunda SSB’lerin özelliklerinin 30 dk’ya göre değişmediği, 120 dk. olduğunda iyileştiği ve 180 dk. olduğunda ise azaldığı gözlemlenmiştir.

Hazaree ve diğerleri [77], tarafından yapılan çalışmada çimento içeriğinin SSB’lerin su emme ve geçirgenlik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda maksimum agrega tane çapı 19 mm ve çimento dozajları 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 ve 450 kg/m³ olan SSB karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan 10 ve 20 cm çapındaki silindir numuneler üzerinde su emme deneyi ve kaynar suda su emme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler, numuneler kesilmek suretiyle 3 parçaya ayrılarak gerçekleştirilmiştir. 20 cm yüksekliğindeki numuneler üstten 5 cm, alttan 5 cm ve ortadan 10 cm olacak şekilde 3 parçaya ayrılmıştır. Üst parçanın su emme değeri maksimum çıkarken, orta parçanın su emme değeri en düşük çıkmıştır. Kaynar sudaki su emme deneyinde de aynı eğilim söz konusu olmuştur. Ayrıca karışımlarda belirli miktara kadar (225 kg/m³) artan çimento dozajı ile su emme miktarında azalmalar gözlemlenmiştir. Ancak bu miktardan sonra su emme performansında düşüş görülmüştür. Çalışmada SSB için optimum çimento miktarı 225±25 kg olarak belirlenmiştir.

L. YOĞUNLUK

Yoğunluk, birim hacimdeki kütle olarak tanımlanır. SSB’nin yoğunluğu esas olarak agrega yoğunluğuna ve sıkıştırma derecesine bağlıdır. Agrega özellikleri aynı olan hava sürüklenmemiş ve

düşük su içeriğine sahip SSB karışımının yoğunluğunun hava sürüklenmiş geleneksel kütle betonuna kıyasla biraz daha yüksek olduğu görülmüştür [21]. Şekil 12’de SSB karışımının yoğunluk kontrol deneyi görülmektedir. Araştırmacılar, modifiye edilmiş Proctor (M-P) yöntemiyle belirlenen optimum su muhtevasına sahip karışımların hava içeriğinin, geleneksel betona göre yaklaşık %3 daha yüksek olduğunu bulmuştur [78].



Şekil 12. Yoğunluk kontrol cihazı [20]

Liu ve diğerleri [79], birim hacim sıkıştırma enerjisi (BHSE) ve birim alan sıkıştırma enerjisinin (BASE), SSB matrisi ve ara yüzeyin sıkıştırma kalitesini değerlendirmek için kullanılabilir olduğunu bildirmiştir. Ancak kurulan modelleri iyileştirmek ve tahminlerin doğruluğunu artırmak için daha fazla numuneye ihtiyaç olduğu ifade edilmiştir. Bazı araştırmacılar, geri kazanılmış asfalt kaplama (GKAK) malzemesi içeren karışımların normal agregaya içeren numunelerden daha düşük optimum su muhtevasına ve daha düşük maksimum kuru yoğunluğa sahip olduğunu bulmuştur. Ayrıca, pirinç kabuğu külünün, özgül yüzeyinin yüksek olmasından dolayı, SSB’ye ilave edilmesinin optimum nem içeriğini artırdığı, maksimum kuru yoğunluğu ise azalttığı görülmüştür [41], Çimento miktarından bağımsız olarak, SSB karışımlarının kolaylıkla hava sürüklenbilir olduğu açıklanmıştır [80]. Bazı araştırmacılar, karışımın optimum su içeriğini belirlemek için Vebe testini önermiştir. SSB kaplamalarda (SSBK) Vebe süresinin 47-65 saniye arasında olması gerektiğini ileri sürülmüştür [81]. SSB karışım tasarımı için uygun kuru yoğunluğun ve işlenebilirliğin (Vebe süresi) çok önemli olduğu tespit edilmiş, bu özelliklerin agregaya tane dağılımına ve su içeriğine bağlı olduğu bulunmuştur [82]. Bazı çalışmalar, yüksek hacimli (%60) ve düşük kaliteli uçucu kül içeren karışımın sadece boşluk boyutunu iyileştirmek değil aynı zamanda çimento hamurunun boşluk boyutu dağılımını da iyileştirdiğini, bunun sonucu olarak mikro-yapının gelişimini, dayanım ve durabilitesini büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir [83]. Araştırmacılar, çimento üretimi yan ürünü olan fırın tozu (ÇFT) eklenmesinin, SSB’nin optimum su içeriğini artırdığını, maksimum kuru yoğunluğunu ise azalttığını göstermiştir. Genel olarak, çimentonun bir kısmı, ÇFT değiştirildiğinde betonun sıkıştırılabilirliği azalmıştır. Ancak, çimento yerine %2 oranında ÇFT kullanıldığında en iyi mekanik ve durabilite özellikleri elde edilmiştir [84]. Bir diğer çalışmada, SSB karışımlarında bulunan büyük agregaların betonun deformasyon yeteneğini sınırlandırdığı, iyi gradasyonlu agregaya içeren SSB’nin ise

boyutsal stabilitesinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir [29]. Shamsaei ve diğerleri [85], çapraz bağlı polietilen (XLPE) atıkları, iri agrega olarak kullanıldığında, SSB'nin bazı özelliklerini iyileştirdiğini belirlemiştir. SSB karışımında geri dönüştürülmüş XLPE atıkları, %50 oranında agrega yerine kullanıldığında (vibratörle) sıkıştırma süresini %42 mertebesinde azaltmıştır. Birim ağırlığının azalması, XLPE içeriğindeki artışıyla doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.

M. YÜZEY ÖZELLİKLERİ

SSB kaplamanın sorunlarından biri, döküm sonrası yüzey kalitesidir. SSB pürüzlü ve düzgün olmayan bir yüzeye sahiptir [86]. Söz konusu SSB'nin yüzey yapısında agregaların boyutu ve tipinin büyük bir rolü vardır. Karışımlarda en büyük tane çapı daha küçük seçildiğinde, elde edilen yüzey daha iyi ve düzgün olduğu bilinmektedir [87]. Avustralya'da, SSB'nin yüzey sürtünmesini belirlemek için testler gerçekleştirilmiştir. SSB'nin asfalt kaplamaya göre, yatay kuvvet katsayısının önemli ölçüde düşük olduğu görülmüştür [88]. Avustralya'da, yapılan çalışmanın sonuçlarına göre, SSB kaplamaların yenilenmeye ihtiyaç olan yollardan daha iyi performansa sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca bu tip kaplamaların uygulanmasında tecrübenin artırılmasıyla, uygulama kalitesinin de artacağı ön görülmüştür [89].

III. SONUÇ

Günümüzde birçok uygulamaya kıyasla hız ve ekonomi açısından daha avantajlı olması SSB'leri vazgeçilmez kılmaktadır. Bu bağlamda SSB'lerin uygulama alanlarının genişletilmesi, dolayısıyla mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı mineral katkıların, geri kazanılmış agregaların, geri kazanılmış lastiklerin, ince agrega miktarının, agrega gradasyonunun, çeşitli tiplerde ve özelliklerde lif kullanımının SSB karışımlarının mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi ile ilgili çok detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Uygulamalarda SSB tercihinin artmasında yapının mekanik özellikleri, dayanıklılık, yüksek imalat hızı ve ekonomik performansının büyük etkisi vardır. SSB karışımlarında geleneksel betona kıyasla daha düşük miktarda su ve çimento kullanılmaktadır. SSB'nin yapısında sıkıştırma etkisinden dolayı hapsolmuş hava miktarı çok az ve üretim esnasında kıvamı oldukça düşük olmaktadır. Bu durum SSB'nin dayanım ve durabilite performansına olumlu etki sağlamaktadır. Ayrıca çimento tüketiminin azalmasından dolayı çevreye CO₂ salınımı da önemli miktarda azalmaktadır.
- SSB karışımlarda 175 ile 250 kg/m³ arasında değişen miktarlarda çimento kullanılmasının kompozite üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Karışımın basınç dayanımının çimento içeriği ile doğrudan ilişkili olduğu dikkate alınarak minimum çimento içeriğinin 200 kg/m³ ile sınırlı olması önerilmiştir.
- Tabakalar halinde uygulanan SSB karışımlarda kısmen bağlı veya bağlanmamış kaplamaların yük taşıma kapasitesinin, tek tabaka olarak davranan kaplamalardan önemli ölçüde daha düşük olduğu görülmüştür.
- SSB'lerde mineral katkı kullanımının erken yaşlarda dayanımı olumsuz etkilediği, ileri yaşlarda olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bu etki mineral katkı kullanım oranının artışıyla daha da belirgin hale gelmiştir. İncelenen çalışmalarda mineral katkı kullanımının SSB karışımlarının durabilite performansını iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

- Puzolon içeren SSB karışımlarda çelik liflerin basınç dayanımına etkisinin çoğunlukla polipropilen (PP) liflerden daha fazla olduğu, fakat puzolanlardan bağımsız olarak ne çelik ne de PP lifler karışımların kırılma modülünü artırmıştır. Ancak çelik lif kullanıldığında tokluk indekslerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, SSB'lerin statik yükler altındaki eğilme davranışının, çelik liflerin eklenmesiyle artırılabilceğini göstermiştir.
- Sıkıştırma süresinin artmasının, normal SSB'nin basınç dayanımı, geçirgenlik ve su emme gibi özelliklerinin kaybına yol açtığı saptanmıştır. Ancak, YFC bağlayıcı karışımlarda sıkıştırma süresindeki artışın performans kaybına neden olmadığı, hatta bazı durumlarda, betonun basınç dayanımı, geçirgenlik, su emme ve adsorpsiyon özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.
- SSB yollarda cüruf kullanımının bütün yaşlarda basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı ve elastisite modülünü azalttığını tespit etmişlerdir.
- Geri kazanılmış asfalt kaplama (GAK) ve kauçuk malzemelerin kullanılmasının SSB'nin enerji sönmeme performansını artırmıştır. Ayrıca karışımlara GAK veya kauçuk eklenmesinin SSB'nin rijitliği ve elastik modülünü azalttığı, ancak tokluğunu arttırdığı bildirilmiştir. GAK malzemelerini içeren SSB karışımlarının yorulma ömrünün geleneksel betondan daha düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, iri agreganın GAK ile ikamesi ince agregaya göre karışımların yorulma direncini iyileştirmiştir. SSB'lerde, GAK içeriğinin %50'den yüksek olması durumunda, SSB karışımlarının basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir.
- SSB karışımlarda agregaya olarak lastik parçacığı kullanımının SSB'nin sünekliğinin artmasına neden olduğunu buna karşın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği bildirilmiştir. SSB'de geçirgenlik özellikleri incelendiğinde geleneksel betona benzer sonuçlar gözlemlenirken; hava sürükleyici katkı kullanımının geleneksel betona kıyasla daha fazla geçirgenliğe sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca puzolanların ve kömür atık külü gibi katkıların belli oranının (C/F) 1,2 ile 1,4 arasında seçildiğinde geçirgenlik açısından uygun, sonuçlar verdiği görülmüştür.
- SSB karışımlarda ince kırma kireçtaşı agreganın porselenit ile hacimce %5 ikameli olarak kullanıldığı durumda karışımlar ultras ses geçiş hızı ve boşluk hacmi bakımından en iyi performansı göstermiştir.
- SSB karışımlarda hava sürükleyici katkı kullanılması karışımların dayanım özelliklerini kontrol karışımına göre olumsuz etkilerken, donma-çözülme çevrimleri esnasında tuz etkisinden dolayı pullanmaya karşı iyi performans göstermiştir.
- Hava sürüklenmemiş SSB karışımların yoğunlukları hava sürüklenmiş karışımlara göre daha yüksek olmaktadır. Ayrıca modifiye proctor yöntemiyle üretilen SSB karışımlarında hava içeriği geleneksel betona göre daha düşük olmakta, bu bağlamda yoğunlukları geleneksel betonlardan daha yüksek olmaktadır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma TÜBİTAK 1001 - Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (Proje numarası: 217M408) kapsamında desteklenmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] *Roller compacted mass concrete*, ACI Manual of Concrete Practice, ACI 207.5R-99, 2004.
- [2] *Compaction of roller compacted concrete*, ACI Manual of Concrete Practice, ACI 309.5R-00, 2000.

- [3] S. Williams, "Construction of Roller-Compacted Concrete Pavement in the Fayetteville Shale Play Area," *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2408, pp. 47-54, 2014.
- [4] M. Zdiri, N. Abriak, M. Ouezdou and J. Neji, "The use of fluvial and marine sediments in the formulation of roller compacted concrete for use in pavements," *Environmental technology*, vol.8, no. 30, pp. 809-815, 2009.
- [5] S. Tayabji, T. Sherman, O. Keifer, A. Nanni, R. Piggott, D. Pittman and J. Scott, "State-of-The-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements," American Concrete Institute, USA, Rap. ACI325.10R-95, 1995.
- [6] P. Bílý, J. Fládr and M. Haase, "Experimental verification of properties of roller-compacted concrete for pavements," *Advanced Materials Research*, vol. 1124, pp. 307, 2015.
- [7] D. Ludwig, A. Nanni and J. Shoenberger, "Use of RCC," *Application of roller-compacted concrete (RCC) technology to roadway paving*, Final record. Washington, USA: U.S. Army Corps of Engineers, 1994, bōl. 3, ss. 5-8.
- [8] G. Topličić-Ćurčić, D. Grdić, N. Ristić and Z. Grdić, "Properties, materials and durability of rolled compacted concrete for pavements," *Zaštita materijala*, vol. 56, no. 3, pp. 345-353, 2015.
- [9] S. Carrascón, J. Díaz and A. Josa, "RCC Application in Low-Volume Roads in Spain," *6^o Simpósio Internacional sobre Carreteras de Hormigó*, pp. 93-102, 1990.
- [10] ACI 325.10R-99, "State of the art report on roller compacted concrete pavement," *ACI Manual of Concrete Practice*, USA, s. 32, 2004.
- [11] Jr. W. N. Mc Cormac, "Engineer Technical Letter," Chief, Engineering Division, Directorate of Engineers and Construction, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineer, Washington, USA, D.C. 1110-1-126, 1985.
- [12] R. Holder, "Roller Compacted Concrete Pavement Tactical Equipment Hardstand," *Corps of Engineers*, vol. 434, 1984.
- [13] C.V. Logie and J.E. Oliverson, "Burlington Northern Railroad Intermodal Hub Facility," *Concrete International*, vol. 2, no. 9, pp. 37-41, 1987.
- [14] J.L. Larson, "Roller-compacted concrete pavement design practices for intermodal freight terminals at the port of Tacoma," *State-of-the-art Report*, vol. 4, 1986.
- [15] Y.H. Huang, "Pavement analysis and design", *Upper Saddle River*, United States, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1993, pp. 14-16.
- [16] Kagata, "Retarder application to longitudinal roller compacted in concrete pavement joints," 9th International Symposium in Concrete Roads, Portugal, 1998.

- [17] J. Abrams, J. Jacksha, L. Norton and D. Irvine, "Roller-Compacted Concrete Pavement at Portland International Airport," *Transportation Research Record*, no. 1062, pp. 20-24, 1986.
- [18] J.M. Abrams and J.L. Jackshaw, "An airport Apron and a county road," *Concrete International: Design & Construction*, vol. 9, no. 2, pp. 30-36, 1987.
- [19] K.H. Khayat and N.A. Libre, "Roller compacted concrete: field evaluation and mixture optimization," *Missouri University of Science and Technology*, no. 363, 2014.
- [20] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. V. Hazaree, H. Ceylan, F. Bektas, "Guide for roller-compacted concrete pavements," *InTrans Project Reports*, vol. 102, 2010.
- [21] U.S. Army Corps of Engineers, "Engineering and Design Roller-Compacted Concrete", Department of the Army, Washington D.C., USA, Rap. EM 1110-2-2006, 2000.
- [22] A. Mardani-Aghabaglou and K. Ramyar, "Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method," *Construction and Building Materials*, no. 38, pp. 356-364, 2013.
- [23] S.K. Rao, P. Sravana and T.C. Rao, "Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of Fly Ash Roller Compacted Concrete (FRCC)". *Construction and Building Materials*, no. 118, pp. 352-363, 2016.
- [24] C.D. Atiş, U.K. Sevim, F. Özcan, C. Bilim, O. Karahan, A. H. Tanrikulu and A. Ekşi, "Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash," *Materials Letters*, vol. 9, no. 58, pp. 1446-1450, 2004.
- [25] C. Cao, W. Sun and H. Qin, "The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash," *Cement and concrete research*, vol.1, no. 30, pp. 71-75, 2000.
- [26] S.K. Rao, P. Sravana and T.C. Rao, "Strength and compaction characteristics of fly ash roller compacted concrete," *International Journal of Scientific Research in Knowledge*, vol.10, no. 3, pp. 260-269, 2015.
- [27] S. Pavan and S. K. Rao, "Effect of Fly ash on strength characteristics of roller compacted concrete pavement," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, no. 11, pp. 04-08, 2014.
- [28] S.K. Rao, P. Sravana and T.C. Rao, "Investigation on pozzolanic effect of fly ash in roller compacted concrete pavement," *IRACST-Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, vol.2, no. 5, pp. 202-206, 2015.
- [29] M. Rao, H. Yang, Y. Lin, J. Li and Y. Shi, "Influence of maximum aggregate sizes on the performance of RCC," *Construction and Building Materials*, no. 115, pp. 42-47, 2016.

- [30] S.K. Rao, P. Sravana and T.C. Rao, "Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of Roller Compacted Concrete containing GGBS," *Construction and Building Materials*, no. 122, pp. 191-201, 2016.
- [31] S.K. Rao, P. Sravana and T.C. Rao, "Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS," *Construction and Building Materials*, no. 114, pp. 925-933, 2016.
- [32] A. Karimpour, "Effect of time span between mixing and compacting on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS)," *Construction and Building Materials*, vol. 11, no. 24, pp. 2079-2083, 2010.
- [33] M.N.T. Lam, S. Jaritngam and D.H. Le, "Roller-compacted concrete pavement made of electric arc furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties," *Construction and Building Materials*, no. 154, pp. 482-495, 2017.
- [34] M. Madhkhan, R. Azizkhani and M.T. Harchegani, "Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements," *Construction and Building materials*, s. 26(1), ss. 102-112, 2012.
- [35] A. Benouadah, M. Beddar and A. Meddah, "Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber," *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol.2, no. 9, pp. 623-635, 2017.
- [36] K. Neocleous, H. Angelakopoulos, K. Pilakoutas and M. Guadagnini, "Fibre-reinforced roller-compacted concrete transport pavements," *Proceedings of the ICE-Transport*, no. 164, pp. 97-109, 2011.
- [37] Ş. Yazıcı, A. Mardani-Aghabaglou, M. Tuyan and A.A. Üte, "Mechanical properties and impact resistance of roller-compacted concrete containing polypropylene fibre," *Magazine of Concrete Research*, vol.16, no. 67, pp. 867-875, 2015.
- [38] J.N. Karadelis and Y. Lin, "Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete," *Construction and Building Materials*, no. 93, pp. 498-505, 2015.
- [39] A.A. Üte, "Uçucu Kül ve Polipropilen Lif Kullanımının Silindire Sıkıştırılmış Beton Özelliklerine Etkisi," Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2008.
- [40] M. Fakhri and E. Amosoltani, "The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement," *Construction and Building Materials*, no. 137, pp. 470-484, 2017.
- [41] A. Modarres and Z. Hosseini, "Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material," *Materials & Design*, no. 64, pp. 227-236, 2014.

- [42] C. Settari, F. Debieb, E.H. Kadri and O. Boukendakdji, "Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete," *Construction and Building Materials*, no. 101, pp. 617-621, 2015.
- [43] F. Debieb, L. Courard, S. Kenai and R. Degeimbre, "Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, vol.11, no. 23, pp. 3382-3387, 2009.
- [44] L. Courard, F. Michel and P. Delhez, "Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete," *Construction and Building Materials*, vol.3, no. 24, pp. 390-395, 2010.
- [45] A. Lopez-Uceda, F. Agrela, M. Cabrera, J. Ayuso and M. López, "Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates," *Road Materials and Pavement Design*, vol.1, no. 19, pp. 36-55, 2018.
- [46] H. Angelakopoulos, P. Papastergiou and K. Pilakoutas, "Fibrous roller-compacted concrete with recycled materials-Feasibility study," *Magazine of Concrete Research*, vol.15, no. 67(15), pp. 801-811, 2015.
- [47] A. Meddah, M. Beddar and A. Bali, "Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement," *Journal of Cleaner Production*, s. 72, ss. 187-192, 2014.
- [48] A. Meddah, H. Bensaci, M. Beddar and A. Bali, "Study of the effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the performance of rubberized roller-compacted concrete pavement," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol.1, no. 2, pp. 17, 2017.
- [49] M. Fakhri, "The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement," *Journal of cleaner production*, no. 129, pp. 521-530, 2016.
- [50] S.A. Ghahari, A. Mohammadi and A.A. Ramezani-pour, "Performance assessment of natural pozzolan roller compacted concrete pavements," *Case studies in construction materials*, no. 7, pp. 82-90, 2017.
- [51] M. Chi and R. Huang, "Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete," *Cement and Concrete Composites*, no. 45, pp. 148-156, 2014.
- [52] S. Hesami, A. Modarres, M. Soltaninejad and H. Madani, "Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement," *Construction and Building Materials*, no. 111, pp. 625-636, 2016.
- [53] E.K. Vahidi, M.M. Malekabadi, A. Rezaei, M.M. Roshani and G.H. Roshani, "Modelling of Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete Containing RHA using ANFIS," *Computers and Concrete*, vol. 4, no. 19, pp. 435-442, 2017.
- [54] S.R. Zhang, X.H. Wang, C. Wang, R. Song and H.Y. Huo, "Compressive behavior and constitutive model for roller compacted concrete under impact loading: Considering vertical stratification," *Construction and Building Materials*, no. 151, pp. 428-440, 2017.

- [55] A.A. Salih and Z.M. Abed, "Effect of Using Porcelanite as Partial Replacement of Fine Aggregate on Roller Compacted Concrete with Different Curing Methods," *Journal of Engineering*, vol. 9, no. 22, pp. 21-35, 2016.
- [56] M. Zdiri, M. Ben Ouezdou and J. Neji, "Theoretical and experimental study of roller-compacted concrete strength," *Magazine of Concrete Research*, vol. 7, no. 60, pp. 469-474, 2008.
- [57] M.C. Albuquerque, J.T. Balbo, E.C. Sansone and P.C. Pinto, "Fracture characterization of roller compacted concrete mixtures with blast furnace slag and industrial sand," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 244-251, 2011.
- [58] M.S. Jaafar, J. Noorzai, A.A. Abdulrazeg, T.A. Mohammed and P. Khanehzaei, "A Spatial FEM model of thermal and mechanical action in RCC dam," *Structural Longevity*, vol.3, no. 5, pp. 147-155, 2011.
- [59] Q. Li, F. Zhang, W. Zhang and L. Yang, "Fracture and tension properties of roller compacted concrete cores in uniaxial tension," *Journal of materials in civil engineering*, vol.5, no. 14, pp. 366-373, 2002.
- [60] Z. Wu, M. Mahdi and T.D. Rupnow, "Accelerated pavement testing of thin RCC over soil cement pavements," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol.3, no. 9, pp. 159-168, 2016.
- [61] W. Sun, J. Liu, H. Qin, Y. Zhang, Z. Jin and M. Qian, "Fatigue performance and equations of roller compacted concrete with fly ash," *Cement and concrete research*, vol. 2, no. 28, pp. 309-315, 1998.
- [62] J.P. Won, C.I.I. Jang, S.W. Lee and W.Y. Kim, "Durability Performance Of Roller Compacted Concrete Using Fly Ash," Proc. Int. Symp, Brittle Matrix Composites 9, Warsaw, Poland, October 25-28, 2009.
- [63] M.I. Abu-Khashaba, I. Adam and A. El-Ashaal, "Investigating the possibility of constructing low cost roller compacted concrete dam," *Alexandria Engineering Journal*, vol.1, no. 53, pp. 131-142, 2014.
- [64] S. A. M. Rad and A. Modarres, "Durability properties of non-air entrained roller compacted concrete pavement containing coal waste ash in presence of de-icing salts," *Cold Regions Science and Technology*, no. 137, pp. 48-59, 2017.
- [65] M. Ali Ahmad, M. Miri and M. Rashki, "Probabilistic and experimental investigating the effect of pozzolan and Lumachelle fine aggregates on roller compacted concrete properties," *Construction and Building Materials*, no. 151, pp. 755-766, 2017.
- [66] A. Aghaeipour and M. Madhkan, "Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability," *Construction and Building Materials*, no. 141, pp. 533-541, 2017.

- [67] A. Yerramala and K.G. Babu, "Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete," *Cement and Concrete composites*, vol. 10, no. 33, pp. 1057-1062, 2011.
- [68] A. Mardani-Aghabaglou, Ö. Andiç-Çakir and K. Ramyar, "Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method," *Cement and Concrete Composites*, no. 37, pp. 259-266. 2013.
- [69] M. Hashemi, P. Shafigh, M.R.B. Karim and C.D. Atis, "The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement," *Construction and Building Materials*, no. 169, pp. 553-566, 2018.
- [70] D. Miceli, J. Repérant, L. Marchand and J.P. Rio, "Retrograde transneuronal transport of the fluorescent dye rhodamine β -isothiocyanate from the primary and centrifugal visual systems in the pigeon," *Brain research*, vol. 1-2, no. 601, pp. 289-298, 1993.
- [71] M. Nili and M. Zaheri, "Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements," *Construction and Building Materials*, vol. 4, no. 25, pp. 1671-1676, 2011.
- [72] A. Omran, D. Harbec, A. Tagnit-Hamou and R. Gagne, "Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study," *Construction and Building Materials*, no. 133, pp. 450-458, 2017.
- [73] F. Vahedifard, M. Nili and C.L. Meehan, "Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement," *Construction and Building Materials*, s. 24(12), ss. 2528-2535, 2010.
- [74] S.I. Sarsam, A. Al-Rawi and S.D. Tawfeek, "Assessing the impact of cement content and type on the durability of roller compacted concrete using NDT," *International Journal of Scientific Research in Knowledge*, vol.1, no. 2, pp. 48, 2014.
- [75] E.R. Cortez and R.A. Eaton, "Freeze-Thaw Tests of Full-Scale Roller-Compacted Concrete Test Sections," *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover Nh*, No. CRREL-SR-90-25, 1990.
- [76] A.A. Ramezani-pour, A. Mohammadi, E.R. Dehkordi and Q.B. Chenar, "Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavements in cold regions," *Construction and Building Materials*, no. 146, pp. 260-266, 2017.
- [77] C. Hazaree, H. Ceylan and K. Wang, "Influences of mixture composition on properties and freeze–thaw resistance of RCC," *Construction and Building Materials*, vol. 1, no. 25, pp. 313-319, 2011.
- [78] Y. Lin, J.N. Karadelis and Y. Xu, "A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays," *Construction and Building Materials*, no. 48, pp. 333-341, 2013.

- [79] D. Liu, Z. Li and J. Liu, "Experimental study on real-time control of roller compacted concrete dam compaction quality using unit compaction energy indices," *Construction and Building Materials*, no. 96, pp. 567-575, 2015.
- [80] C.V. Hazaree, H. Ceylan and K. Gopalakrishnan, "Can Air be Entrained in Roller-Compacted Concrete Mixes?," 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Iowa, United States, 2009.
- [81] C. Chhorn, S.J. Hong and S.W. Lee, "A study on performance of roller-compacted concrete for pavement," *Construction and Building Materials*, no. 153, pp. 535-543, 2017.
- [82] C. Chhorn, Y.K. Kim, S.J. Hong and S.W. Lee, "Evaluation on compactibility and workability of roller-compacted concrete for pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-6, 2017.
- [83] S. Liu, Q. Li, M. Rao and L. Wang, "Properties and microstructure of roller compacted concrete with high volume low quality fly ash," *Materials Science*, vol.3, no. 23, pp. 273-279, 2017.
- [84] R. Abbaszadeh and A. Modarres, "Freeze-thaw durability of non-air-entrained roller compacted concrete designed for pavement containing cement kiln dust," *Cold Regions Science and Technology*, no. 141, pp. 16-27, 2017.
- [85] M. Shamsaei, I. Aghayan and K.A. Kazemi, "Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement," *Journal of Cleaner Production*, no. 165, pp. 290-297, 2017.
- [86] N. Delatte, N. Amer and C. Storey, "Improved management of RCC pavement technology," *UTCA Report*, no. 1231, pp. 54, 2003.
- [87] R.W. Piggott, "Roller-compacted Concrete Pavements: A Study of Long Term Performance," *Portland Cement Association*, 1999.
- [88] *Report on roller-compacted mass concrete*, ACI Manual of Concrete Practice, ACI 207.5 R-11, 2011.
- [89] T.R. Naik, Y.M. Chun, R.N. Kraus, S.S. Singh, L.L.C. Pennock and B.W. Ramme, "Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 4, no. 6, pp. 154-165, 2001.