

Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının tasarım yöntemleri ve yapılan çalışmalar

Review of research on designing methods and properties of roller compacted concrete mixtures

Ali MARDANI-AGHABAGLOU¹, Sultan Husein BAYQRA², Süleyman ÖZEN³, Muhammet Gökhan ALTUN⁴,
Zia Ahmad FAQIRI⁵, Kambiz RAMYAR⁶

^{1,2,4,5}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.

alimardani@uludag.edu.tr, sultanhuseinbayqra1050@gmail.com, mgaltun@yahoo.com, z.faqiri.1990@gmail.com

³İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
suleyman.ozen@btu.edu.tr

⁶İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
kambiz.ramyar@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 13.12.2018
Kabul Tarihi/Accepted: 09.03.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 09.03.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.93530
Derleme Makalesi/Review Article

Öz

Geleneksel betonlara oranla hızlı üretimi, düşük maliyeti ve dayanıklılığının iyi olması silindirle sıkıştırılmış betonların (SSB) son zamanlarda dünyada yaygın olarak tercih edilmesine neden olmuştur. Söz konusu SSB, fabrikalar, petrol istasyonları, hava limanları, çeşitli endüstriyel zeminler, yollar ve barajlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Normal betona kıyasla çok farklı üretim tekniğine sahip SSB'lerin karışım oranları çeşitli tasarım yöntemlerine göre belirlenmekte ve en çok tercih edilen yöntem olarak maksimum yoğunluk yöntemi dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, SSB'lerin tasarım yöntemlerinden genel olarak bahsedilerek, maksimum yoğunluk yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca maksimum yoğunluk yöntemi ile tasarlanan SSB'ler ile ilgili çalışmalar özetlenerek bundan sonra yapılacak araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Silindirle sıkıştırılmış beton, Yüksek bağlayıcı yöntemi, Silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi, Mühendisler topluluğu yöntemi, Maksimum yoğunluk yöntemi.

Abstract

Roller compacted concrete (RCC) has been widely preferred in the world recently due to its rapid production rate, low cost and good durability compared to those of the traditional concrete. Having different production techniques from conventional concrete, RCC is used in many areas such as factories, oil stations, airports, industrial floor coverings, roads and dams. There are several methods for the proportioning of RCC mixtures, among which maximum density method is the most preferred one. In this study, the methods of designing of RCC mixtures are explained with an emphasis on the maximum density method. In addition, the previous studies on the RCC mixtures designed with the maximum density method are reviewed and suggestions are made for the future researches.

Keywords: Roller compacted concrete, High paste method, Roller compacted dam method, Corps of engineering method, Maximum density method.

1 Giriş

Taze halde iken sıfır çökme değerine sahip, toprak ve kaya dolgu elemanları ile serilen ve sıkıştırılan SSB, hızlı ve daha ekonomik şekilde inşa edilecek barajların tasarımları için yapılan çalışmaların sonucunda geliştirilmiştir [1]. SSB'lerin geleneksel betonlara göre hızlı üretim tekniği, maliyetinin düşük olması ve dayanıklılığının iyi 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 [2].

Bu tip betonlar taze halde iken kıvamı çok düşük ve sıfır çökme değerine sahiptirler [3]. Ancak geleneksel betona göre vibratörle sıkıştırılamayacak kadar rijit ve kurudurlar [4]. Bundan dolayı SSB'lerde karıştırma ve yerleştirme işlemlerinden sonra yüzeyden çok güçlü sıkıştırma işleminin uygulanmasına ihtiyaç duyulmaktadır [5].

SSB'nin serim işlemi tamamlandıktan sonra SSB tabakasında maksimum sıklığı elde etmek için serim sonrası 10 dk. içinde sıkıştırma işlemi yoğunlukla titreşimli silindirler ile yapılmaktadır. Beton tesisinde karışım üretimi sonrası 45 dk. geçmeden sıkıştırma işlemi sonlandırılmalıdır. Sıcak

havalarda, SSB üretimi ve sahada sıkıştırma bitışı arasında geçen sürenin 35 dk. aşmaması önerilmektedir [6]-[10].

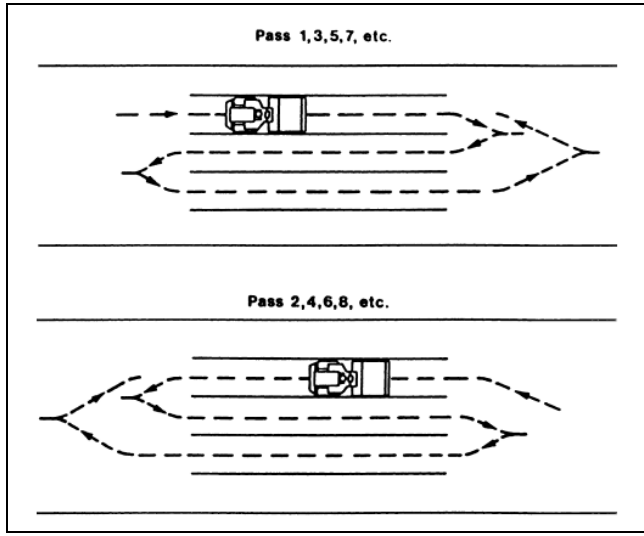
SSB'ler uygulama aşamasında kendiliğinden tahrikli, tek veya çift tamburlu ve titreşimli silindirler ile sıkıştırma uygulaması gerçekleştirilmektedir. Söz konusu silindirler yüksek frekanslı olmalıdır. Ayrıca ağırlığı 10, 15 veya 20 ton olan silindirler kullanılmalıdır (Şekil 1a). Prefabrik düşey yüzey elemanları gibi gerekli sıkıştırmanın yapılamadığı bölgelerde SSB'lerin onaylanmış el kumandalı sıkıştırma ekipmanı ile sıkıştırma işlemleri yapılmaktadır (Şekil 1b). Sıkıştırılmış tabaka kalınlığı deneme dökümü sürecinde tespit edilmektedir.



(a): Silindir. (b): El kampaktörü [11].
Şekil 1. SSB sıkıştırma ekipmanları.

Figure 1. RCC compaction equipment. (a): Roller, (b): Hand compactor

Kendiliğinden tahrikli titreşimli silindirlerin işletme frekansı en az 1800-3200 devir/dk. amplitute ise 0.4-0.8 mm arasında olmalı, silindir tamburunun her bir metresi 6000-8000 kg arasında dinamik kuvvet uygulamalı ve ağırlığı 10 tondan fazla olmalıdır [12]. Ayrıca, söz konusu silindir saatte 2.5 km/sa. hızı aşmamalıdır. El kumandalı sıkıştırma ekipmanları ise en az 850 kg kuvvet uygulayabilmelidir. İlk sıkıştırma 10 tonluk silindir ile en az 4 geçiş ile yapılmalıdır. Daha sonrasında 20-30 tonluk lastik tekerli silindir ile 2 veya daha fazla geçiş yapılmalıdır [13]. Baraj inşaatlarında ACI 309.5R'ye göre silindirlerin önerilen pas düzeni ve sıralaması Şekil 2'de gösterilmiştir. Ayrıca istenilen sıkışma miktarının %98 sıklık değerinde olması beklenilmektedir.



Şekil 2. Silindirlerin önerilen pas düzeni ve sıralaması [14].

Figure 2. Recommended passing and sequencing of the rollers [14].

Daha fazla sıkıştırma ve geçiş işlemlerinin yapılması yol kesitinin üst kısmında yoğunluğun azalmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda nükleer yoğunluk ölçme cihazı gibi tahribatsız yöntemler kullanılarak belirli aralıklarda yoğunluk tespiti yapılmalıdır (Şekil 3).



Şekil 3. Yol kesitinde yoğunluk ölçümünde kullanılan nükleer cihaz [10].

Figure 3. Nuclear device used for density measurement in road section [10].

SSB'lerin en yaygın ve en önemli kullanım alanları fabrikalar, petrol istasyonları, hava limanları ve yollardır (Şekil 4). Söz konusu uygulamalarda beton dinamik yüklere ve çok ağır vasıtalarından kaynaklı yüklere maruz kalmaktadır [15]. SSB'ler aşırı basınç altında meydana gelen çatlak problemlerini çözmek ve çok sıcak havalarda uygulamalar için asfalt yollara bir alternatif olarak Qasravi ve diğ. [16] tarafından önerilmiştir.



Şekil 4. SSB yöntemi ile yapılan yol örneği [17],[18].

Figure 4. The road work made using the RCC method [17], [18].

SSB'lerin daha ekonomik olması, üretiminin asfalt malzemeye kıyasla daha hızlı ve daha kolay yapılması, durabilite ve dayanım açısından geleneksel betona benzer veya daha üstün performans göstermesi nedeni ile günümüzde ağır endüstri zeminlerinde de kullanımı artmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Endüstriyel zeminlerde SSB uygulaması [17],[18].

Figure 5. Application of RCC on industrial floors [17],[18].

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 (Şekil 6) yaygın olarak tercih edilmektedir.



Şekil 6. Türkiye'deki SSB olarak yapılan Karakaya Barajı [19].

Figure 6. Karakaya Dam made as RCC in Turkey [19].

Son yıllarda kullanımı giderek artan SSB'lerin geleneksel betonlara kıyasla bazı olumlu ve olumsuz özellikleri mevcuttur. Söz konusu betonların avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır [20]-[22]:

Avantajları:

- Hızlı inşa edilebilme imkânı,
- Düşük maliyette yapılması (beton barajlara göre: %25-40 tasarruf, kaya dolgu barajlara göre: %0-25 tasarruf, çift eğrilikli beton barajlara göre: %10-15 tasarruf, Ancak, toprak dolgu barajlara göre: %0-20 fazla),
- Dolu savak inşasında daha basit ve ekonomik çözüm olması, (özellikle basamak tipi dolu savaklar),
- Kaya dolgu ve toprak dolgu barajlara göre daha dar en kesit ve daha küçük hacme sahip olması,
- Erozyon ve aşınmaya karşı daha dirençli olması,
- Üretiminde uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. gibi atık kabul edilen malzemelerin yüksek oranda değerlendirilmesi.

Dezavantajları:

- Uygun temel yeri seçimi,
- İnşaat esnasında çok iyi bir zaman planlaması gereksinimi,
- Üretimde devamlılık zorunluluğu,
- Bağlayıcı madde (çimento, uçucu kül vs.) temini ve iletimindeki güçlükler.

SSB'lerin dezavantajlarına ilaveten üretimde yapılan birçok hatadan dolayı uygulamada bazı sıkıntılar oluşabilmektedir. Bu problemlerin önüne geçmek için SSB'nin taşıma, serme, sıkıştırma, kütleme ve derz oluşturma işlerinin uygun ve dikkatli bir şekilde yapılması gerekir. Örneğin tesis mümkün olduğunca uygulama alanına yakın yerleştirilmeli, hiçbir durumda tesis ile serici arasındaki taşıma süresi 15 dk.'yı

aşmamalıdır. Sıkıştırma, serme işleminden sonra 10 dk. içinde başlamalı ve tesiste karıştırma yapıldığı andan itibaren 45 dk. geçmeden tamamlanmalıdır. Sıcak havalarda ise, karıştırmanın bitişi ile sıkıştırmanın bitişi arasında geçen süre 35 dk. aşmamalıdır. Ayrıca karışımın nem oranı kontrol edilmelidir. Karışımın düzenli olarak serilmesi ve sıkıştırılması bakımından nem oranının kontrol altına alınması çok önemlidir [23].

Literatürde SSB'lerin tasarımına yönelik birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Ancak ACI 207.5R-99'a göre söz konusu yöntemler; yüksek bağlayıcı yöntemi, silindire sıkıştırılmış baraj yöntemi, mühendisler topluluğu yöntemi ve maksimum yoğunluk yöntemi olmak üzere 4 farklı gruba ayrılmıştır. Bu çalışmada, ACI 207.5R-99'a göre sınıflandırılan SSB tasarım yöntemlerinden kısaca bahsedilerek SSB üretiminde en çok kullanılan maksimum yoğunluk yöntemi detaylı olarak açıklanmış ve konu ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

2 Tasarım yöntemleri

2.1 Yüksek bağlayıcı yöntemi (High Paste Method)

Yüksek bağlayıcı yöntemi, "United States Bureau of Reclamation" tarafından Upper Stillwater Barajı tasarımı sırasında geliştirilmiştir. Bu yöntemde göre tasarlanan karışımlar, genellikle yüksek oranda bağlayıcı malzeme, yüksek miktarda puzolan, temiz ve iyi bir gradasyona sahip agregalar içermeli ve karışımın işlenebilirliğinin yüksek olması gerekmektedir. Bilindiği gibi SSB'ler genelde katmanlar halinde uygulanmaktadır. Söz konusu bu yöntemde ana amaç, SSB'lerin katmanlar arası bağlantı bölgelerinde yani derzlerde bağ dayanımının (joint bond strength) yüksek olması ve buna bağlı olarak derz geçirimsizliğinin (joint permeability) düşük olmasıdır. Bundan dolayı bahsi geçen bu özellikleri iyileştirmek amacıyla karışımlarda hamur fazının yeterli miktarda olması gerekmektedir. Ancak, karışımda bağlayıcı malzemenin fazla kullanılmasına bağlı olarak sıcaklık artışından kaynaklı oluşabilecek hacimsel değişimler kontrol altına alınmalıdır. Bunu sağlamak amacıyla çimentonun bir bölümü yerine farklı puzolanik malzemeler ikame edilmektedir [22].

SSB karışımlarını sıkıştırma işlemi sırasında maksimum yoğunlukta olması için taneler arasındaki boşlukların yeterli miktarda hamur ile doldurulması gerekmektedir. Yeterli miktarda hamur içermeyen karışımlarda sıkıştırmaya rağmen artakalan boşluklar, dayanımın azalmasına ve geçirgenliğin artmasına neden olabilir.

Bu yöntemde SSB karışımlarının tasarlanması 3 farklı aşamadan oluşmaktadır;

- Belirli bir sıkıştırma enerjisi altında minimum boşluk hacmi içeren agrega gradasyonunun seçilmesi,
- İstenilen işlenebilirliği elde etmek için agregalar arasında kalan boşluk hacmi dikkate alınarak optimum hamur hacminin belirlenmesi,
- İstenilen dayanımı sağlamak için hamurun su/bağlayıcı oranı ile çimento ve puzolanik malzeme içeriğinin belirlenmesi [24].

Bu yöntemde, belirli bir dayanım değeri ve dayanım kazanma hızı için su/çimento ve puzolan/çimento oranları belirlenir. SSB karışımlarında 10-30 sn. arasında Vebe süresi sağlanacak şekilde su, ince agrega ve iri agrega oranlarının optimum değerleri tespit edilir. Daha sonra birim hacimdeki karışımda

bulunan agregası, çimento, puzolan ve suyun hacimleri dikkate alınarak karışımın hava içeriği hesaplanır [1].

Yüksek bağlayıcı ve silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi (Japon metodu) SSB'lerde beton yaklaşımıyla tasarlanmaktadır. Upper Stillwater Barajı, Elk Creek Barajı ve Japonya'nın tüm barajları bu yöntemle inşa edilmiştir. Upper Still Water barajı yapımında SSB karışımlarında kullanılan malzeme miktarları Tablo 1'de verilmiştir [1].

Tablo 1. Upper Stillwater SSB Barajının karışım oranları [1].

Table 1. Mix proportions of Upper Stillwater RCC Dam [1].

Malzemeler	Miktar
Su (kg/m ³)	94
Çimento (kg/m ³)	79
Mineral Katkı (kg/m ³)	173
İnce Agregası (kg/m ³)	729
İri Agregası (kg/m ³)	1292
Maksimum agregası tanesi (mm)	51
Hava (%)	1.5
Su Azaltıcı Katkı (cm ³ /m ³)	7
Beton Yoğunluğu (kg/m ³)	2367

2.2 Silindirle sıkıştırılmış baraj/Japon yöntemi (Roller Compacted Dam Method)

Silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi Japon mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde bağlayıcı miktarı genellikle 120 ile 140 kg/m³ arasında değişmekte olup çimento ağırlığının %30'u kadar uçucu kül ikame edilebileceği araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir [22],[25].

Bu yöntemde SSB karışımlarının tasarlanması için 2 kriterin sağlanması gerekmektedir:

- Çimento dozajı, istenen dayanımı sağlamak koşuluyla mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Buna ilaveten hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla mineral katkı olarak uçucu kül kullanılmalıdır.
- Ayrışmayı azaltmak ve silindirle sıkıştırmanın daha etkili olabilmesi için kum/agregası oranı geleneksel kütle betonuna oranla daha yüksek olmalıdır.

Tablo 2'de baraj metoduyla tasarlanan bazı baraj betonlarının karışım oranları verilmektedir [26].

Bu yöntemde, Vebe deneyi aparatına benzer özellikte olan bir kıvam ölçer kullanılmakta ve karışımın yüzeyinde harç gözlenene kadar vibrasyon işlemine devam edilmektedir. Silindir ile sıkıştırılmış baraj yöntemi tasarımında ve yapımında kullanılan kıvam test cihazlarının farklı olmasından dolayı bu metod Japonya dışında pek kullanılmamakta olup çoğunlukla Japonya'da tercih edilen bir yöntemdir. Bazı kaynaklarda Japon yöntemi olarak da adlandırılmaktadır [1].

2.3 Mühendisler topluluğu yöntemi (Corps of Engineers Method)

Mühendisler topluluğu yöntemi su/çimento oranı ve dayanım ilişkileri üzerine tasarlanmış bir yöntemdir. Karışımındaki su ihtiyacı ve maksimum agregası tane boyutu istenen Vebe

zamanına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca karışımındaki ince agregası miktarının toplam agregası hacmine oranı, maksimum agregası tane boyutu ve iri agregası özelliklerine bağlıdır. Birçok SSB barajında 1 senelik beton dayanımı, tasarım dayanımı olarak kabul edilmektedir. Ancak 90 veya 180 günlük dayanımlar baz alınarak 1 yıllık dayanım tahmin edilebilir ve tasarım buna göre gerçekleştirilebilir.

Geleneksel betonda olduğu gibi, SSB karışımlarında kullanılan agregalar tip ve tane dağılımı bakımından değerlendirilmektedir. SSB karışımlar için Mühendisler topluluğu yönteminde önerilen tipik nominal maksimum agregası tane boyutu 75 mm olarak önerilmektedir. Bununla birlikte, agregası tane dağılımı geleneksel kütle betonu için kullanılanlardan önemli ölçüde farklı olabilir. Japonya ve Tarbela Barajı'nda daha büyük boyutlu agregalar başarılı bir şekilde kullanılsa da, 75 mm'den daha büyük olan agregaların, Mühendisler Topluluğu Yöntemi ile yapılan SSB'lerde teknik veya ekonomik nedenlerden nadiren kullanılmaktadır. Daha büyük agregaların kullanımı, SSB'nin taşınması ve yerleştirilmesi sırasında ayrışma olasılığını önemli mertebelerde artırmaktadır. Ancak söz konusu büyük çaplı agregalar SSB maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu tip karışımlarda beton dökümü gerçekleştirilmeden önce laboratuvar ön deneyleri yapılarak ayrışmayı önlemek için önlemler alınmalıdır. İri agregası tane dağılım limitleri, geleneksel betonda kullanılan agregalara uygun olmalıdır. Tablo 3'te gösterilen iri agregası gradasyonlarının SSB karışımlarına uygun olduğu bildirilmiştir [7].

Silindirle sıkıştırılmış kütle beton karışımlarında kullanılan ince agregada az miktarda 600-µm'den daha küçük tanelerin bulunması gerekmektedir. SSB'lerde ince agregası kullanımı, öncelikli olarak matris içindeki boşlukları azaltmak, karışımın kusma eğilimini azaltmak ve genellikle daha kohezif ve işlenebilirliği yüksek bir karışım elde etmek içindir. Uçucu kül, doğal puzolan veya yüksek fırın cürufunun tamamlayıcı ince malzeme olarak kullanılması, SSB karışımlarının su ihtiyacı ve çimento içeriğini azaltma ve yüksek nihai dayanım gibi açılardan fayda sağlamaktadır.

SSB karışımlarında ince agregası, Tablo 4'te gösterilen gradasyon sınırları dikkate alınarak kullanılabilir. Bu agregaların incelik modülünün 2.10 ile 2.75 arasında olması tavsiye edilmektedir. Ayrıca toplam agregası hacminin yüzdesi olarak karışımlarda kullanılan ince agregası içerikleri yaklaşık olarak Tablo 4'te verilmiştir.

Yaklaşık karışım suyu ve hava boşluğu içeriği (hava sürüklenmemiş SSB için), farklı tane boyutuna sahip karışımlar için Tablo 5'te gösterilmiştir. Gösterilen su içerikleri hem doğal hem de yapay agregası ile yapılan yapısal ve kütle beton karışımlarından elde edilen ortalama değerlerdir. Ayrıca, Tablo 5'te, çeşitli su içeriğine karşılık gelen modifiye edilmiş Vebe zamanlarının yaklaşık aralıkları ve değişen maksimum agregası boyutlarına sahip olan SSB karışımları için yaklaşık harç içerikleri bulunmaktadır.

2.4 Maksimum yoğunluk yöntemi (Maximum Density Method)

Maksimum yoğunluk yöntemi Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilmiş bir yöntemdir. Literatürde zemin yaklaşımı olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntem, maksimum tane çapının

daha küçük ve bağlayıcı dozajının daha yüksek olduğu SSB karışımları için uygundur [1]. Bundan dolayı SSB ile imal edilen yollarda yaygın olarak kullanılan bir metottur.

Bu yöntemle yapılan uygulamalarda, farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip karışımlar oluşturulur. Bağlayıcı malzeme miktarı genellikle 120 kg/m³'ten daha az olmakla birlikte toplam kuru ağırlığın %12-17'si arasında değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca mineral katkı olarak çimento ağırlığının %40'ı kadar uçucu kül ikame edilebilir. Geleneksel beton üretiminde tasarım faktörü olan su/bağlayıcı oranı SSB

karışımlarında başlıca tasarım faktörü değildir. SSB karışımlarındaki su miktarı karışımlarının maksimum yoğunluğuna, proje kriterlerine ve karışımda kullanılan kimyasal katkıya göre değişiklik göstermektedir [27].

SSB'lerin tasarımında en fazla tercih edilen yöntem olan maksimum yoğunluk yönteminden aşağıda daha detaylı olarak bahsedilmiştir. US Army Corps of Engineers [7], tarafından pek çok SSB yollarında kullanılmış olan örnek karışım dizaynları Tablo 6'de gösterilmiştir [15].

Tablo 2. Baraj yöntemiyle tasarlanan SSB'lerin karışım oranı (kg/m³) [26].

Table 2. The Mix proportions of RCC designed by the dam method (kg/m³) [26].

Baraj	Maksimum agrega boyutu	Su	Ç+UK*	UK/UK+Ç* (%)	Kum	K/A Oranı**
Simajigawa	80	105	120	30	752	34
Ohkawa	80	102	120	20	686	32
Tamagawa	150	95	130	30	657	30
Kazunogawa	120	90	120	30	632	28
Kasegawa	80	99	120	30	644	29

*Ç: Çimento; UK: Uçucu kül, **: Kum/Toplam agrega oranı.

Tablo 3. İdeal iri agrega tane dağılımı [7].

Table 3. Grain size distribution of ideal coarse aggregate [7].

Elek Açıklığı	Geçen Yüzde		
	4.75- 75 mm	4.75- 50 mm	4.75- 19 mm
75 mm (3 in)	100		
63 mm (2-1/2 in)	88		
50 mm (2 in)	76	100	
37.5 mm (1-1/2 in)	61	81	
25.0 mm (1 in)	44	58	
19.0 mm (3/4 in)	33	44	100
12.5 mm (1/2 in)	21	28	63
9.5 mm (3/8 in)	14	18	41
4.75 mm (No:4)			

Tablo 4. İnce Agrega Gradasyon Limiti [7].

Table 4. Gradation Limit of fine Aggregate [7].

Elek Açıklığı	Geçen (%)
9.5 mm (3/8 in.)	100
4.75 mm (No. 4)	95-100
2.36 mm (No. 8)	75-95
1.18 mm (No. 16)	55-80
600 µm (No. 30)	35-60
300 µm (No. 50)	24-40
150 µm (No. 100)	12-28
75 µm (No. 200)	6-18

Tablo 5. Farklı maksimum agrega büyüklüğü için su gereksinimi, kum miktarı, hamur/harç oranı ve hava içeriği.

Table 5. Water requirement, sand content, paste/mortar ratio and air content for different maximum aggregate sizes.

İçerik		Ortalama Maksimum Agrega ^a büyüklüğü					
		19 mm		50 mm		75 mm	
		Ort.	Aralık	Ort.	Aralık	Ort.	Aralık
Su miktarı ^b kg/m ³	Vebe< 30 s	150	133-181	122	107-140	107	85-128
	Vebe> 30 s	134	110-154	119	104-125	100	97-112
Kum miktarı (toplam agrega hacminin %'si)	Köşeli kırma agrega	55	49-59	43	32-39	34	29-35
	Yuvarlak doğal agrega	43	38-45	41	35-45	31	27-34
Harç miktarı (hacimce %)	Köşeli kırma agrega	70	63-73	55	43-67	45	39-50
	Yuvarlak doğal agrega	55	53-57	51	47-59	43	39-48
Hacimce hamur/harç oranı v _p /v _m	(Şerbet/harç)	0.41	0.27-0.55	0.41	0.31-0.56	0.44	0.33-0.59
37.5 mm altında kalan kısmının hava içeriği (%)		1.5	0.1-4.2	1.1	0.2-4.1	1.1	0.5-3.3

a: Deneysel SSB karışım oranları çalışmalarında su, kum, harç ve hava miktarı tahmini için kullanılacak olan değerler.

b: Düşük bağlayıcı malzeme veya ince agrega oranına sahip karışımlar ve yuvarlak agregalar için alt sınır değerleri kullanılmalıdır.

Tablo 6. 1 m³ SSB yolu için karışım tasarım örnekleri [7].

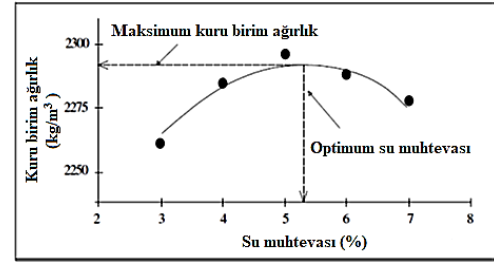
Table 6. Mix design examples for 1 m³ RCC road [7].

Yer	Tip-1 Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (kg)	Su/Bağlayıcı Oranı	Kaba Agrega (kg)	İnce Agrega (kg)	Çimento % si (Ağırlıkça)	Su % si (Ağırlıkça)
Austin, TX	154	154	108	0.35	955	955	6.6	4.6
Ft. Campbell, KY	237	126	122	0.34	1059	869	9.8	5.0
Ft. Drum, NY	267	89	125	0.35	1377	586	10.9	5.1
Spring Hill, TN	237	89	114	0.35	1121	920	9.6	4.6
Ft. Hood, TX	174	87	104	0.40	1190	990	6.8	4.1

Bu yaklaşımda, ilk olarak SSB karışımının hacimce %90'ını iri ve ince agregalar oluşturduğundan yoğun, iyi gradasyonlu ve Tablo 6'de belirtilen aralıklara uygun agrega seçilmektedir [28]. SSB karışım oranları su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık ilişkisi açısından incelenmektedir [22]. Bu bağlamda betonun en büyük kuru birim hacim ağırlığını belirlemek amacıyla taze betona belirli sıkıştırma enerjisi uygulayarak su içeriğinin belirlenmesi gerekmektedir [6]. Optimum su muhtevasına karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığı hesaplamak için standart Proktor deneyi [29] veya Modifiye Proktor deneyi [30] uygulanmaktadır. İki deney arasındaki fark numunelere uygulanan sıkıştırma enerjisi miktarıdır. Her iki deney metodu zemin mekaniği için geliştirilmiş yöntemlerdir. Zeminin yoğunluğu yüksek ve kuru olması durumunda, zeminin yeterli miktarda olmamasından dolayı kalıba tanelerin boşluksuz yerleşmesi mümkün olmamaktadır. Çok fazla nem olması durumunda ise sıkıştırma esnasında aşırı nem taneleri dışarı atacaktır. Ancak, optimum nem durumunda, zemindeki su, zemin taneleri arasında kayganlığı artırarak sıkıştırılma işlemi sırasında tanelerin daha sıkı biçimde düzenlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu durumda maksimum yoğunluk elde edilmektedir [28]. Maksimum yoğunluk yöntemine göre hazırlanan SSB karışımların üretiminde zemin numunesine benzer işlemler yapılmaktadır. Deney numunesi Modifiye Proktor deneyinde 2700 kJ/m³ enerjiyle sıkıştırılırken, standart Proktor deneyinde 600 kJ/m³ enerjiyle sıkıştırılmaktadır. Sahadaki SSB uygulamalarında büyük titreşimli çelik silindir araçlar ile sıkıştırma işlemleri yapıldığından laboratuvar çalışmalarında Modifiye Proktor deneyinin SSB üretimi için daha uygun olduğu düşünülmektedir. Modifiye Proktor deneyi sonucu elde edilen tipik kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 7'de gösterilmiştir [28].

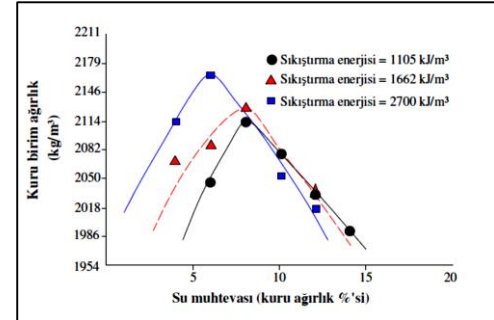
SSB'nin farklı sıkıştırma enerjisi sonucu elde edilen kuru birim ağırlık-su muhtevası ilişkisi Şekil 8'de gösterilmiştir [1]. Şekil 8'te de görüldüğü gibi, maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su muhtevası sıkıştırma enerjisine göre değişiklik göstermektedir. Sıkıştırma enerjisinin artmasıyla maksimum kuru birim ağırlık artmakta, optimum su muhtevası azalmaktadır. Bu sebepten numunelerin benzer özellikte hazırlanması için bu yöntemle üretilen SSB karışımlarda sıkıştırma enerjisi tüm karışımlarda sabit tutulmalıdır.

Karışımın optimum su muhtevasının belirlenmesi için 5 farklı su/bağlayıcı oranına sahip SSB karışımları hazırlanır. Her bir karışım 150x300 mm boyutlarında silindirik kalıplara üç ayrı tabaka halinde yerleştirilir. Her bir tabakada ASTM C1435 [31] standardına göre sıkıştırma işlemi uygulanır.



Şekil 7. SSB karışımların tipik kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası eğrisi [28].

Figure 7. Typical dry unit weight-water content curve of RCC mixtures [28].



Şekil 8. Su muhtevası ve sıkıştırma enerjisinin kuru birim ağırlık üzerine etkisi [1].

Figure 8. The effect of water content and compaction energy on dry unit weight [1].

Karışımların optimum su muhtevasını belirlemek amacıyla yukarıda belirtilen yöntemle sıkıştırılmış karışımlardan 600 g beton numunesi alınır. Alınan örnek 105 °C sıcaklıktaki etüvde değişmeyen ağırlığa gelene kadar kurutulur. Böylece numunenin kuru ağırlığı belirlenir. Her karışımın su muhtevası Denklem 1'e göre hesaplanır.

$$w = \frac{m_{islak} - m_{kuru}}{m_{kuru}} \times 100 \quad (1)$$

Burada;

- m_{islak} : Islak beton numunenin kütesini (600 g),
- m_{kuru} : Değişmez kütleyle ulaşan beton örneği kütesini (g),
- w : Su muhtevasını (%) ifade etmektedir.

Yukarıda belirtilen yöntemle sıkıştırılma işlemi uygulanarak 150x300 mm'lik silindirik kalıba yerleştirilen taze betonun ağırlığı ölçülür (m). Numune ağırlığının kalıp hacmine (v)

bölünmesiyle karışımın ıslak birim hacim ağırlığı elde edilir. Denklem 2'ye göre karışımların kuru birim hacim ağırlığı hesaplanır.

$$y_{kuru} = \frac{m}{1 + w} \quad (2)$$

Burada; y_{kuru} numunenin kuru birim hacim ağırlığını ifade etmektedir. Farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip karışımların su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri elde edilir. Bu değerler noktalar halinde grafik üzerine işlenerek noktalardan geçen en uygun eğri çizilir. O karışımın, kuru birim hacim ağırlık- su muhtevası eğrisi elde edilir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığına denk gelen optimum su muhtevası tespit edilir. Söz konusu karışımın su/bağlayıcı oranı bu değere göre belirlenir. Karışımın kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası eğrisinin maksimum noktasının sağında ve solundaki değerlere ait karışımların su/bağlayıcı oranları dikkate alınarak enterpolasyon yöntemiyle maksimum kuru birim hacim ağırlığına sahip karışımın su/bağlayıcı oranı hesaplanır. Diğer araştırmacılar tarafından maksimum yoğunluk yöntemine göre hazırlanan SSB karışımlarına ait bazı veriler Tablo 7'de özetlenmiştir.

Lin ve diğ. [37] çalışmalarında SSB tasarımlarında standart Proktor, modifiye Proktor sıkıştırma metodunu ve modifiye Vebe metodunu araştırmışlardır. Bu çalışmada durabilite açısından üstün performansa sahip SSB seçimi amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlarına göre benzer karışımlarda modifiye Proktor (MP) metodu ile üretilen SSB'lerde modifiye Vebe (MV) metoduna göre daha düşük su muhtevasına sahip karışımlar elde edilebilmiştir. Modifiye Proktor ve modifiye Vebe metodları ile daha kuru karışım elde edilebilirken, Standart Proktor (SP) sıkıştırma metodu ile daha düşük sıkıştırma kuvvetine ihtiyaç duyulmuştur. MP ve MV metodları ile daha yüksek sıkıştırma enerjisi sarf edilirken, SP ile sıkıştırma işleminde daha düşük enerji sarf edilmiştir. Optimum sıkıştırma kuvvetinin MP ve SP arasında olduğu tespit edilmiştir.

Chhorn ve diğ. [44] çalışmalarında SSB kaplama yaparak bir arazi test uygulaması gerçekleştirmiştir. SSB kaplaması Güney Kore'de toplamda 5 bölümden oluşacak şekilde uygulanmıştır. Kaplamanın uzunluğu 580 m, genişliği 5 m ve kalınlığı 20 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada, yapım ekipmanlarının performansı, uygulama kolaylığı ve agreganın maksimum tane boyutunun (13 ve 19 mm) etkisi irdelenmiştir.

Tablo 7. Maksimum yoğunluk yöntemiyle yapılan çalışmalar.

Table 7. Studies applied with the maximum density method.

Çalışma	Çimento Dozajı (kg/m ³)	Maksimum Agregatane Boyutu (mm)	Agrega veya lif türü	Mineral Katkı	Gerçekleştirilen Deneyler
Cao ve diğ. [32]	300	25	Kireçtaşı	Uçucu kül	Basınç, eğilme
Üte ve Yazıcı [27]	300	25	Kireçtaşı, polipropilen lif	Uçucu kül	Basınç, eğilme, yarmada çekme, darbe
Courard ve diğ. [33]	175-250	20	GK	-	Basınç
Vahedifard [34]	235-275	19	Kireçtaşı+ ponza	Silis Dumanı	Basınç, donma-çözünme
Yerramala ve diğ. [35]	50-260	20	Kireçtaşı	Uçucu kül	Geçirgenlik, su emme, klor iyon geçirgenliği
Madhkhan ve diğ. [36]	192-274	19	Kireçtaşı, çelik lif, polipropilen lif	Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül	Basınç, elastisite modülü
Lin ve diğ. [37]	402-635	14	Kireçtaşı	-	Su muhtevası, Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı
Mardani-Aghabaglou ve diğ. [38]	250	25	Kireçtaşı	Uçucu kül	Su emme, kılcal su emme, basınçlı su, altında su işleme derinliği, donma-çözülme
Meddah ve diğ. [39]	295	20	Kireçtaşı	-	Basınç, yarmada çekme, eğilme ve elastisite modülü
Modarres ve diğ. [40]	285-224-183	19	Kireçtaşı	Pirinç kabuğu külü	Sıkıştırma derecesi, basınç, kırılma modülü ve yorulma
Kolase ve Kdesai [41]	325	20	Kireçtaşı, polyester lif	Uçucu kül	Eğilme, basınç, yarmada çekme
Rao ve diğ. [42]	295	19	Kırma kum, dere kumu	Uçucu kül	Aşınma direnci, eğilme ve basınç
Abbaszadeh ve Modarres [43]	285- 162	25	Kireçtaşı	Çimento fırını tozu	Donma-çözülme, basınç, yarmada çekme eğilme, su emme, boşluk içeriği, cıva porozimetresi
Chhorn ve diğ. [44]	280	19	Kireçtaşı	-	Vebe boşluk miktarı
Lahucik ve diğ. [45]	282	19	Sentetik ve çelik lif, Elektrik ark cüruf agregası/normal agregatane	-	Basınç, yarmada çekme ve eğilme
Lam ve diğ. [46]	134.7-336	19	Kireçtaşı	Uçucu kül	Birim ağırlık, basınç, yarmada çekme ve elastisite modülü
Omran ve diğ. [47]	285-220	14	Kireçtaşı	Uçucu kül, cüruf ve doğal puzolan	Basınç, eğilme, donma-çözülme
Rad ve diğ. [48]	202-282	19	Kireçtaşı	Atık kömür külü	Donma-çözülme, geçirgen boşluk içeriği, klor iyon geçirgenliği ve buz çözücü tuzlara karşı yüzey pullanma
Adamu ve Mohammed [49]	80.81-134.58	19	Kireçtaşı	Nano-silis, uçucu kül	Basınç, yarmada çekme, eğilme elastisite modülü, aşınma birim hacim ağırlığı ve Vebe

Çalışmalarında her bir durum için optimum karışım, zemin sıkıştırma ve titreşimli tabla testine bağlı olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda karışımın maksimum yoğunluğu ve uygun kıvamı seçim kriteri olarak alınmıştır. Çeşitli araştırmalarda SSB'nin Vebe süresi 30-75 sn. aralığında değişiklik gösterdiği, bu aralığın başlangıç için ideal olduğu açıklanmıştır. Çalışmada kum/agrega oranı %50 olacak şekilde ince ve iri agrega miktarları belirlenmiştir. Bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanmıştır. Ayrıca SSB karışımlarında yeterli işlenebilirlik ve durabiliteyi sağlamak amacıyla hava sürükleyici katkı ve polynaftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir. 580 m SSB kaldırım uygulaması bir gün süre zarfında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hem laboratuvar hem de arazi şartları dikkate alınarak karışım tasarım metodu için aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Daha iyi bir uygulama ve düşük yapım maliyeti için agrega gradasyonu doğru bir şekilde tasarlanmalıdır,
- Karışımların optimum su muhtevasının belirlenmesinde Vebe testi uygulanmalıdır. Bu sürenin 47-65 sn. arasında olması SSB karışımları için uygun olmaktadır,
- Karışımların boşluk miktarı da ayrıca belirlenmeli ve araştırmalar bu yönde geliştirilmelidir.

Literatürde Maksimum yoğunluk yöntemiyle tasarlanan çalışmalar mineral katkı, lif ve geri kazanılmış malzeme içeriği bakımından alt başlıklara ayrılarak özetlenmiştir.

2.4.1 Mineral katkı içeren SSB karışımları

Cao ve diğ. [32], 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. Çalışmada çimento yerine ağırlıkça %45, 55, 65, 75, 85 ve 95 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, uçucu kül kullanımının karışımların erken yaşlardaki dayanımını olumsuz etkilediği, ileri yaşlardaki dayanımı ise olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca hem basınç hem de eğilme dayanımı açısından en yüksek sonuçların %45 oranında uçucu kül katkılı SSB karışımında gözlemlendiği bildirilmiştir.

Mardani-Aghabaglou ve diğ. [38] tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül kullanımının SSB'nin 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. 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 iki seri karışım daha üretilmiştir. Böylece toplamda 7 farklı SSB karışımı tasarlanmıştır. Karışımlarda optimum su/bağlayıcı oranlarını elde etmek amacıyla her bir karışımdan 0.30, 0.35, 0.40 ve 0.45 olmak üzere 4 farklı su/bağlayıcı oranında toplamda 28 adet SSB karışımları hazırlanmıştır. 7 karışım için elde edilen kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği dikkate alınarak her karışımda optimum su/bağlayıcı oranı seçilmiştir. Hazırlanan

karışımlarda 56 günlük numuneler üzerinde su emme, kılcal su emme, basınçlı su altında su işleme derinliği deneyleri ve 90 günlük numuneler üzerinde donma-çözülme deneyi gerçekleştirilmiştir. 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 gözlemlenirken, uçucu külün agrega yerine kullanıldığı SSB serisinde (B serisi) uçucu kül kullanım oranı artışı ile birlikte durabilite özelliklerinin kontrol serisine göre arttığı gözlemlenmiştir. A serisindeki azalmanın uçucu kül artışıyla karışımların su/bağlayıcı oranının artmasından kaynaklandığı, B serisindeki artışın ise uçucu kül miktarının artışına bağlı olarak artan işlenebilirlikten dolayı sıkıştırma yükü altında karışımların daha iyi bir şekilde sıkışabilmesinden kaynaklandığı öne sürülmüştür.

Yerramala ve diğ. [35] yaptıkları çalışmada yüksek oranda uçucu kül içeren zemin yöntemine göre tasarlanan SSB'lerin geçirgenlik, su emme ve klor iyon geçirgenliği gibi özelliklerini araştırmıştır. SSB karışımlarında 50-260 kg/m³ arasında çimento ve toplam bağlayıcı malzemenin %40-%85 arasında değişen oranlarda uçucu kül kullanılmıştır. SSB karışımları, ASTM C1176'ya [50] göre zemin sıkıştırma yöntemi kullanılarak, 3 tabaka halinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Her bir tabaka sıkıştırma işlemi 5 kPa tepe yüklemesiyle küp veya silindir numunenin üst kısmında hamur halkası görününceye kadar yapılmıştır. SSB tabakalarının sıkıştırma işlemi 15-20 sn. arasında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre tüm karışımlar SSB'nin taze hal özellik gereksinimlerini karşılamıştır. Su/çimento oranı düşük karışımlar, kohezif ve hiçbir segregasyon riski bulunmayan karışımlar olarak gözlemlenmiştir. Karışımların Vebe süresi 15-20 sn. arasında olmuş ve karışımlarda yeterince hamur olduğu tespit edilmiştir. 150-190 kg/m³ çimento dozajına, %60-%67 aralığında uçucu kül oranına ve 15-20 sn. arası Vebe sıkıştırma süresine sahip uçucu küllü karışım geçirgenlik açısından en iyi performans sergilenmiştir. %85 oranında uçucu kül içeren SSB karışımının maksimum su emme oranı % 2.11 olarak ölçülmüştür. Tüm karışımların klor iyon geçirgenliği 1000 Coulomb'un altında bir değer olup ASTM C1202 [51] standardına göre klor iyon geçirgenliği çok düşük olan kategoriye girmiştir.

Rao ve diğ. [42] çalışmalarında uçucu kül ikameli SSB'lerde dere kumu yerine kırma kum kullanılmasının SSB'lerin aşınma direnci ve dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. SSB karışımlarının tasarımı ACI 211 3R-02 [52] dikkate alınarak yapılmıştır. Karışım tasarımında agreganın maksimum tane boyutunu 19 mm olarak sınırlandırılmıştır. Çimento dozajı 295 kg/m³ olarak belirlenmiş ve uçucu kül ağırlıkça % 0, 20, 40 ve 60 oranlarında çimento yerine kullanılmıştır. İnce kum türü açısından 3 farklı seri SSB karışımı hazırlanmıştır. 1. seride ince agrega olarak %100 dere kumu, 2. seride %100 kırma kum ve 3. seride %50 kırma kum ve %50 dere kumu kullanılmıştır. Tüm karışımların 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı ile aşınma direnci (Cantabro ve yüzey aşınma direnç testleriyle) araştırılmıştır. Cantabro testi, her bir karışımdan 3 adet 30 cm çapında 10 cm kalınlığında silindir numune Los Angeles aşınma cihazına yerleştirilerek uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre tüm karışımlarda uçucu kül miktarının artmasıyla Cantabro kaybı ve yüzey aşındırma ağırlık kaybı

artmıştır. Uçucu kül içeren karışımlara kırma kumun eklenmesiyle dere kumu içeren karışımlara kıyasla bu orandaki artış azalmıştır. Ayrıca yazarlar dayanım ve aşınma direnci arasında bir ilişki kurmuştur.

Vahedifard [34], tarafından yapılan çalışmada silis dumanı ve ponza kullanımının, SSB karışımlarının işlenebilirliği, basınç dayanımı ve dona dayanıklılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. SSB karışım oranları zemin sıkıştırma metodu ile belirlenmiştir. Yapılan çalışmada dört farklı bağlayıcı kombinasyonu (Tip II Çimento, Tip II Çimento + %10 silis dumanı, Tip II Çimento + %10 ponza ve Tip II Çimento + %30 ponza) ve iki bağlayıcı miktarı (%12 ve %15) ile sekiz farklı SSB karışımı üretilmiştir. Silis dumanı ve ponza çimento yerine ağırlıkça ikame edilmiştir. Karışımlarda kıvam, basınç dayanımı ve uzun süreli donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, yüksek miktardaki bağlayıcı malzeme içeren karışımların dona karşı dirençleri daha yüksek çıkmıştır. %10 silis dumanının eklenmesi, SSB karışımlarının hem basınç dayanımını hem de dona karşı direncini artırmıştır. Ancak, taze karışımların işlenebilirliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Karışımlarda ponzanın eklenmesi işlenebilirliği artırırken, basınç dayanımı ve dona karşı direnci azaltmıştır.

Lam ve diğ. [46] SSB'lerde elektrik ark cüruf agregası (EAF) kullanımının etkisini araştırmışlardır. Karışımların optimum su oranını bulmak için zemin sıkıştırma metodu kullanılmıştır. Bu amaçla normal agreganın yerine %0, 50 ve 100 oranlarında EAF, çimento yerine ise %0, 20 ve 40 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. SSB karışımlarının birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, tüm SSB karışımlarında taze ve sertleşmiş hal birim ağırlıkları normal beton ile benzerlik göstermiştir. Karışımların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü EAF oranı artışı ile birlikte azalmıştır. Ayrıca ileri yaşlarda EAF ve %20 oranında uçucu kül ilaveli SSB karışımları mekanik özellikleri açısından en iyi performansı göstermiştir.

Rad ve diğ. [48] çimentonun bir bölümü yerine atık kömür külü kullanımının buz çözücü tuzlara maruz kalan hava sürüklenmemiş SSB karışımlarının durabilite özelliklerine etkisini araştırmıştır. Durabilite bakımından SSB'lerin tuz çözeltisinde donma-çözülme dirençleri, geçirgen boşluk içeriği, klor iyon geçirgenlik direnci ve buz çözücü tuzlara karşı yüzey pullanma direnci araştırılmıştır. Atık kömür külü içermeyen kontrol karışımında, çimento dozajı kuru agrega kütlelerinin %14'ü kadar sabit tutulmuştur. Kuru agrega kütlelerinin %2, %3 ve %4'ü oranında atık kömür külü çimento ile ikame edilerek yeni karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlar sırasıyla C2, C3 ve C4 olarak adlandırılmıştır. Bu karışımlarda da kontrol karışımında olduğu gibi toplam bağlayıcı içeriği %14'e sabitlenmiştir. SSB karışımları ASTM C1176'ya [50] uygun olarak maksimum yoğunluk yöntemine göre hazırlanmıştır. Numuneler 3 tabaka halinde dökülmüş ve her bir tabaka sürsaj yüklemesi uygulanarak sıkıştırılmıştır. Bu işlemler sırasında karışımların kuru yoğunluk-su muhtevası grafiklerinden optimum su muhtevaları belirlenmiştir. Farklı su/bağlayıcı oranlarında (0.35, 0.40, 0.45 ve 0.50) 150x300 mm boyutlarında silindir numuneler üretilmiştir. Çalışmadaki sonuçlara göre karışımlarda bağlayıcı olarak çimento yerine %3 oranında atık kömür külü kullanılması geçirgen boşluk içeriğini azaltmıştır. Ayrıca, bu karışımların tuz çözeltisine maruz kalması sonucu yüzey pullanmasında yaklaşık 5 çevrim kadar ertelenme olmuştur. Tuz çözeltisine maruz kalan karışımlarda 180 donma-çözülme çevrimine kadar kontrol

karışımının ultra ses geçiş hızları C2 ve C3 karışımlarından azda olsa daha yüksek çıkmıştır. 180 çevrimden daha fazla donma-çözülme maruz kalmasından sonra tersi bir durum oluşmuştur. Özellikle C4 karışımı başlangıç 180 donma-çözülme çevrimine kadar mükemmel bir performans sergilemiş ancak sonrasında hızlı bir şekilde performansı düşmüştür. Donma çözülme testlerinin sonunda kontrol, C2 ve C3 karışımları için durabilite faktörü yeterli düzeyde olmuştur. Durabilite testlerine göre karışımlarda optimum kömür atık külü içeriği %3 olarak tespit etmişlerdir.

Abbaszadeh ve Modarres [43] yaptıkları çalışmada, çimento yerine kısmen çimento fırını tozu kullanılmış ve hava sürüklenmemiş SSB kaplamaların donma çözülme direncini incelemiştir. SSB karışım oranları maksimum yoğunluk yöntemi ile belirlenmiştir. Bu deneysel çalışmada, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, 28 günlük su emme oranı, boşluk içeriği ve cıva porozimetresi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde, çimento yerine % 2 oranında çimento fırını tozu kullanıldığında en iyi mekanik ve durabilite sonuçları elde edilmiştir. Ancak çimento fırını tozunun daha fazla kullanılması ne mekanik ne de durabilite özelliklerine olumlu bir katkı sağlamamıştır.

Omran ve diğ. [47] tarafından yapılan saha çalışmasında cam tozu kullanımının SSB'lerde etkisi incelenmiştir. Üretilen SSB'lerin tasarımı modifiye proktor test metoduna göre yapılmıştır. Bu amaçla karışımlarda çimento yerine ağırlıkça %20 oranında cam tozu kullanılmıştır. Sonuç olarak, SSB karışımlarının 7 günlük basınç dayanımı kontrol karışımlarına göre daha düşük çıkmıştır. Ancak 91 günlük basınç dayanımı ve eğilme dayanımı kontrol karışımına oranla sırasıyla %5 ve %15 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca cam tozunun kullanımı karışımın dönme-çözülme direncini olumlu yönde etkilemiştir.

2.4.2 Lif içeren SSB karışımları

Üte ve Yazıcı [27] tarafından yapılan çalışmada polipropilen lif ve çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül kullanımının SSB özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, SSB karışım oranları geoteknik yaklaşımla dizayn edilmiştir. Bu bağlamda maksimum agrega tane çapı 25 mm ve çimento dozajı 300 kg/m³ 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. 7, 28 ve 90 günlük SSB numuneleri üzerinde 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.

Madhkhani ve diğ. [36] çalışmalarında SSB'nin mekanik özellikleri üzerine puzolan ve liflerin etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, farklı miktarlarda puzolan, çelik ve polipropilen lifleri içeren optimum su muhtevasına sahip SSB karışımları hazırlanmıştır. SSB numuneleri zemin sıkıştırma yöntemine göre üretilmiştir. 30, 45 ve 60 kg/m³ olmak üzere 3 farklı miktarda çelik lif kullanılmıştır. Propilen lif içeren karışımlarda ise 1 kg/m³ polipropilen lif ilave edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde karışımlara puzolanların ilave edilmesi 28 günlük basınç dayanımını ve kırılma modülünü azaltmıştır. Tüm karışımların 90 günlük basınç dayanımında artış olmasına rağmen söz konusu basınç dayanımlarında puzolanın fark edilebilir bir etkisi olmamıştır. Ağırlıkça %30 oranında puzolan içeren karışımlarda çelik liflerin kullanılması kırılma modülü

üzerinde önemli bir etki göstermemiştir. Ancak puzolanın %30'dan daha fazla kullanılması bağlayıcı malzemelerin hacminin artışından dolayı kırılma modüllerinde artışı sağlamıştır.

Kolase ve Kdesai [41], tarafından yapılan çalışmada, üçgen boyutlu polyester lif (ÜPL) ve uçucu kül (UK) kullanımının SSB'lerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada karışım oranları maksimum yoğunluk yöntemi ile belirlenmiştir. SSB karışımlarında çimento yerine ağırlıkça % 0.25, 0.50 ve 0.75 oranlarında ÜPL ve %15, 30 ve 45 oranlarında UK kullanılmıştır. Sonuç olarak, ÜPL kullanımı karışımın su ihtiyacını arttırdığı için mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. 90 günlük deney sonuçları incelendiğinde %30 UK ve ÜPL ilave edilen karışımların hem mekanik özellikler açısından hem de işlenebilirlik açısından en uygun karışım olduğu tespit edilmiştir.

Lahucik ve diğ. [45], tarafından yapılan çalışmada makro boyutlardaki liflerin kullanımının SSB'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. SSB karışımında lif ve nem-yoğunluk ilişkisini bulmak için modifiye proktor testi uygulanmıştır. Bu kapsamda maksimum agrega tane çapı 19 mm ve çimento dozajı 282 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Mekanik özellikleri iyileştirmek amacı ile %0.2 ve 0.4 oranlarında 6 farklı sentetik ve 2 farklı çelik lif kullanılmıştır. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 28 günlük basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Sonuçta, lif kullanımının SSB'lerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

2.4.3 Geri kazanılmış malzeme içeren SSB karışımları

Courard ve diğ.[33] SSB karışımlarında agrega olarak normal doğal agrega yerine geri kazanılmış agrega kullanmıştır. SSB'nin kalitesi için agregaların özellikleri önemli olduğundan dolayı agregaların Los Angeles, su emme ve özgül ağırlık gibi parametreleri çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı dirençli ve dayanıklı malzeme elde etmek için üretim esnasında sıkıştırılabilirliği optimize etmektir. Bu bağlamda titreşim ağırlık testi ve modifiye proktor testleri uygulanmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarına göre 175-250 kg/m³ arasında çimento içeren karışımlarda çimento miktarının sıkıştırılabilirliğe açık bir etkisi görülmezken, doğal ve geri kazanılmış agrega ile üretilmiş SSB'ler sıkıştırılabilirlik bakımından benzer davranış sergilemiştir. Karışımlarda çimento dozajının minimum 200 kg/m³ olması basınç dayanımını belirli düzeyde tutmak açısından önemli olduğu ve doğal agrega içeren SSB'lerin daha yüksek dayanıma sahip olduğu açıklanmıştır. İnce agregaların boyutunun küçük olması, 2634 kg/m³ yoğunluğa, % 4.58 su emme oranına ve Los Angeles sabitinin 25 değerine sahip olmaları geri kazanılmış agregaların SSB içinde kullanım için performanslarının çok iyi olabileceğinin göstergesidir.

Modarres ve diğ. [40] yaptığı çalışmada geri dönüştürülmüş asfalt kaldırım malzemeleri kullanılarak tasarlanmış SSB'nin mekanik özellikleri üzerine pirinç kabuğu külünün etkisini araştırmışlardır. Ayrıca SSB karışımların mekanik özellikleri üzerine çeşitli boyutlarda pirinç kabuğu külünün orijinal agrega ile yer değiştirmesinin etkileri değerlendirilmiştir. Mekanik özelliği olarak karışımların sıkıştırma derecesi, basınç dayanımı, kırılma modülü, enerji yutma kapasitesi ve yorulma davranışı gibi özellikler ölçülmüştür. Tüm karışımlarda bağlayıcı malzemelerin miktarı %14'e sabitlenmiştir. Basınç dayanımı için numuneler titreşimli tokmakla sıkıştırılmıştır (Proctor sıkıştırma testi). Karışımların pirinç kabuğu külü içermesi optimum su muhtevasını artırmış, maksimum kuru

birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımını azaltmıştır. Ancak iri pirinç kabuğu külü içeren karışımlar ince kül içerenlere kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir. Pirinç kabuğu külü içeren SSB'lerde enerji yutma kapasitesi artmıştır. Karışımların %3 oranında pirinç kabuğu külü içermesi malzemenin sünekliğini olumlu yönde etkilemiştir. Ancak bu oranın %5'e kadar artış göstermesi enerji yutma kapasitesini azaltmıştır.

Adamu ve diğ. [49] tarafından yapılan çalışmada lastik kırıntısı, nano-silis ve yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB'lerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Karışım oranları zemin sıkıştırma metodu ile belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, uçucu kül ve lastik kırıntısı sırasıyla çimento ve ince agrega yerine kullanılmış olup ayrıca çimentolu malzemelere katkı olarak nano-silis ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek miktarda uçucu kül içeren SSB karışımlarında ince agreganın lastik kırıntısı ile ikame edilmesi taze hal birim hacim ağırlığı ve Vebe süresini azaltmıştır. Ancak, çimentolu malzemelerin yerine ağırlıkça %1.22 oranında nano-silis ilave edilmesi karışımların taze hal birim hacim ağırlığı ve Vebe süresinin artışına sebebiyet vermiştir. Ayrıca, lastik kırıntılarının SSB karışımlarında kullanılması basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve aşınma direncinin azalmasına neden olmuştur. Nano silisin karışımlara eklemesi ile sözü edilen mekanik özelliklerde artışlar kaydedilmiştir.

Meddah ve diğ. [39] tarafından yapılan çalışmada ömrünü tamamlamış lastiklerin kullanımının SSB'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışımlardaki çimento ve su miktarları zemin mekaniği yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu bağlamda maksimum agrega tane çapı 20 mm ve çimento dozajı 295 kg/m³ olan SSB karışımları hazırlanmıştır. Uygun boyutlara getirilen atık lastikler agrega 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. Sonuçta, atık lastik kullanımının SSB'lerin mekanik özelliklerini zayıflattığı tespit edilmiştir. Ancak bu malzemelerin çevresel ve ekonomik katkıları göz önüne alınarak daha az trafik yoğunluğuna sahip yollarda az miktarda da kullanılabilir olduğu beyan edilmiştir.

3 Sonuç ve öneriler

Bazı alanlarda daha hızlı ve daha ekonomik olması SSB'leri vazgeçilmez kılmaktadır. Bu betonların uygulama alanlarının genişletilmesi dolayısıyla yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi, mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. SSB karışımlarının üstün performans göstermesi için ilk aşamada önem arz eden karışım oranlarının belirlenmesidir. Bu konuda literatürde pek çok yöntem bulunmakla beraber en fazla tercih edilen yöntem maksimum yoğunluk yöntemi (zemin yöntemi) olduğu görülmektedir. SSB'lerin özelliklerini doğrudan etkileyen tasarım yöntemlerinin haricinde birçok farklı parametrede SSB'lerin mekanik ve durabilite özelliklerini etkilemektedir. Bu parametreler genel olarak üretimde kullanılan uçucu kül ve diğer mineral katkılar, atık malzemeler, lifler vb. malzemelerdir. Tüm bu bilgiler doğrultusunda bu çalışmada SSB'lerin tasarım yöntemleri ve yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Yapılan çalışmalardan hareketle bu konuda çalışma yapacak kişiler için aşağıda konu ile ilgili çalışma önerileri verilmiştir.

- SSB'lerin tasarımında çoğunlukla maksimum yoğunluk yöntemi tercih edilmiştir. Literatürde bu yöntem ile ilgili yapılan birçok çalışma mevcuttur. Diğer yöntemlerle ilgili çalışmaların az olduğu görülmektedir. Bu metotları kıyaslamak amacı ile her 4 yöntemeye uygun SSB karışımı tasarlanmalı ve elde edilen karışımların taze ve sertleşmiş hal özellikleri kıyaslanmalıdır. Deneysel sonuçlar istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmelidir. SSB'lerin mekanik ve durabilite özelliklerini tasarım yöntemi dışında etkileyen parametrelerden olan mineral katkıların farklı çeşitleri ve kullanım oranları belirlenerek SSB'lerin özellikleri araştırılmalıdır,
- Betonların çekme ve eğilme mukavemeti ile enerji yutma kapasitesini arttırmak amacı ile lifler kullanılmaktadır. Lif tipi, geometrisi, narinlik oranı ve kullanım oranının SSB'lerin mekanik ve durabilite özelliklerine etkileri incelenmelidir,
- Çevresel ve ekonomik katkı sağlayabilecek atık malzemelerin (geri kazanılmış beton agregası, asfalt agregası ve atık lastikler) geri kazanılarak SSB'lerde kullanılmasına yönelik araştırmaların yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Buna ilaveten söz konusu atık malzemelerin kullanımının çevreye ve ülke ekonomisine olan katkısını gösterir analizlerin yapılması önem arz etmektedir,
- Ayrıca SSB'lerin özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik malzemelerin (mineral katkı, lif vb.) kullanılması durumunda hangi tasarım yönteminin daha uygun olabileceğine yönelik çalışmalarda yapılmalıdır.

4 Conclusion and recommendations

RCCs are indispensable due to faster and more economical in some areas. As the application areas of these concretes are expanded, new production techniques should be developed, and their mechanical and durability characteristics should be improved. For the RCC mixtures to show superior performance, it is the determination of the mix proportions that are important in the first stage. Although in this area there are many methods in the literature, it is seen that the most preferred method is the maximum density method (soil method). In addition to the design methods that directly affect the properties of RCCs, many different parameters also affect the mechanical and durability properties of RCCs. These parameters are generally fly ash, other mineral additives, waste materials, fibers, etc. used in RCC production. In direction of this information, the design methods and studies of RCCs are summarized in this study. Based on the studies, the following suggestions are given for the people who will work on this subject.

- The maximum density method generally was preferred in the design of RCCs. There are many studies on this method in the literature. It is seen that there are few studies on other methods. In order to compare these methods, a suitable RCC mixture for all 4 methods should be designed and the result obtained from fresh and hardened state properties of mixtures should be compared. Experimental results should be evaluated by statistical methods. Apart from the design method, different types of mineral additives, and their usage rates which are among the parameters affecting the mechanical and durability characteristics of SSBs should be determined and the properties of SSBs should be investigated.

- Fibers are used to increase the tensile and flexural strengths and energy absorption capacity of the concrete. The effects of fiber type, geometry, aspect ratio, and usage rate on the mechanical and durability properties of RCCs should be examined,
- Researches are needed to use recycling waste materials (recycled concrete aggregate, asphalt aggregate, and waste tires) in RCC that can contribute environmentally and economically. In addition, it is important to conduct analysis that shows the contribution of the use of these waste materials to the environment and the national economy,
- In addition, in the case of using materials (mineral additive, fiber, etc.) to improve the properties of RCCs, studies on which design method would be more suitable should be carried out.

5 Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (Proje numarası: 217M408) ve AYP(MH)-2016/16 No.lu Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Altyapı Projesi kapsamında desteklenmiştir.

6 Kaynaklar

- [1] American Concrete Institute. "Roller-compacted Mass Concrete". Farmington Hills, Michigan, USA, Part 1, ACI 207.5R-99, 1999.
- [2] Atiş CD. "Uçucu kül içeren silindire sıkıştırılabilen betonların özellikleri". *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2(2), 503-515, 2001.
- [3] Ouellet E. Design and Study of the Mechanical Behaviour of Roller Compacted Concrete. Master Thesis, Université Laval, Québec, Canada, 1998.
- [4] Burns CD, Saucier KL. "Vibratory compaction study of zero-slump concrete". *Journal of Proceeding*, 75(3), 86-90, 1976.
- [5] Guerin M. *Le béton compacté au rouleau*. 1st ed. Paris, France, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1996.
- [6] Andriolo RF. *The Use of Roller Compacted Concrete*. 1st ed. Sao Paulo, Brazil, Oficina de Textos, 1998.
- [7] US Army Corps of Engineers. "Roller-Compacted Concrete". Washington, USA, EM 1110-2-2006, 2000.
- [8] Lowe J. "Roller compacted concrete dams-an overview". *Roller Compacted Concrete II: Proceedings of the Conference*, San Diego, California, USA, 29 February-2 March 1988.
- [9] Şimşek O. *Beton ve Beton Teknolojisi*. 5. Baskı. Ankara, Türkiye, Seçkin Yayıncılık, 2016.
- [10] Yaman İÖ, Ceylan H. "Silindire Sıkıştırılmış Beton Yollar". *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, Ankara, Türkiye, 21-23 Şubat, 2013.
- [11] Horzum US. Silindire Sıkıştırılmış Betonun Basınç Dayanımının Hızlandırılmış Deney Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2009.
- [12] American Concrete Institute (ACI) Committee 207. "Roller Compacted Mass Concrete". Farmington Hills, Michigan, USA, ACI 207.5R-99, 1988.
- [13] Açar E, Taşdemir Y. "Silindire sıkıştırılabilen beton yollar". *Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, Türkiye*, 2007.

- [14] American Concrete Institute (ACI) Committee 309. "Compaction of Roller-Compacted Concrete". Farmington Hills, Michigan, USA, ACI 309.5R-00, 2000.
- [15] Delatte N, Amer N, Storey C. "Improved management of RCC pavement technology". Department of Civil and Environmental Engineering, Alabama University, Birmingham, USA, UTCA Report, 01231, 2003.
- [16] Qasrawi HY, Asi IM, Wahhab HAA. "Proportioning RCCP mixes under hot weather conditions for a specified tensile strength". *Cement and Concrete Research*, 35(2), 267-276, 2005.
- [17] Mardani-Aghabaglou A. Uçucu küllü silindirle sıkıştırılmış betonlarda dayanıklılık. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2011.
- [18] Harrington D, Abdo F, Adaska W, Hazaree C, Ceylan H, Bektas F. "Guide for roller-compacted concrete pavements". Department of Civil and Environmental Engineering, Iowa State University, Iowa, USA, InTrans Project Reports, 102, 2010.
- [19] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). "Baraj Fotoğrafları". <http://www.dsi.gov.tr/dsi-galeri> (15.02.2019).
- [20] Baile W, Donggeng W, Yingqiang H. "Construction of the Puding RCC arch dam". *The International Journal on Hydropower & Dams*, 3(2), 55-57, 1994.
- [21] Boggs HL, Richardson AT. "USBR Design Considerations for Roller Compacted Concrete Dams". *ASCE Roller Compacted Concrete Symposium*, Denver, Colorado, USA, 1-2 May 1985.
- [22] Hansen KD, Reinhardt WG. *Roller-Compacted Concrete, Dams*. 1st ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1991.
- [23] Çırpan G. Polipropilen Katkısının Silindirle Sıkıştırılmış Kuru Beton Üzerindeki Etkisi. Bitirme Ödevi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye, 2015.
- [24] Service d'Expertise en Matériaux Inc. "Frost Durability of Roller Compacted Concrete Pavements". Portland Cement Association, Research and Development Bulletin, RD135, Quebec, Canada, 2482, 2004.
- [25] Koichi U, Yajima K. "Miyagase dam to employ innovative RCD methods". *Water Power & Darn Construction*, 5(3), 35-43, 1991.
- [26] Nagataki S, Fujisawa T, Kawasaki H. "State of art of RCD dams in Japan". *50^o Congresso Brasileiro do Concreto*, Salvalo, Brazilian, 4 September, 2008.
- [27] Üte AA. "Uçucu kül ve polipropilen lif kullanımının silindirle sıkıştırılmış beton özelliklerine etkisi". Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2008.
- [28] Portland Cement Association. "Production of Roller Compacted Concrete". New York, USA, IS332, 2006.
- [29] American Society for Testing and Materials. "Test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort". West Conshohocken, Pennsylvania, USA, ASTM D698, 2000.
- [30] American Society for Testing and Materials. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort". West Conshohocken, Pennsylvania, USA, ASTM D 1557, 2000.
- [31] American Society for Testing and Materials. "Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer". West Conshohocken, Pennsylvania, USA, ASTM C1435, 2014.
- [32] Cao C, Sun W, Qin H. "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, 2000.
- [33] Courard L, Michel F, Delhez P. "Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete". *Construction and Building Materials*, 24(3), 390-395, 2010.
- [34] Vahedifard F, Nili M, Meehan CL. "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, 2010.
- [35] Yerramala A, Babu KG. "Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete". *Cement and Concrete composites*, 33(10), 1057-1062, 2011.
- [36] Madhkhan M, Azizkhani R, Harchegani MT. "Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements". *Construction and Building materials*, 26(1), 102-112, 2012.
- [37] Lin Y, Karadelis JN, Xu Y. "A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays". *Construction and Building Materials*, 48, 333-341, 2013.
- [38] Mardani-Aghabaglou A, Andiç-Çakır Ö, Ramyar K. "Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method". *Cement and Concrete Composites*, 37, 259-266, 2013.
- [39] Meddah A, Beddar M, Bali A. "Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement". *Journal of Cleaner Production*, 72, 187-192, 2014.
- [40] Modarres A, Hosseini Z. "Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material". *Materials & Design*, 64, 227-236, 2014.
- [41] Kolase PK, Kdesai AK. "Strength properties of roller compacted concrete pavements containing fly ash and triangular polyester fiber". *International Journal of Earth Science and Engineering*, 9(3), 314-322, 2016.
- [42] Rao SK, Sravana P, Rao TC. "Abrasion resistance and mechanical properties of roller compacted concrete with GGBS". *Construction and Building Materials*, 114, 925-933, 2016.
- [43] Abbaszadeh R, Modarres A. "Freeze-thaw durability of non-air-entrained roller compacted concrete designed for pavement containing cement kiln dust". *Cold Regions Science and Technology*, 141, 16-27, 2017.
- [44] Chhorn C, Hong SJ, Lee SW. "A study on performance of roller-compacted concrete for pavement". *Construction and Building Materials*, 153, 535-543, 2017.
- [45] LaHucik J, Dahal S, Roesler J, Amirkhanian AN. "Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers". *Construction and Building Materials*, 135, 440-446, 2017.
- [46] Lam MNT, Jaritngam S, Le DH. "A Study on mixing proportion of roller-compacted concrete pavement made of EAF slag aggregate and fly ash by using Taguchi Method". *5th International Conference on Coastal and Ocean Engineering*, Shanghai, China, 27-29 April 2018.
- [47] Omran A, Harbec D, Tagnit-Hamou A, Gagne R. "Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study". *Construction and Building Materials*, 133, 450-458, 2017.

- [48] Rad SAM, Modarres A. "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*, 137, 48-59, 2017.
- [49] Adamu M, Mohammed BS, Liew MS. "Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica". *Construction and Building Materials*, 171, 521-538, 2018.
- [50] American Society for Testing and Materials. "Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table". West Conshohocken, Pennsylvania, USA, ASTM C1176, 2005.
- [51] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration". West Conshohocken, Pennsylvania, USA, ASTM C1202, 2007.
- [52] American Concrete Institute. "Guide for Selecting Proportions for No Slump Concrete". Farmington Hills, Michigan, USA, ACI 211 3R-02, 2002.