



Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Properties of Materials Used in Roller Compacted Concrete Mixtures

Ali Mardani-Aghabaglou¹, Sultan Husein Bayqra¹, Süleyman Özen¹, Zia Ahmad Faqiri¹,
Kambiz Ramyar²

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, TÜRKİYE

²Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 23/05/2019

Kabul / Accepted: 17/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Son yıllarda dünya genelinde silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) teknolojisi yaygın şekilde kullanılmaktadır. SSB, düşük maliyeti ve hızlı yerleştirilebilmesi nedeniyle baraj ve yol inşaatlarında tercih edilmektedir. SSB, normal betonla aynı temel bileşenlere sahiptir ve aynı yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Ancak, geleneksel betondan farklı olarak daha düşük miktarda çimento kullanılmasının yanı sıra kuru kıvamından dolayı silindirle sıkıştırılarak yerleştirilir. Bu çalışmada SSB'nin genel özellikleri ve SSB karışımlarında kullanılan çimentonun tipi, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi mineral katkıların özellikleri, agrega boyutları ve gradasyonu, su, kimyasal katkıları ve lif kullanımının SSB karışımlarının özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bunun yanında söz konusu bu malzemelerin dünya üzerindeki SSB uygulamalarında kullanılmalarından ve avantajlarından bahsedilmiştir. İncelenen çalışmalara göre, geleneksel beton karışımlarına kıyasla, düşük miktarda çimento kullanımı ile SSB karışımlarının hidrasyon ısısında azalmalar meydana gelmektedir. Ayrıca bağlayıcı olarak uçucu kül, yüksek cürufu ve silis dumanı kullanımı SSB'lerin işlenebilirliğini ve erken yaş dayanımını ciddi mertebede etkilediği araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır. Yazarlara göre, SSB karışımlarında geleneksel betona kıyasla daha büyük tane çapına sahip agregalar kullanıldığından karışımların ayrışmaya karşı direncinin incelenmesi önem kazanmaktadır. Beton karışımların performansını artırmaya yönelik, geleneksel betonlarda kullanılan kimyasal katkıların, çelik veya polipropilen liflerin SSB'lerde de kullanılabilirliği bildirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Silindirle sıkıştırılmış beton, mineral katkı, kimyasal katkı, lif, taze ve sertleşmiş hal özellikleri”

Abstract

In recent years, roller compacted concrete (RCC) technology has been widely used around the world. As it is known that the RCC is preferred in dams and road constructions due to its low cost and rapid placement. RCC has the same basic components as normal concrete and manufactures using the same methods. However, unlike conventional concrete, a lower amount of cement is used as well as being compacted by a roller because of its dry consistency. In this study, general properties of RCC and type of cement used in RCC mixtures, properties of mineral admixtures such as fly ash, blast furnace slag and silica fume, aggregate dimensions and gradation, water, chemical admixtures and utilization effect of fiber on RCC mixtures were investigated. In addition, the advantages of these materials in RCC applications are mentioned. According to the studies examined, the heat of hydration of RCC mixtures decrease by using low amount of cement compared to conventional concrete mixtures. Besides, it was emphasized by researchers that fly ash, blast furnace slag and silica fume as binder significantly affect the workability and early age strength of RCCs. According to the authors, it is important to investigate the resistance to segregation of RCC mixtures because aggregates having a larger grain diameter are used than conventional concrete. In order to improve the performance of concrete mixtures, the chemical admixtures, steel or polypropylene fibers in conventional concrete was used in RCC mixtures as well.

Key Words

“Roller compacted concrete, mineral admixture, chemical admixture, fiber, fresh and hardened state properties”

1. Giriş

Toprak ve kaya dolgu elemanları ile serilen ve sıkıştırılan Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), taze halde iken sıfır çökme değerine sahip olup, daha hızlı ve ekonomik şekilde inşa edilecek barajların tasarımları için yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiştir (ACI 207.5R-99, 1999). SSB, geleneksel betondan farklı olarak, aynı çimento dozajında ancak daha düşük su/çimento oranıyla yapılan kuru bir karışımdır (Zdiri ve ark., 2009). SSB'lerin normal betonlara göre hızlı üretim tekniği, dayanıklılığının iyi olması ve maliyetinin düşük olması gibi özelliklerinden dolayı dünyada yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca SSB üretiminde atık malzemelerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) yüksek oranda kullanılabilir olması SSB'lerin öne çıkmasında etkili olmuştur (Atiş, 2001).

SSB'lerin en yaygın ve en önemli kullanım alanları barajlar, yollar, hava limanları, fabrikalar ve petrol istasyonlarıdır. Söz konusu uygulamalarda beton dinamik yüklere ve çok ağır vasıtalarından kaynaklı yüklere maruz kalmaktadır (Delatte ve ark., 2003). SSB'ler aşırı basınç altında meydana gelen çatlak problemlerini çözmek ve çok sıcak havalarda uygulamalar için asfalt yollara bir alternatif olarak Qasrawi ve arkadaşları (2005) tarafından önerilmiştir. Ayrıca SSB'lerin erken yaşlarda yüksek dayanım göstermesinden, üretim maliyetlerinin düşük olmasından, hızlı yapım sürecinden ve daha az miktarda bağlayıcı madde içerdiğinden dolayı barajlar gibi kütle beton yapılarında da yaygın olarak tercih edilmektedir.

İnşaat sırasında maliyetin düşürülmesi ve inşa zamanının azalması bu uygulamanın temel avantajı olarak görülmektedir (ACI 207.5R-99, 1999). Diğer avantajları ise küçük inşaat ekipmanları, asfaltlama parkuru, el işi imalatı gerektirmemesi ve uzun süreli yükler altında sünme davranışının ihmal edilebilir olmasıdır (Ludwig ve ark., 1994). Dezavantajlarına bakıldığında SSB'de olası sınırlamalar ve zorluklar vardır. 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. Ayrıca bir transmiksör veya hazır karıştırıcı kamyonunda hazırlanmış SSB'nin miktarı karışımının kuru olmasından dolayı aynı araçlarda hazırlanan geleneksel betonun miktarından daha düşük olmaktadır (Topličić-Ćurčić ve ark., 2015).

Türkiye'de SSB yöntemi kullanılarak son yıllarda yapımı devam eden ve tamamlanmış bazı barajların genel bilgileri, baraj yapımından kullanılan SSB karışımlarının hacmi ve karışımlarda kullanılan bağlayıcı miktarları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye'de SSB kullanılarak yapımı devam eden ve tamamlanmış barajlar (Malcolm Dunstan and Associates, 2019)

Baraj	SSB Hacmi (m ³)	Çimento (kg/m ³)	Uçucu kül (kg/m ³)	Yükseklik (m)	Uzunluk (m)	Başlama	Bitiş
Kocaeli Karamürsel İhsaniye	130.000	75	45	69	203	2016	-
Narlı	49.000	65	50	47	153	2016	-
Beyhan II	191.000	130	0	60	363	2013	-
Yukarı Kaleköy	2.224.000	130	0	150	516	2012	2017
Aşağı Kaleköy	1.192.000	130	0	103	346	2013	2018
Melen	1.871.000	90	60	124	944	2013	2017
Köroğlu Kotanlı I	640.000	85	130	100	404	2015	2017
Kavşaktepe	330.000	81	39	71	268	2008	2017
Ardıl	108.000	75	50	54	246	2013	2017
Kotanlı II	245.000	85	130	70	250	2012	2015
Göktaş I	750.00	50	50	133	200	2011	2016
Ayvalı	1.650.000	50-100	110-120	177	405	2011	2015
Beyyurdu	186.000	95	0	78	176	2008	2015

Silindirle sıkıştırılmış betonların geleneksel betonlara göre en önemli farkı kıvamından ve içerdiği bağlayıcı miktarından kaynaklanmaktadır. Söz konusu kıvamın uygulanma esnasında silindirin batmadan geçeceği şekilde kuru olması gerekmektedir. Bu bağlamda, SSB'nin işlenebilirliği ve yoğunluğu en yüksek olacak şekilde malzeme seçimi ve tasarımı yapılmalıdır. SSB'nin özelliklerini etkileyen başlıca önemli parametreler;

- Sıkıştırma yüzdesi,
- Agreganın gradasyonu ve tipi,
- Çimentonun özellikleri,
- Mineral ve kimyasal katkıların özellikleri,
- Su muhtevası olarak ifade edilebilir (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Genellikle SSB karışımında kullanılan malzemeler:

- Bağlayıcı maddeler
- Agregalar
- Su
- 200 No'lu elekten geçen çok ince malzemeler

- Lifler
- Akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici kimyasal katkılarıdır (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Söz konusu bu malzemeler ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

1.1. Bağlayıcı Madde

SSB karışımında TS EN 197-1'e uygun herhangi bir çimento tipi kullanılabilenekte olup, 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. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, çimento ve mineral katkıları, bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bağlayıcı malzemeler, betonun hidrasyon ısısını doğrudan etkilemekte ve özellikle erken yaş dayanımı üzerindeki etkisinin daha da belirgin olduğu bilinmektedir. Bu nedenle büyük kütle ve hacme sahip SSB'lerde hidrasyon ısısından kaynaklanan termal genleşmeler sonucunda oluşan çatlakları önlemek için çimentonun yerine %20 ila %30 oranında mineral katkı kullanılmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Bağlayıcı maddelerin sülfat etkisi ve alkali-agrega reaksiyonu gibi etkilere karşı dayanıklı olması dikkate alınmaktadır (Andriolo, 1998).

1.1.1. Çimento

Normal betonlarda kullanılan çimento tipleri SSB'lerde de kullanılmaktadır. Baraj gibi yapılarda kütle beton dökümü sırasında oluşan hidrasyon ısısını azaltmak için düşük ısıli portland çimentosu seçilmektedir. SSB'lerde kullanılan düşük ısıli portland puzolan çimentosu ile yüksek fırın cürufu çimentosu dünyada da sık kullanılan çimento tiplerindedir. Söz konusu düşük ısıli portland çimentosunun kullanımı hidrasyon ısısından kaynaklanacak olan çatlakların oluşmasını engellemekte ve enine oluşan derzleri azaltmaktadır. Bu çimento tiplerinin ilk günlerdeki dayanımı normal portland çimentosuna göre daha düşük olmaktadır. Ancak, yapılan deneylerde ileri yaşlarda dayanımın daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir (Hansen ve Reinhardt, 1991). Çimento miktarının az ve puzolanik madde miktarının fazla olduğu barajlarda, açığa çıkan hidrasyon ısısının düşük olmasından dolayı normal portland çimentosu da kullanılmaktadır. Denizli Cindere Barajı'nda 50 kg/m³ CEMI 42.5R tipi çimento ve 20 kg/m³ uçucu kül, İzmir Beydağ Barajı'nda 60 kg/m³ CEMI 42.5R tipi çimento ve 30 kg/m³ uçucu kül kullanılmıştır (Andriolo ve Polat, 2006).

Japonya'da inşaa edilen SSB barajlarında genellikle 120 kg/m³ çimento kullanılmaktadır. Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde çimento miktarı genellikle 120 kg/m³ olmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde ise çimento miktarı 250 kg/m³'e kadar çıkabilmektedir. Hansen ve Reinhardt, 1991). Fransa'da bulunan Les Olivettes barajında yüksek fırın cürufu çimentosu kullanılmıştır (Andriolo, 1998). Beydağ Barajı'nda TS EN 197-1 "Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk" Kriterleri'ne uygun olan CEMI 42.5R çimentosu kullanılmış ve 7 günlük hidrasyon ısısı 75 kalori/gram veya daha düşük olma şartı getirilmiştir (Beydağ Barajı, 2006).

SSB'lerde düşük çimento dozajı kullanımının avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Hidrasyon ısısının düşük olması nedeniyle betonda çatlak oluşumu riskinin azalması,
- Çatlama riskinin azalmasından ötürü geçirgenliği daha düşük bir beton elde edilmesi,
- Betonun soğutma masraflarının azalması,
- Düşey derzlerin azalması,
- Ekonomik olması,
- Çimento kullanımından kaynaklanan durabilite problemlerinin azalması (Horzum, 2009).

1.1.2. Mineral Katkılar

Mineral katkıları, çoğunlukla silis veya silis-alümin kökenli malzemelerdir. Kendi başlarına çok az veya hiç bağlayıcı özelliği olmayan mineral katkıları, ancak çok ince bir şekilde öğütüldüğünde nemli ortamlarda ve normal sıcaklıkta kireç ile kimyasal reaksiyon yapıp bağlayıcılık özelliği kazanan inorganik maddelerdir.

1.1.2.1. Uçucu Kül

Dünyadaki ve Türkiye'deki SSB baraj inşasında daha çok yapay puzolan olarak uçucu kül kullanılmaktadır. Yapay puzolanlar arasında en çok tercih edileni uçucu küldür. Türkiye'de yapılan Beydağ Barajı'nda 30 kg/m³, Cindere Barajı'nda 20 kg/m³ ve Cine Adnan Menderes Barajı'nda ise 50 kg/m³ uçucu kül kullanılmıştır (Andriolo ve Polat, 2006). Uçucu kül, toz haline getirilmiş linyit veya taş kömürünü yakıt olarak kullanan termik santrallerinin bacalarındaki tozların elektrostatik filtrelerle tutulması ile elde edilen bir malzemedir. Uçucu kül 1938 yılında ilk defa Chicago'da bir yol yapımında çimentoya karıştırılarak kullanılmıştır. İkinci dünya savaşından sonra, yaşanan kaynak sorunundan dolayı bu malzemenin kullanımı gerek ABD'de, gerek Avrupa'da son derece yaygınlaşmıştır (Postacioğlu, 1986).

Uçucu kül, çimentonun hidrasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ve betonun boşluk çözeltilisindeki alkali hidroksitler ile reaksiyona girmektedir. Ayrıca, betonun durabilitesi için zararlı olan alkali-agrega reaksiyonunu önlemede uçucu külün koruyucu bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. Uçucu külün bünyesinde bulunan camı yapıdaki silikatlar ile çimentodaki alkali hidroksitler arasındaki reaksiyonun, alkalileri tüketeceği veya miktarını çok azaltacağı bilinmektedir. Bu nedenle uçucu külün, reaktif silisli agregalar ile reaksiyona girecek olan alkalilerin miktarını azaltarak, alkali agregası reaksiyonunun neden olacağı betondaki genleşme ve çatlamaı önleyici veya azaltıcı katkısı olduğu bilinmektedir (Mindness ve ark., 2003).

Uçucu külün kullanımı, çökme değeri sıfır olan betonun işlenebilirliğini artırmakta ve kütle betondaki hidrasyon ısısının düşmesinde olumlu etkisi olmaktadır. Uçucu külün, özellikle SSB baraj uygulamalarında önemli olan prizi geciktirme özelliği de

bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda uçucu kül kullanımının, SSB'lerin mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunduğu görülmüştür. Uçucu kül, çimento hidrasyonu ile açığa çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek boşlukları doldurur ve betonun geçirgenliğini azaltır (Mehta ve Monteiro, 1996). Ayrıca küçük boyutta uçucu kül taneleri reaksiyona girmeden de beton içindeki boşlukları fiziksel olarak doldurarak dolgu etkisi ile geçirimsizliğe katkıda bulunabilir. Sun ve ark. (1998) tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda uçucu kül kullanımının SSB'lerin yorulma dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada %0, 15, 30, 45 oranında uçucu kül içeren SSB karışımı ve normal beton (NB) olmak üzere 5 farklı seride karışım hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Beton numunelerinin karışım oranları (kg/m³) (Sun ve ark., 1998).

Seri	Çimento (kg)	Uçucu kül (kg)	Kimyasal katkı (kg)	Kum (kg)	İri agrega (kg)	Su (kg)
F0	300	0	1.5	802	1309	114
F15	270	45	1.575	752	1332	113
F30	240	90	1.65	699	1348	113
F45	210	130	1.725	650	1373	113
NB	330	0	0.825	638	1344	142

Elde edilen sonuçlara göre SSB numunelerinde uçucu kül kullanımının betonların 28 ve 90 günlük eğilme ve yorulma dayanımlarını artırdığı gözlenmiştir. Uçucu kül içeren ve içermeyen SSB'lerin yorulma dayanımı normal betona göre %40-50 kadar artmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada hem basınç dayanımları hem de eğilme dayanımları açısından en yüksek sonuçları %45 oranında uçucu kül katkılı SSB'lerin verdiği görülmüştür (Cao ve ark., 2000).

SSB karışımında uçucu kül kullanımının amaçları aşağıda sıralanmıştır:

- Betonun hidrasyon ısısını en aza düşürmek, enine derzleri azaltmak,
- Betonun işlenebilirliğini arttırmak,
- Betonun su geçirimsizliğini azaltmak,
- Betonun ileri yaş dayanımını daha yüksek değerlere çıkarmak,
- Dolgu malzemesi olarak boşluk oranını düşürmek,
- Çimento dozajını azaltarak beton maliyetini düşürmektir (Andriolo, 1998; Hansen and Reinhardt, 1991).

Uçucu külün özgül ağırlığı çimentoya göre daha düşük olduğundan çimento yerine aynı ağırlıkta uçucu kül ikame edildiğinde, hacim artacağından, beton daha plastik ve kohesif hale gelebilmekte ve işlenebilirliği artabilmektedir.

1.1.2.2. Yüksek fırın cürufu (YFC)

Demir üretiminde kullanılan yüksek fırında, cevherden demir alındıktan sonra geri kalan maddeye cüruf denilmektedir. İçinde alümin, silis ve kireç bulunan cürufun yoğunluğu 2.85 ile 2.95 arasında değişmektedir. Söz konusu yüksek fırın cürufunun kaynağı ve inceliği, taze ve sertleşmiş SSB'nin özelliklerini etkilemektedir.

Yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak, ya da ince öğütülerek ve Portland çimentosunun hidrasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)₂'i kullanmak suretiyle, hidrolik özelliğe sahip olur. Aktivasyon sonunda kalsiyum silikat hidratlar meydana gelir (Tokyay ve Erdoğan, 2001; Özkan 2006).

Yapılan bir çalışmada YFC'nin erken yaşlarda daha yavaş puzolanik reaksiyon göstermesine bağlı olarak, çimentonun yerine kısmen YFC kullanılması 3 günlük dayanım değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Ancak ileri yaşlarda YFC içeren karışımlar, kontrol karışımına kıyasla, daha yüksek dayanım performansı göstermiştir (Rao ve ark., 2016).

Saluja ve arkadaşları (2019) çalışmalarında agrega tipindeki değişim ve yüksek fırın cürufunun SSB karışımlarının kuruma büzülme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre SSB karışımında bulunan çimento ve su miktarının geleneksel betona kıyasla daha az olmasından dolayı, SSB karışımlarından yaklaşık %50 daha az kuruma-büzülme tespit edilmiştir. Ancak SSB karışımlarında YFC ile çimentonun ikame oranının artmasıyla kuruma büzülme artmıştır.

Rao ve arkadaşlarının (2015) yaptığı diğer bir çalışmada SSB karışımlarda iki farklı mineral katkının (uçucu kül ve yüksek fırın cürufu) puzolanik etkisi, spesifik dayanım oranı, spesifik dayanım indeksi ve puzolanik etkinin dayanıma katkısı gibi çeşitli dayanım indeksleri ile incelenmiştir. Karışımlardaki çimento ağırlıkça %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile ikame edilmiştir. Deney sonuçlarına göre erken yaşlarda, uçucu kül içeren SSB betonların dayanımı karışımdaki uçucu kül oranının artmasıyla azalmıştır. Ancak cüruf içeren SSB'lerde ise karışımlardaki cüruf oranının artmasıyla dayanımlarda artış gözlenmiştir. 90 günlük kürlenme süresinin sonunda ise SSB karışımlarındaki uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun dayanıma etkisi yaklaşık %50-60 oranlarında olmuştur.

1.1.2.3. Silis dumanı

Silikon metalin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın, hızlı soğutulmuş yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85 ile %98 arasında amorf yapıya sahip silis içeren çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye silis dumanı adı verilmektedir (Erdoğan, 2003).

Endüstriyel bir atık olan silis dumanının betona ilave edilmesiyle daha yüksek performanslı betonlar elde edilebilmektedir. Silis dumanını oluşturan bileşiklerin arasında SiO_2 'nin %85'ten fazla bulunmasından dolayı silis dumanı kendi başına bağlayıcılık özelliği olmamasına rağmen çok iyi bir yapay puzolandır. Silis dumanı taneleri çimento tanelerinin yaklaşık 100 katı daha küçüktür. Silis dumanının puzolanik reaksiyonu sonucunda oluşan ürünler, betonun mikro yapısında doluluk sağlamak ve geçirimsizliğini artırmaktadır. Ancak, olumsuz bir özellik olarak, silis dumanının betonda plastik rötreği artırdığı bilinmektedir (Erdoğan, 2003).

Avrupa'da yaygın olarak kullanılmasına rağmen, cüruf ve silis dumanı gibi bağlayıcı malzemeler batı Kanada ya da Amerika Birleşik Devletleri'nde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Silis dumanı Kanada'nın doğusunda son 10 yılda yüksek performanslı SSB kaplamaların yapımında kullanılmaktadır (Pigeon ve ark., 1998). Silika dumanı, yalnızca SSB karışımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda numunelerin dayanım gelişimini de hızlandırmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda, SSB karışımlarda silis dumanı kullanımının donma-çözülmeye karşı dayanıklılığını artırdığı belirtilmiştir (Marchand ve ark., 1992; Reid ve ark., 2000).

Kiran ve ark (2015) yaptıkları çalışmada, silis dumanı içeren SSB karışımlarının basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı özellikleri üzerine deneysel araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Silis dumanı içeren SSB karışımlarında, çimento ağırlıkça %5, %7,5 ve %10 oranlarında silis dumanı ile yer değiştiriliyor. Söz konusu karışımlar üretildikten sonra taze halde işlenebilirliği ve sertleşmiş halde dayanım özelliklerini belirlemek için testler yapılmıştır. Sıkıştırma faktörü testi, vebe testi ve çökme testi gibi işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. SSB karışımlarda silis dumanının bulunması 3,7 ve 28 günlük basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımlarını belirlemiştir. Deney sonuçlarına göre karışımlarda silis dumanı ikamesi arttıkça dayanımlarda da önemli mertebelerde artış gözlenmiştir. Ancak karışımın işlenebilirliği silis dumanının artışıyla olumsuz etkilenmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada silis dumanı ve pomza kullanımının, SSB karışımlarının işlenebilirliği, basınç dayanımı ve dona karşı direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüksek miktardaki bağlayıcı malzeme içeren karışımların dona karşı dirençleri daha yüksek çıkmıştır. Karışımlara %10 oranında silis dumanının eklenmesi, SSB karışımlarının hem basınç dayanımını hem de dona karşı direncini artırmıştır. Ancak, taze halde karışımların işlenebilirliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Karışımlarda pomzanın eklenmesi işlenebilirliği artırırken, basınç dayanımı ve dona karşı direnci azaltmıştır (Vahedifard, 2010).

1.2. Agregası

Silindire sıkıştırılmış betonlarda aynı geleneksel betonda olduğu gibi ince ve iri agregası kullanılmaktadır. SSB'lerde kullanılan agregası hacimsel olarak %85'den fazla olduğu için agregası özelliği SSB özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu özellikler agregasının basınç, çekme ve kesme dayanımı, elastik özellikleri, termal özellikleri ve dayanıklılığıdır. Bu yüzden daha yoğun, dayanımı yüksek ve üniform bir SSB elde etmek için daha kaliteli ve uygun gradasyonda agregası seçimi yapılması gerekmektedir (Andriolo, 1989). Kırma ve doğal agregası SSB üretiminde kullanılabilir. Betonun harç ihtiyacını agregası boşluk hacmi ve tane şekli belirlemektedir. SSB'de en büyük tane boyutu, 200 nolu elekten geçen miktar ve kum içeriği gibi özellikler geleneksel betondakine göre bazı farklılıklar göstermektedir. SSB betonlarında agregasının tane şeklinin dayanıma etkisi klasik betonlara göre daha azdır. Bu olay sıkıştırma, taşıma ve sıkıştırma ekipmanlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Alkali-agregası reaksiyonu oluşum potansiyeli SSB'de klasik betonlara göre daha azdır. Bunun nedeni ise SSB'nin düşük çimento ve su içeriğidir (Ağralıoğlu, 2005). Yapılan çalışmalarda yıkanmamış agregası, SSB yapımında başarıyla kullanılmıştır (Hansen and Reinhardt, 1991). Ayrıca SSB'lerde geri kazanılmış agregaların kullanılabilirliği araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir (Debieb ve ark., 2009).

Benzer bir çalışmada, SSB'lerde geri kazanılmış agregaların kullanılabilirliği Courard ve ark. (2010) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla maksimum agregası tane çapı 20 mm ve çimento dozajı 250 kg/m^3 olan SSB numuneleri hazırlanmıştır. Tablo 3'de geri dönüştürülmüş ve doğal agregası ile tasarlanan SSB'nin karışım oranları verilmiştir.

Tablo 3. Karışım oranları (Courard ve ark., 2010).

Karışım tasarımı	SSB (geri dönüştürülmüş agregası)	SSB (Doğal)
Çimento (kg)	250	250
Kum (kg)	735	735
2/20 geri dönüştürülmüş agregası (kg)	1190	0
7/14 kireçtaşı agregası (kg)	0	810
14/20 kireç taşı agregası (kg)	0	420
Su (kg)	95.5	95.5

Hazırlanan numuneler üzerinde 7 ve 28 günlük basınç, donma çözülme ve porozite deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre doğal ve geri kazanılmış betondan elde edilen agregaların kullanıldığı SSB'nin sıkıştırılabilirlik açısından normal SSB'ye benzer olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, doğal agregası kullanılan SSB karışımlarının basınç dayanımı daha yüksek olmuştur.

1.2.1. İri Agregası

SSB'de kullanılan en büyük agregası tane boyutu genellikle 76 mm'dir. Bundan daha büyük tane çaplı agregalar büyük ayrışma problemi yaratacağından, ayrıca daha büyük üretim, taşıma ve serme ekipmanları gerektireceğinden dolayı ekonomik

olmamaktadır. Terbela Barajı'nda kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 220 mm'dir. Japonya'da yapılan silindir ile sıkıştırılmış barajların çoğunda, en büyük agrega tane boyutu 150 mm olup çok sıkı döküm kuralları ve derz iyileştirme yöntemleri ile birlikte uygulanmıştır (Andriolo, 1998).

Agrega boyutları SSB'nin sıkışabilme özelliğini etkilemektedir. SSB katmanlarının serilme yüksekliğinin en büyük tane boyutunun en az 3 katı olması gerekmektedir (Hansen ve Reinhardt, 1991). Büyük tane çaplı betonlarda daha büyük sıkıştırma kuvveti gerekir. 38 mm'den daha büyük tane çaplı SSB'lerde ayrışma ihtimali yüksektir. Ayrışmayı önlemek amacıyla üretim, taşıma ve serme ekipmanlarının doğru seçilmesi gerekmektedir. En büyük tane boyutu seçiminde; yeterli dayanım, bağlanma ve geçirimsizliği sağlamak üzere ayrışmayı da önleme maliyeti göz önüne alınmalıdır (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

Geleneksel betonda olduğu gibi en büyük tane boyutu arttıkça agrega boşluk oranı azalır ve böylece harç miktarı da azalmış olur. Harç ihtiyacının azalmasından dolayı baraj gibi büyük kütleli SSB'lerde hidrasyon ısısından doğabilecek termal çatlakların önüne geçilmiş olacak ve maliyetlerde azalma görülecektir. Ayrıca agrega üretim maliyeti de azalmış olacaktır (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

1.2.2. İnce Agregası

İnce agrega gradasyonu SSB'nin harç miktarını belirler. İnce agreganın gradasyonu, tipi, kalitesi; SSB'nin sıkıştırılması için gerekli enerjiyi ve ayrıca optimum sıkıştırmayı elde edebilmek için silindirlerin geçiş sayısını etkiler. Buna ilaveten, agregalar arasındaki boşlukları dolduracak ve agrega çevresini saracak hamur içeriğini de belirler. Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde kum miktarı genellikle toplam agreganın yüzde 30 ile 50'si arasında olmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde ise kum oranı toplam agreganın %40-55 arasında olabilir. Beydağ Barajı'nda ince agrega oranı toplam agreganın %50'si kadardır. İnce agrega oranı %50 civarında tutularak beton daha kohezif hale getirilip ayrışma oluşma potansiyelini azaltılmaktadır (Andriolo ve Polat, 2006).

1.2.3. Çok İnce (200 No'lu Elekten Geçen) Malzeme

SSB'nin sıkıştırılabilirliğini ve harç içeriğini; içindeki çok ince malzeme miktarı etkilemektedir. SSB içindeki boşlukları doldurduğu için çok ince malzeme oranı arttıkça bağlayıcı ve su miktarı azalmaktadır. Plastik olmayandan düşük plastisiteli seviyeye kadar olan ince malzeme, SSB imalatında başarıyla kullanılmıştır. Plastisite indisi 4 veya daha az olan ince malzemeler inşaat esnasında problem oluşturmamaktadır. Plastisite indisi 5 ile 7 arasında olan ince malzemeler, laboratuvar deneyleri ile yeterince araştırılıp, topaklanma yaratmadığı ve işlenebilirliği düşürmediği takdirde karışımda kullanılabilir. Ancak, plastisite indisi 7'den fazla olan ince malzemenin SSB'de kullanılması istenmemektedir (U.S. Department of the Interior BR, 1987).

Kil toprakları olarak, kil, silt ve normal karıştırma işlemi ile parçalanamayan kum topaklaşmaları kast edilmektedir. Yüksek oranda kil topağı içeren SSB karışımları, yapının zayıflamasına neden olur. Karışım esnasında çimento, kil topraklarının arasına işlemekle birlikte toprak yüzeyini sarar. Buna ilave olarak yüksek oranda kil toprakları, SSB karışımı için gerekli ince malzemeyi azaltır ve karışım oranlarını değiştirir. Agregası ocak tayini esnasında, tabii rutubetteki agreganın 4.76 mm elekten elenerek muhtemel kil topağı oranı tespit edilmelidir (U.S. Department of the Interior BR, 1987). %10 veya daha fazla oranda kil topağı içeriği (ıslak kütle olarak) inşaat esnasında sıkıntı yaratabilir.

Kilim yüksek orandaki su emme kabiliyeti SSB'nin büzülmesine neden olmakta, çatlama riskini arttırmakta ve dolayısıyla basınç dayanımını düşürmektedir. Agreganın su emme kapasitesi, su içeriği, plastisitesi ve toplam ince madde oranındaki değişiklik, karışımın su ihtiyacını, dolayısıyla, sıkıştırılabilirliğini etkiler. Bu da tabakalar arasında kalacak boşluk miktarını ve dayanımını etkilemektedir (Hansen and Reinhardt, 1991).

Yüksek oranda çok ince malzeme içeren karışımlar; karışım esnasında veya doğal olarak kil veya silt toprakları oluşturma eğilimi taşır. SSB karışımında bu tür topraklar yapışmada ve dayanımda zayıflatıcı rol oynamalarında, kabarmalar, düşük dayanıklılık, karıştırmada ve işlemede görülen olumsuzluklar nedeni ile arzu edilmez. Aşırı ince taneler, yüksek oranda su emme özellikleri ile taşıma esnasında taze SSB' de işlenebilirliğini düşürür ve sertleşmiş betonda da donma-çözülme direncini azaltır. Agregası yığını içinde kümeleşen bu topraklar karışım esnasında dağılarak SSB'nin su ihtiyacını arttırabilirler (U.S. Department of the Interior BR, 1987). Genel olarak, 200 nolu elekten geçen malzeme agregalar arasındaki boşlukları dolduracak miktarda olması ve plastisite indisinin 5'ten küçük olması gerekmektedir.

Birçok baraj inşaatında yıkanmamış agrega kullanılmıştır. Düşük dozajlı SSB barajlarında 200 Nolu elekten geçen miktar toplam agrega kütlelerinin %8-10'u kadardır. Optimum miktarı bulabilmek için deneysel çalışmanın yapılması gerekmektedir. İnce malzeme bu oranlarda olması (Hansen and Reinhardt, 1991):

- SSB'nin işlenebilirliğini artırır
- SSB'nin sıkıştırılabilirliğini artırır
- Agregalar arasındaki boşlukları doldurarak SSB'nin dayanımını artırır
- Betonun geçirimsizliğini artırır
- Boşlukları doldurarak SSB'nin su ihtiyacını azaltır
- SSB'nin kohezyonunu arttırarak ayrışmayı azaltır

Beydağ Barajı hazırlık çalışmalarında mevcut dere agregasında yapılan çalışmalarda 200 no'lu elekten geçen miktar %3,5 ile %5 arasında olduğu tespit edilmiştir. 200 No'lu elekten geçen miktarın azlığı sebebiyle daha yüksek oranda puzolanik madde kullanılmıştır. Böylece dere agregası yıkanmadan doğrudan SSB'de kullanılabilmiştir (Andriolo vd., 2006).

1.2.4. Agregası Tane Dağılımı

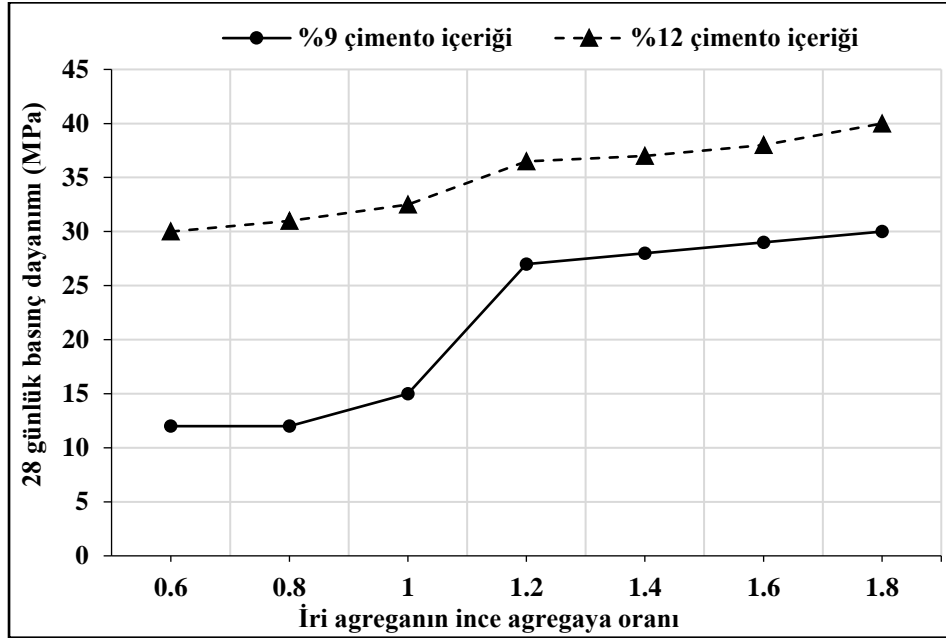
SSB'de kullanılan agreganın tane dağılımı geleneksel betonda olduğu gibi hassas bir şekilde olmakla birlikte, hiçbir sınıflandırma bulunmadan da kullanılabilir. İnce ve iri agreganın tane dağılımı ve karışım oranları SSB özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Agregası tane dağılımı ve oranları iki yaklaşımda farklı özellikler göstermektedir. Bunun başlıca sebepleri; en büyük tane boyutu, ince agrega/200 nolu elekten geçen malzeme oranı ve sınıf sayısı gibi özelliklerinin farklı oluşlarıdır (Andriolo, 1998). İri agreganın

ince agregaya oranının (C/F) SSB'nin taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi Hashemi ve ark. (2018) tarafından incelenmiştir. Karışımlar %9 (204 kg/m³) ve %12 (268 kg/m³) çimento içeriği ile üretilmiştir. Tablo 4'te karışım oranları verilmiştir.

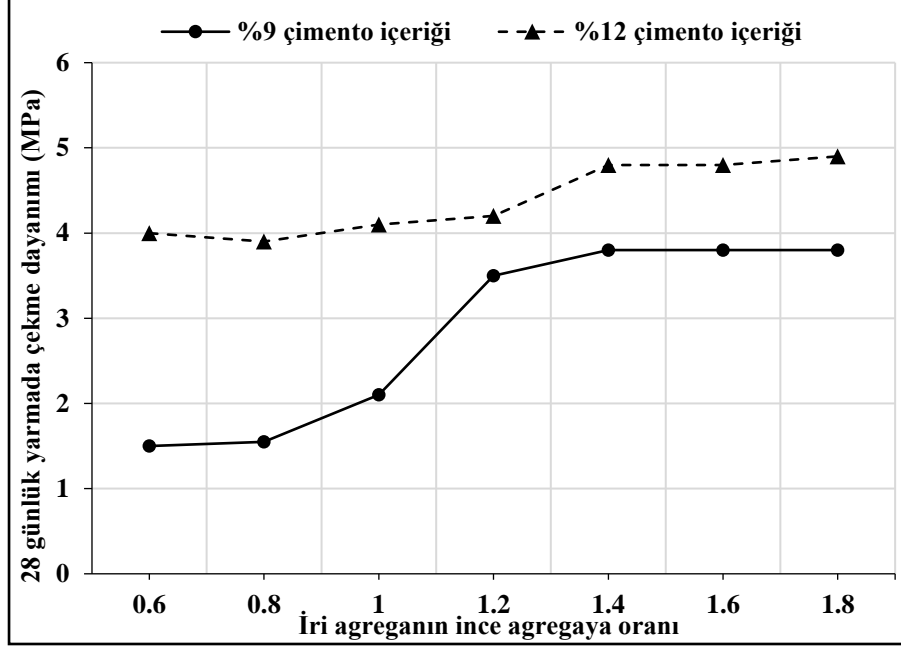
Tablo 4. Karışım oranları ve Vebe zamanı (Hashemi ve ark., 2018).

Karışımlar	Çimento (%)	Çimento (kg/m ³)	Su/çimento	İri agregaya	İnce agregaya	İri agregaya/ince agregaya	Su	Vebe zamanı (s)
A-9-1				773	1288	0.6	85.6	
A-9-2				916	1145	0.8	85.6	10–20
A-9-3				1030	1030	1	85.6	
A-9-4	9	204	0.42	1123	937	1.2	85.6	20–30
A-9-5				1202	859	1.4	85.6	
A-9-6				1268	793	1.6	85.6	30–38
A-9-7				1325	736	1.8	85.6	
B-12-1				738	1230	0.6	112.8	
B-12-2				875	1094	0.8	112.8	10–18
B-12-3				984	984	1	112.8	
B-12-4	12	268	0.42	1074	895	1.2	112.8	18–26
B-12-5				1148	820	1.4	112.8	
B-12-6				1211.5	757	1.6	112.8	26–34
B-12-7				1266	703	1.8	112.8	

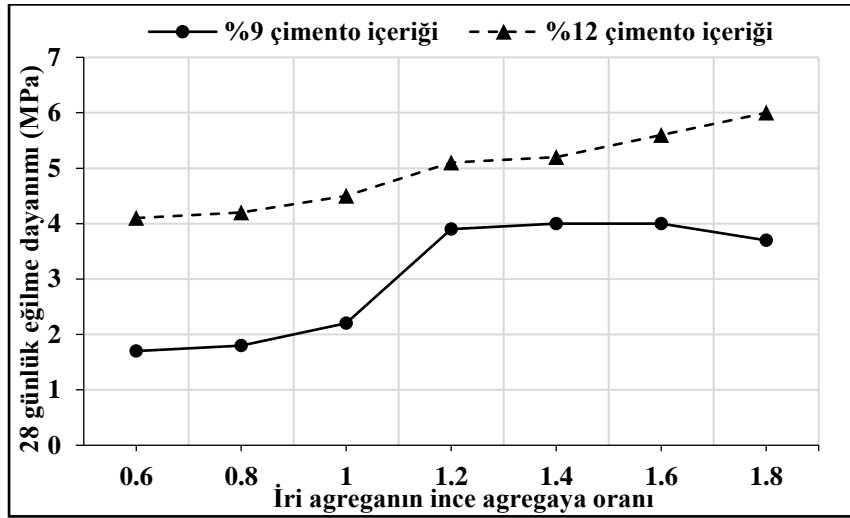
Araştırmada Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, Vebe zamanı ve porozite deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları Şekil 1- 3.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İri agreganın ince agregaya oranı ve 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi (Hashemi ve ark., 2018).



Şekil 2. İri agreganın ince agregaya oranı ve 28 günlük yarmada çekme dayanımı ilişkisi (Hashemi ve ark., 2018).



Şekil 3. İri agreganın ince agregaya oranı ve 28 günlük eğilme dayanımı ilişkisi (Hashemi ve ark., 2018).

Sonuçta, iri agreganın ince agregaya oranı 0,6'dan 1,8'e yükseldiğinde Vebe zamanı 3 kat artmıştır. Vebe zamanı çimento içeriği %9'dan %12'ye yükseldiğinde %12 mertebesinde bir azalma göstermiştir. C/F oranının 0,6'dan 1,2'ye yükseldiğinde porozite önemli ölçüde azalmaktadır. Bu azalma %9 çimento içeren karışımda %60 olurken, %12 çimento içeriğindeki karışımda %38 olduğu görülmüştür.

Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde agrega tane dağılımı geleneksel betonla benzer özellikler taşımaktadır. Genellikle kullanılan en büyük tane boyutu 75 mm olmakla beraber Tamagawa Barajı'nda 150 mm, Upper Stillwater Barajı'nda 50 mm, Beydağ Barajı'nda 50 mm boyutunda agrega kullanılmıştır (Andriolo, 1998).

En büyük tane boyutu 75 mm olarak tasarlanan SSB'lerde agrega, genellikle 4 sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar 0 mm - 4.75 mm, 4.75 mm - 19 mm, 19mm -38 mm, 38 mm-75 mm'dir (Andriolo, 1998).

Özellikle ince agreganın şekli ve tane dağılımı SSB'nin işlenebilirliğini ve yoğunluğunu etkileyen en önemli özelliklerinden birisidir. Bu özellikler ayrıca, SSB'nin dayanımını ve geçirimsizliğini etkilemektedir. SSB'nin işlenebilirliği; üretim, taşıma ve serme ekipmanlarının seçimini de etkilemektedir. SSB'de oluşabilecek ayrışmayı önlemek amacıyla, en büyük tane boyutunu daha düşük seçmek ve ince malzeme oranını arttırmak gerekmektedir.

Zemin yaklaşımı ile tasarlanan SSB'lerde ayrışma oluşma potansiyeli yüksek olduğundan dolayı en büyük tane boyutu genellikle 50 mm olarak seçilmektedir. 200 nolu elekten geçen miktar %0-%15 arasında değişmektedir. Bu nedenle, birçok durumda agregalar yıkanmadan kullanılabilir (Hansen ve Reinhardt, 1991).

1.3. Su

Normal beton yapımında kullanılan su, SSB yapımında da kullanılabilir. Karışım suyunun içilebilir nitelikte olması ve içinde yağ, asit, tuz, alkali, organik madde ve diğer zararlı maddelerin bulunmaması gerekmektedir. Karışımlarda kullanılacak karma suyunun

miktarı kullanılan agreganın sekli ve inceliğine, bağlayıcı tipi ve miktarına bağlıdır (Ağırlioğlu, 2005). En büyük tane boyutu 50 mm olan SSB karışımlarının su miktarı 90-160 kg arasında değişmektedir. Yüksek miktardaki mineral katkıları ve 200 nolu elek altı malzeme su ihtiyacını artırır (Andriolo, 1998).

1.4. Kimyasal Katkılar

Normal betonda kullanılan katkıları SSB’de de kullanılabilir. Daha az su içeriğine ve daha az karıştırma süresine sahip olduğundan, kimyasal katkıların SSB üzerindeki etkisi daha azdır. SSB’de kullanılan katkıları ASTM C494 “Standart Spesification for Chemical Admixtures for Concrete” kriterlerini sağlamalıdır (PCA, 2006). Kimyasal katkı maddeleri SSB’nin işlenebilirliğini arttırmak ve priz süresini geciktirmek amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle sıcak havalarda kimyasal katkı kullanılarak SSB’de oluşabilecek soğuk derzlerin önüne geçilir. SSB karışımlarında kullanılan kimyasal katkıları şunlardır:

- Su azaltıcı katkıları: Bu katkıları kuru kıvamdaki SSB’nin su miktarını değiştirmeden veya azaltarak işlenebilirliğini artırır. Ayrıca bu katkıları su miktarını azaltacağı için daha ekonomik SSB elde edilebilir. Daha önceden yapılan çalışmalar, su azaltıcı katkı dozajının normal betona kıyasla üretici firmanın önerdiği minimum dozajın genellikle 4 katı olduğunu göstermiştir (Gauthier and Marchand, 2005).
- Priz geciktiricileri: SSB’nin daha uzun süre işlenebilir halde tutulabilmesi için kullanılmaktadır. Özellikle baraj inşaatlarında üzerine gelecek diğer SSB tabakasıyla daha iyi bir kaynaşma sağlar.
- Hava sürükleyici katkıları: Donma-çözünme etkisinin görüldüğü soğuk iklimli yerlerde SSB’yi korumak amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda SSB’de kullanılan hava sürükleyici katkı miktarı normal betonlara göre daha yüksek olmaktadır (USACE, 2000).
- Piggott (1999), SSB’nin kabul edilebilir limitlerdeki donma-çözölmeye karşı dayanıklılığının hava sürükleyici katkı kullanmadan da elde edilebildiğini, bu yüzden bu katkıların SSB’lerde yaygın olarak kullanılmadığını belirtmiştir. Ayrıca SSB karışımlarına hava sürükleme işlemi zor olmaktadır (PCA, 2006).

1.5. Lifler

RCC’nin en önemli ve yaygın kullanım alanları, fabrikalar, benzin istasyonları, havaalanları ve yollar gibi dinamik yüklere maruz kalan veya ağır taşıtların geçtiği yerlerdir (Delatte, 2003). Bundan dolayı araştırmacılar tarafından geleneksel betonlarda olduğu gibi SSB’lerin de mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek için farklı tipte lifler kullanılmıştır. Yapılan bir çalışmada SSB karışımlarına polipropilen (PP) lif ilave edilmesinin karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Metreküpde 1 kg PP lif içeren karışımın lif içermeyen karışımlara kıyasla çekme dayanımının yaklaşık %23 mertebesinde arttığı görölmüştür. PP liflerin SSB’de kullanılmasının dayanım açısından tatmin edici sonuçlar verdiğini bulunmuştur (Benouadah ve ark., 2017). Neocleous ve arkadaşları (2011), SSB’lerin statik yükler altındaki eğilme davranışının, çelik liflerin eklenmesiyle artırılacağı göstermiştir.

Lin ve Karadelis (2013) 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 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Zhang ve arkadaşlarının (2018) çalışmalarında, kauçuk parçacıkları ve çelik lif içeren SSB karışımlarının ağırlıkça %25 potasyum asetatın bulunduğu ortamda numunelerin donma-çözölmeye karşı direnci araştırılmıştır. Söz konusu numunelerin kütle kaybı ve bağıl dinamik elastik modülü tespit edilmiştir. Ayrıca, mikro yapı ve boşluk yapıları incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre tüm SSB karışımlarında donma-çözölme çevrimlerinin artmasıyla kütle kaybı artmıştır. Karışımlara kauçuk parçacıkların veya çelik liflerin eklenmesi, donma-çözölme çevrimlerindeki kütle kaybı üzerinde önemli bir etki göstermemiştir. Ancak çelik lif ile kauçuk parçacıklarının birlikte kullanılması SSB karışımlarının donma-çözölme altındaki performansını düşürmüştür. Donma-çözölme çevrimlerinin artmasıyla SSB’lerin dinamik elastisite modülleri olumsuz etkilenmiştir. Mikro yapı incelemelerine göre karışımdaki kauçuk parçacıkları ve çelik lifleri, donma-çözünme çevrimlerinin sebep olduğu çatlakları etkili bir şekilde engelleyememiş ve numunelerin porozitesinde artış gözlenmiştir.

SSB kaplama uygulamalarında kullanılan uygun kıvam ve mekanik performansa sahip makro-sentetik lif içeren SSB tasarımı ile ilgili Rooholamini ve arkadaşları (2018) araştırmalar yapmışlardır. SSB karışımlarında kullanılan sentetik lif, çimento (300–350 kg/m³) ve suyun (120-150 kg/m³) Vebe zamanı, basınç ve eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yüzey metodoloji uygulayarak çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu üç faktör arasındaki etkileşim, SSB karışımına makro-sentetik liflerin eklenmesinin SSB kıvamını (Vebe zamanı) doğrusal olarak olumsuz etkilediği, ancak liflerin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemediğini gösteren istatistiksel bir regresyon modeli kullanılarak tespit edilmiştir. Üç noktalı eğilme deney sonuçları, makro-sentetik lifin, SSB’nin eğilme dayanımını arttırmada ve yüksek eğilme dayanımlı SSB’de çatlama sonrası eğrinin sertleşmesini sağlamada çok önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

2. Sonuçlar

Bu çalışmada, SSB ile ilgili çok sayıda araştırmadan faydalanılmıştır. Bu amaçla, SSB kullanımının çeşitli avantajlarından bahsedilirken, kullanılan malzemelerin özellikleri ve literatürde bunlarla ilgili yapılan çalışmalar açıklanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- SSB imalatında geleneksel beton üretimiyle aynı yöntemler kullanıldığından uygulamada yeni bilgi ve tecrübe olmaksızın üretim gerçekleştirilebilir.
- Geleneksel betonla kıyaslandığında daha düşük miktarda bağlayıcı kullanılması nedeniyle ekonomiktir.
- Düşük çimento miktarı nedeniyle düşük hidrasyon ısı ortaya çıkacağından, özellikle baraj gibi kütle betonlarda karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan çatlak sorununun önüne geçilmiş olur.
- SSB karışımlarına uçucu kül ilave edilmesinin, SSB'nin taze halde işlenebilirliğini, sertleşmiş betonda ileri yaş dayanımını ve durabilite özelliklerini olumlu etkilediği görülmüştür.
- SSB karışımlarda bağlayıcı olarak çimento ile birlikte yüksek fırın cürufu kullanılması SSB'lerin 3 günlük dayanımlarını az da olsa olumsuz etkilerken, sadece çimento içeren karışımlara göre SSB'lerin ileri yaş dayanımlarının yüksek olduğu bildirilmiştir. Ayrıca SSB karışımlarında yüksek fırın cürufunun çimento ile ikame oranının artmasıyla karışımların kuruma büzülme davranışının olumsuz etkilendiği vurgulanmıştır. Bu bağlamda yüksek fırın cürufu kullanılan SSB'lerde kuruma büzülme performansı bakımından önlemlerin alınması gerektiği beyan edilmiştir.
- SSB'lerde silis dumanının kullanılması karışımların dayanım, geçirgenlik, rötre ve donma-çözölmeye karşı performansını artırırken, taze halde işlenebilirlik performansını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.
- SSB karışımlarındaki agrega miktarı, geleneksel betonlara kıyasla hacimsel olarak daha fazla olmasından dolayı agrega özelliklerinin SSB'lerin taze ve sertleşmiş hal özelliklerini doğrudan etkilemediği söylenmiştir. SSB karışımların üretiminde doğal ve kırma kireçtaşının tercih edildiği rapor edilmiştir. SSB'lerde çimento dozajının düşük olmasına bağlı olarak harc fazının azalmasıyla alkali-agrega reaksiyonunun ve termal çatlakların oluşma riskinin geleneksel betona kıyasla daha düşük olduğu vurgulanmıştır.
- SSB karışımlarda işlenebilirliği sağlamak, katmanlar arasında oluşan soğuk derzi azaltmak ve donma-çözölmeye etkileri gibi betona zarar verebilecek çevresel faktörleri en aza indirebilmek için akışkanlaştırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici kimyasal katkıların kullanıldığı rapor edilmiştir.
- Geleneksel beton karışımlarına benzer olarak SSB'lerinde mekanik ve durabilite performanslarını artırmak amacıyla polipropilen ve çelik lif kullanımı önerilmiştir. Söz konusu liflerin SSB'lerin basınç ve eğilme dayanımları üzerine olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TUBİTAK 1001 - Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (Proje numarası: 217M408) ve AYP(MH)-2016/16 nolu Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Altyapı Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Referanslar

- ACI 207 5R-99, (1999). Roller-compacted Mass Concrete. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1, USA 47p.
- Ağralıoğlu, N. (2005). Baraj Planlama ve Tasarımı, Cilt 2, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 259s.
- Andriolo, F.R. (1998). The use of roller compacted concrete. Oficina de textos.
- Andriolo, F.R., & Polat, O. (2006). Beydağ Barajı Gövde İnşaatında Kullanılacak SSKD Agregası Raporu, İzmir, 17p.
- ASTM C494/494M-99a, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- Atış, C. D. (2001). Uçucu Kül içeren Silindirle Sıkıştırılabilen Betonların Özellikleri. Turk J Engin Environ Sci, 503-515.
- Benouadah, A., Beddar, M., & Meddah, A. (2017). Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 9(2), 623-635.
- Cao, C., Sun, W., & Qin, H. (2000). The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. Cement and concrete research, 30(1), 71-75.
- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. Construction and Building Materials, 24(3), 390-395.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. Construction and Building Materials, 23(11), 3382-3387.
- Delatte, N., Amer, N., & Storey, C. (2003). Improved management of RCC pavement technology. UTCA Report, 1231, 54.
- Erdoğan, T.Y. (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 741s.
- Gauthier, P., & Marchand, J. (2005). Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements in Quebec, the Association beton Québec (ABQ), The Cement Association of Canada (CAC), 111p.
- Hansen, K.D., & Reinhardt, W.G. (1991). Roller Compacted Concrete Dams, McGraw-Hill, Inc., 298p.

- Hashemi, M., Shafiqh, P., Karim, M. R. B., & Atis, C. D. (2018). The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 169, 553-566.
- Horzum, U., (2009). Silindirle sıkıştırılmış betonun basınç dayanımının hızlandırılmış deney yöntemleri kullanılarak belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Kiran, Y.M.S., Rao, S.K., & Babuji, Y.K. (2015). Effect of Mineral Admixture on Strength Properties of Roller Compacted Concrete. *International Journal of Scientific Research*, 4(9), 265-267.
- Lin, Y., Karadelis, J. N., & Xu, Y. (2013). A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays. *Construction and Building Materials*, 48, 333-341.
- Ludwig, D., Nanni, A., & Shoenberger, J. E. (1994). Application of roller-compacted concrete (RCC) technology to roadway paving. Final report (No. Tech Rept CPAR-GL-94-1).
- Malcolm Dunstan and Associates, (2019). Roller compacted concrete dams in Turkey. <http://www.rccdams.co.uk/search-results/?country=turkey>
- Marchand, J., Pigeon, M., Boisvert, J., Isabelle, H. L., & Houdusse, O. (1992). Deicer salt scaling resistance of roller-compacted concrete pavements containing fly ash and silica fume. *Special Publication*, 132, 151-178.
- Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*, Third Edition, McGraw-Hill, 659p.
- Mindness, S., Young J.F., & Darwin D. (2003). *Concrete*, Second Edition, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458, 644p.
- Neocleous, K., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K., & Guadagnini, M. (2011). Fibre-reinforced roller-compacted concrete transport pavements. *Proceedings of the ICE-Transport*, 164(TR2), 97-109.
- Özkan, Ö. (2006). Çelikhane ve yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri, *_MO Teknik Dergi*, 257: 3893-3902.
- PCA. (2006). Portland Cement Association, *Production of Roller Compacted Concrete*.
- Pigeon, M., Beaupre, D., Marchand, J., & Reid, E. (1998). Le service d'expertise en matériaux, un outil de transfert technologique. In *Material science and concrete properties. International meeting* (pp. 341-348).
- Piggott, R.W. (1999). *Roller Compacted Concrete Pavements, A Study of Long Term Performance*, Portland Cement Concrete – Research & Development RP366.01P, 62p.
- Postacıoğlu, B. (1986). *Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Cilt-1*.
- Qasrawi, H.Y., Asi, I.M., & Wahhab, H.A.A. (2005). Proportioning RCCP mixes under hot weather conditions for a specified tensile strength. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 267-276.
- Rao, S.K., Sravana, P., & Rao, T.C. (2015). Investigation on pozzolanic effect of mineral admixtures in roller compacted concrete pavement. *i-manager's Journal on Structural Engineering*, 4(2), 28-38.
- Rao, S.K., Sravana, P., & Rao, T.C. (2016). Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of roller compacted concrete containing GGBS. *Construction and Building Materials*, 122, 191-201.
- Reid, E., Marchand, J., & Ouellet, E. (2000). *Mechanical Properties and Frost Durability of Low binder Content RCC. Transportation 2000*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., USA, 11 pages.
- Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. R. M. (2018). Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 159, 517-529.
- Saluja, S., Kaur, K., Goyal, S., & Bhattacharjee, B. (2019). Assessing the effect of GGBS content and aggregate characteristics on drying shrinkage of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 201, 72-80.
- Sun, W., Liu, J., Qin, H., Zhang, Y., Jin, Z., & Qian, M. (1998). Fatigue Performance and Equations of Roller Compacted Concrete with Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 28(2): 309-315.

Tokyay, M., & Erdoğan, K. (2001). *Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar*, TÇMB AR-GE Enstitüsü, Ankara.

Topličić-Ćurčić, G., Grdić, D., Ristić, N., & Grdić, Z. (2015). Properties, materials and durability of rolled compacted concrete for pavements. *Zaštita materijala*, 56(3), 345-353.

TS EN 197-1 “Genel Çimentolar- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standardları Enstitüsü, 2002.

USACE. (2000). *Roller Compacted Concrete*. US Army Corps of Engineers, Engineer Manual, EM 1110-2-2006, 56p.

U.S. Department of the Interior BR. (1987). *Guidelines for Designing and Constructing Roller-compacted Concrete Dams*. ACER Technical Memorandum no.8, U.S. Deptt. of Interior, Bureau of Reclamation, USA, 86p.

Vahedifard, F., Nili, M., & Meehan, C. L. (2010). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2528-2535.

Zdiri, M., Abriak, N. E., Ouezdou, M. B., & Neji, J. (2009). The use of fluvial and marine sediments in the formulation of roller compacted concrete for use in pavements. *Environmental technology*, 30(8), 809-815.

Zhang, W., Gong, S., & Zhang, J. (2018). Effect of rubber particles and steel fibers on frost resistance of roller compacted concrete in potassium acetate solution. *Construction and Building Materials*, 187, 752-759.