



Araştırma Makalesi / Research Article

Silindirle Sıkıştırılmış Betonlarda Su/Çimento Oranının Etkileri

The Effects of Water/Cement Ratio on Properties of Roller Compacted Concretes

İsmail KILIÇ^{1,*}, Saadet Gökçe GÖK²

^{1,2} Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 39100, Kırklareli, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihi

Alınış, 03 Şubat 2021

Revize, 01 Mayıs 2021

Kabul, 04 Haziran 2021

Online Yayınlama, 05 Haziran 2021

Anahtar Kelimeler

Silindirle sıkıştırılmış beton, Beton yol, Basınç altında su işleme derinliği, Aşınma

ÖZ

Deneysel çalışmada, C30/37 sınıfı silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) tasarımı yapılmıştır. Karışımda, CEM I 42,5 R portland çimentosu, dört farklı boyutta agrega ve şebeke suyu kullanılmıştır. Su/çimento oranları 0,32, 0,35, 0,38 ve 0,41 olarak belirlenmiştir. Farklı su/çimento ile yapılan karışımlarda su miktarı sabit tutulmuş, çimento ve agrega miktarlarında değişiklik yapılmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının tespiti için 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindir, 28 günlük eğilme dayanımları için 15 cm x 15 cm x 75 cm boyutlarında prizmatik kiriş, basınç altında su işleme derinliği ve aşınma için ise 15 cm x 15 cm x 15 cm küp SSB örnekleri üretilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda, silindirle sıkıştırılmış betonlarda su/çimento oranının, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, basınç altında su işleme derinliği ve aşınma gibi betonun özelliklerine etkileri belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article History

Received, 03 February 2021

Revised, 01 May 2021

Accepted, 04 June 2021

Available Online, 05 June 2021

Keywords

Roller compacted concrete, Concrete road, Depth of water penetration under pressure, Wear

ABSTRACT

In the experimental study, roller compacted concrete (RCC) with concrete class of C 30/37 was designed. CEM I 42.5 R Portland cement, four different sizes of aggregate and tap water were used in the mixtures. Water/cement ratios were determined as 0.32, 0.35, 0.38 and 0.41. The water amount was kept constant where the cement and aggregate amounts were changed in concretes having different water/cement ratios. Cylindrical specimens with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm were produced for the determination of the compressive strengths at the ages of 7 and 28 days. 15 cm × 15 cm × 75 cm sized prismatic beams were produced to determine the flexural strengths at the age of 28 days while 15 cm × 15 cm × 15 cm cubic RCC specimens were produced to determine the depth of water penetration under pressure and wear resistance. According to the results of the data obtained, the effects of water/cement ratio on properties of concrete were determined.

*Sorumlu Yazar

E-posta Adresleri: ismail.kilic@klu.edu.tr (İsmail KILIÇ), saadet.gokce.gok@klu.edu.tr (Saadet Gökçe GÖK)

1. GİRİŞ

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) üretimi, geleneksel betonda kullanılan bileşenlerin farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir [1]. SSB sertleşmemiş halde iken üzerinden silindir geçmesine olanak verecek şekilde kuru kıvamda olan bir beton türüdür [2]. SSB’de su/çimento oranı 0,20 - 0,40 arasında değişmektedir [3]. Silindirle sıkıştırılmış betonların taze halde çökmesi olmadığı gibi karışım oldukça kuru haldedir. Üretim sırasında kullanılan malzemeler, geleneksel beton üretiminde kullanılan malzemelerle benzerlik gösterdiğinden avantaj sağlamaktadır. SSB taze halde iken geleneksel betona göre işlenebilirlik açısından zayıftır ve daha çok zemin dolgu malzemesi gibi görünmektedir. Bununla birlikte SSB sertleşince, geleneksel beton özellikleri göstermektedir [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Ayırışma olmaması, karıştırmayı kolaylaştırmak ve yüzey düzgünlüğünü oluşturmak amacıyla SSB karışımlarında dane boyutu yüksek seçilmemelidir [17, 18].

SSB, düşük maliyet, hızlı ve kolay üretim gibi avantajlarıyla öne çıkan, geleneksel betona göre daha fazla miktarda agrega içeren ve taze halde sıfır çökmeye sahip karışımlardır [19]. Düşük su/çimento oranı ile üretilen silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), genellikle yol kaplamalarında ve saha betonlarında kullanılmaktadır. SSB’nin normal betona göre hiç çökme göstermemesi, bağlayıcı madde oranının daha az olması, daha az hidrasyon ısılarının oluşması, yol ekipmanları ile serilip sıkıştırılabilmesi, hızlı üretimi ve ekonomik olması en önemli farklılıklarıdır [20]. SSB yolların en önemli üstünlüğü ise gerek beton kaplamalar gerekse çok tabakalı asfalt kaplamalara göre çok daha hızlı kullanıma açılması ve ekonomik olmasıdır [18, 21]. Ayrıca, SSB yol yapımında hiçbir zaman kalıp kullanılmamakta, genellikle yüzey düzeltme işlemi yapılmamakta, kayma donatısı ve bağ donatısı gibi herhangi bir çelik donatı kullanılmamaktadır [1]. Yurtdışındaki uygulamalar sonrasında edinilen verilere göre SSB’nin birim maliyeti genellikle benzer bir kesitteki beton veya asfalt kaplamadan daha ucuzdur. Maliyetteki tasarruf yüzdesi ise genellikle yerleştirme işlemlerindeki karmaşıklığa ve uygulamadaki betonun toplam miktarına bağlı olarak değişmektedir. SSB’nin geleneksel betona göre daha ekonomik olmasının sebebi çimento miktarındaki, yerleştirme maliyetindeki ve inşaat süresindeki azalmalarla açıklanmaktadır [18].

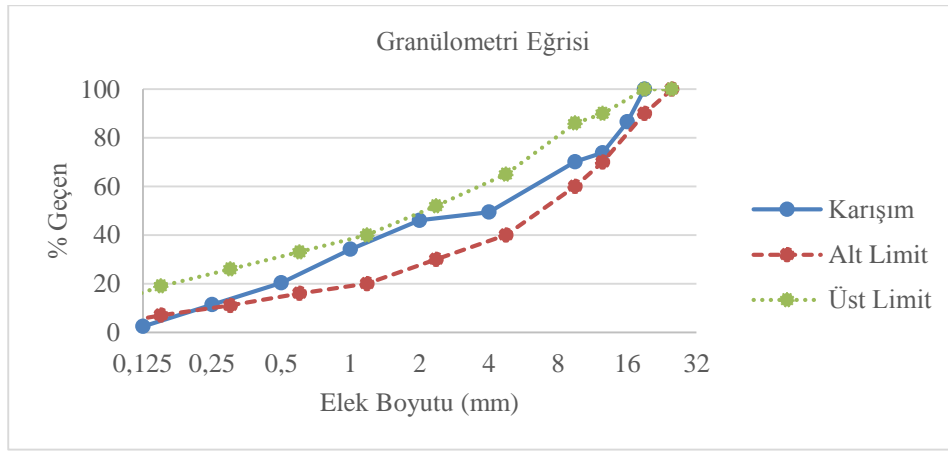
Silindirle sıkıştırılmış betonların olumsuz yanları göz önüne alındığında, kuru kıvamdaki yapılarından dolayı karıştırıcıdaki üretim hacmi geleneksel betona göre düşük olmaktadır [22]. SSB’nin karıştırılması, taşınması, serilmesi ve sıkıştırma işlemleri mümkün olduğunca en kısa zamanda ve ayırışmaya uğratılmadan yapılmalıdır [23]. Taşıma sırasında SSB’nin işlenebilirliğini kaybetmemesi için uygun taşıma yöntemi seçilmelidir [24]. SSB tabakasının, sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra iki saat içinde su veya kimyasal kür malzemesi ile kaplanması gerekmektedir [25].

SSB üretiminde, doğru agrega gradasyonu ile çimento dozajı azaltılabilir, işlenebilirlik iyileştirilebilir ve performans artırılabilir [26]. SSB'nin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla polipropilen lifler kullanılabilir [27,28]. Polipropilen liflerin yanı sıra çatlak oluşumunu önlemek amacıyla çelik lifler de kullanılabilir [29].

Yapılan çalışmanın amacı, çökmesi sıfır olacak şekilde silindire sıkıştırılmış betonların ideal su/çimento oranını belirlemek ve karışımdaki su/çimento oranının değişimine göre SSB özelliklerinde meydana gelecek değişiklikleri tespit etmektir.

2. MATERYAL VE METOT

Silindire sıkıştırılmış beton (SSB) karışımında, Pınarhisar Limak Trakya Çimento fabrikasında üretilen CEM-I 42,5 R portland çimentosu, Kırklareli şebeke suyu, agrega olarak kırmataş II (12,5-19 mm), kırmataş I (8-12,5 mm), taş tozu (0-8 mm) ve doğal kum (0-4mm) kullanılmıştır. Maksimum agrega tane çapı (d_{maks}) 19 mm olarak seçilmiştir. Agregalar kendi aralarında % 25 oranında karıştırılarak kullanılmıştır. Agrega karışımının granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Kullanılan agregaların özgül ağırlık değerleri kırmataş II, kırmataş I, taş tozu ve doğal kum için sırasıyla 2,80, 2,80, 2,81 ve 2,76 g/cm³ olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Agrega granülometrisi

Beton karışım hesabı, beton sınıfı C30/37 olacak şekilde tasarlanmış olup her bir üretim için karışımdaki malzeme miktarları Tablo 1'de verilmiştir. Su/çimento (s/ç) oranları 0,32, 0,35, 0,38 ve 0,41 olan dört farklı grup silindire sıkıştırılmış beton üretilmiştir. Farklı s/ç oranlarında karışım hesabı yapılırken su miktarı sabit tutulmuş, çimento ve agrega miktarında değişiklik yapılmıştır. Her bir s/ç oranında çökme değeri sıfır olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Çimento dozajı belirlenirken, KGM [30] beton yol kaplamaları teknik şartnamesinde belirtilen minimum 340 kg/m³ koşulu dikkate alınmıştır. Belirlenen dozajların silindire sıkıştırılmış betonlar için yüksek bir değer olduğu bilinmekle birlikte,

Kuzey Amerika'daki birçok SSB yol projesinde kullanılan çimento dozajları 300 kg/m^3 ile 500 kg/m^3 arasında değişmektedir [31].

Tablo 1. Karışımdaki malzeme miktarları

| SSB Kodu | S/Ç | Su (kg/m^3) | Çimento (kg/m^3) | Kırmataş II (kg/m^3) | Kırmataş I (kg/m^3) | Taş Tozu (kg/m^3) | Doğal Kum (kg/m^3) |
|----------|------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A | 0,32 | 150 | 469 | 479,25 | 479,25 | 479,25 | 479,25 |
| B | 0,35 | 150 | 429 | 488,25 | 488,25 | 488,25 | 488,25 |
| C | 0,38 | 150 | 395 | 495,75 | 495,75 | 495,75 | 495,75 |
| D | 0,41 | 150 | 366 | 502,25 | 502,25 | 502,25 | 502,25 |

SSB üretimi ASTM C 1435 [32] standardına göre yapılmıştır. Literatürde belirtilen [31], alt ve üst sınırların arasında kalacak granülometride agrega karışımları hazırlandıktan sonra su, çimento ve agrega içeren farklı beton karışımları üretilerek sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Silindir SSB örnekleri üretilirken sıkıştırma işlemi üç tabaka halinde yapılmış, her bir tabaka yirmi saniye boyunca sıkıştırılmıştır. Kiriş ve küp örneklerin üretiminde ise iki tabaka halinde sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Sıkıştırma işlemleri, standarda uygun olarak vibratörlü çekiç ile yapılmıştır. Şekil 2 ve Şekil 3'te SSB örneklerinin üretim ve deney aşamasına yönelik görseller verilmiştir.



Şekil 2. Mikserde karıştırılmış SSB ve küp örneğin vibratörlü çekiç ile sıkıştırma öncesi görüntüsü

7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının tespiti için 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindir, 28 günlük eğilme dayanımları için 15 cm x 15 cm x 75 cm boyutlarında prizmatik kiriş, basınç altında su işleme derinliği ve aşınma direnci için ise 15 cm x 15 cm x 15 cm küp SSB örnekleri üretilmiştir. Her bir s/ç oranı için 6 adet silindir, 3 adet kiriş ve 2 adet küp olmak üzere, toplamda 24 adet silindir, 12 adet kiriş ve 8 adet küp SSB örneği üretilmiştir. SSB örneklerine s/ç oranı 0,32 için A, 0,35 için B, 0,38 için C ve 0,41 için D kodu verilmiştir.



Şekil 3. SSB kiriş örneğinin vibratörlü çekiç ile sıkıştırma öncesi ve silindir numunenin basınç presi ile kırılma sonrası görüntüsü

Elek analizi TS EN 933-1 [33], özgül ağırlık TS EN 1097-6 [34], çökme deneyi TS EN 12350-2 [35], taze beton birim hacim ağırlık TS EN 12350-6 [36], basınç dayanımı TS EN 12390-3 [37], eğilme dayanımı TS EN 12390-5 [38] standartlarına göre yapılmıştır.

Basınç altında su işleme derinliği deneyi, TS EN 12390-8 [39] standardına uygun olarak küp SSB örnekleri üzerinde yapılmıştır. Küp örnekler 5 bar hava basıncı ile su geçişi olacak şekilde cihaza sabitlendikten sonra 72 saat ve (500 ± 50) kPa su basıncı altında bekletilmiştir. Bekletilme süresi sonunda cihazdan çıkartılan örnekler ikiye bölünmüştür. Deney alanı içerisinde basınç altında suyun işlediği en büyük derinlik ölçülerek milimetre cinsinden yazılmıştır.

Aşınmanın belirlenmesinde, zemin kaplamalarında kullanılan, doğal taş ve beton ürünlerinde aşınma direncinin belirlenmesi amacı ile tasarlanmış geniş diskli dikey aşındırma cihazı kullanılmıştır. Cihazın 70 mm kalınlıkta bir diski mevcut olup 75 devir/dk hızla dönmektedir. Test yapılırken aşındırıcı toz kullanılmıştır. SSB örneği yüzeyine, aşındırıcı toz ile birlikte sürtünerek dönen diskin, yüzeyde açmış olduğu oyuğun alt ve üst sınır çizgileri arasındaki mesafe 0,5 mm duyarlılıkta ölçülerek deney tamamlanmıştır. Bu mesafe, oyuğun derinliği ile bağlantılı olduğundan, BS EN 1342 [40] standardına uygun olarak aşınma direnci tespitinde dikkate alınmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

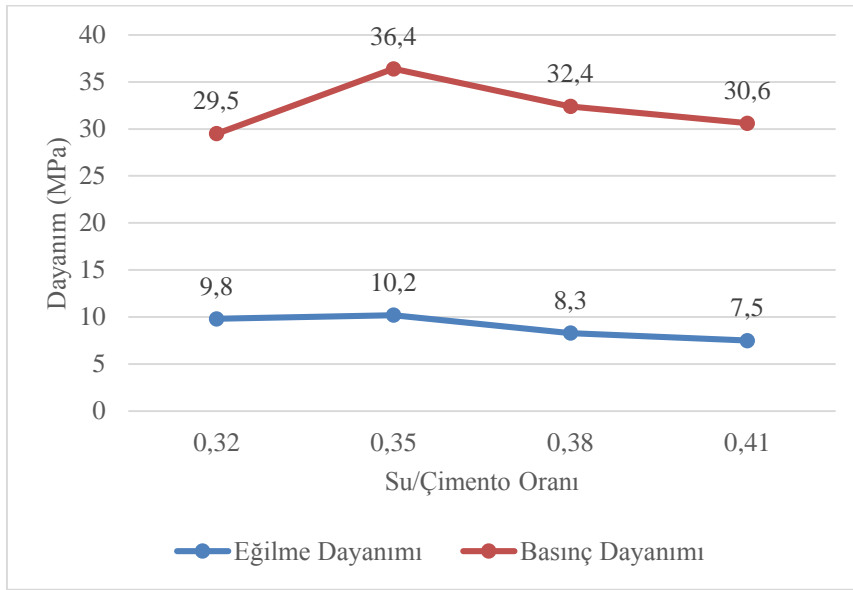
SSB örneklerinde çökme deneyi yapılmış, tasarlanan karışımların tamamında çökme değerleri sıfır olarak belirlenmiştir. Su/çimento oranının artmasına rağmen çökmenin sıfır olması, karışımda kullanılan ince yapılı taş tozu miktarının fazlalığına bağlanmıştır.

Farklı su/çimento oranına sahip silindirle sıkıştırılmış beton numunelerden elde edilen deney sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Eğilme dayanımı, basınç dayanımı, basınç altında su işleme derinliği ve aşınma değerleri ayrıca Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6’da grafikler halinde sunulmuştur.

Tablo 2. SSB örneklerinin, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, basınç altında su işleme derinliği ve aşınma değerleri

| SSB Kodu | Su/Çimento Oranı | Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³) | Basınç Dayanımı (MPa) | | Eğilme Dayanımı (MPa) | Basınç Altında Su İşleme Derinliği (mm) | Aşınma (mm) |
|----------|------------------|------------------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|-----------------------------------------|-------------|
| | | | 7 Gün | 28 Gün | | | |
| A | 0,32 | 2,56 | 17,3 | 29,5 | 9,8 | 29 | 20 |
| B | 0,35 | 2,57 | 28,6 | 36,4 | 10,2 | 34 | 21 |
| C | 0,38 | 2,56 | 23,7 | 32,4 | 8,3 | 35 | 21,5 |
| D | 0,41 | 2,54 | 19,1 | 30,6 | 7,5 | 36 | 22,5 |

Uygulamada yolun hızlı bir biçimde kullanıma açılması gerektiği göz önünde bulundurulduğunda, erken yaşta beton basınç dayanımının yüksek olması önem kazanmaktadır. 7 günlük beton basınç dayanımı sonuçları incelenecek olursa B kodlu ve s/ç oranı 0,35 olan silindir numuneler 28,6 MPa dayanım değeri vermiştir. Aynı karışım ile 28 günlük basınç dayanımı 36,4 MPa ve 28 günlük eğilme dayanımı 10,2 MPa olmak üzere en yüksek değerler elde edilmiştir.

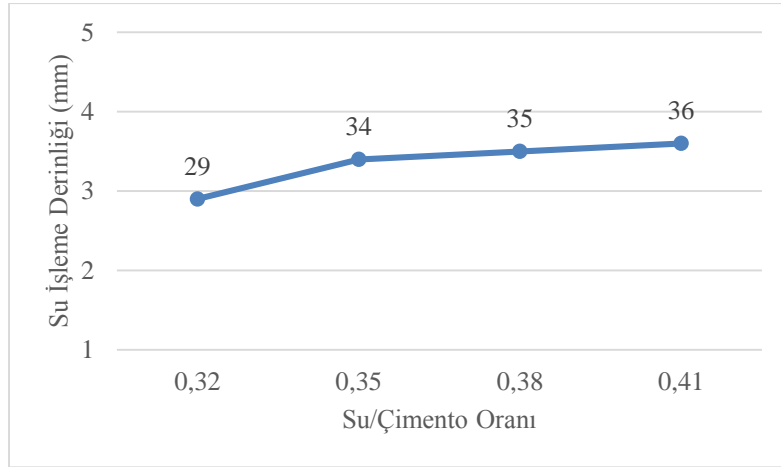


Şekil 4. 28 Günlük SSB örneklerinin eğilme ve basınç dayanım değerleri

28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde 0,35, 0,38, 0,41 s/ç oranlarında C 30/37 sınıfı beton hedefine ulaşılmıştır. TÇMB [25] silindirle sıkıştırılmış beton yollar teknik şartnamesinde belirtilen, silindirle sıkıştırılmış betonun minimum karakteristik basınç dayanım sınıfı C30/37 olması gerektiği koşulu sağlanmıştır. Bu koşul sadece s/ç oranı 0,32 olan A kodlu karışımda sağlanamamıştır.

Bunun nedeni karışımlarda yüksek miktarda ince malzeme (taş tozu) olması ve A kodlu karışımda diğerlerine göre çimento miktarının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Muhtemelen, ince malzeme ve çimento dozajı karışımın su gereksinimini arttırmış ve çimentonun hidrate olabilmesi için gerekli olan su miktarı yetersiz kalmıştır. SSB kuru kıvamlı ve çökme sıfır olacak şekilde üretildiğinden, üretim aşamasında bu olumsuzluk fark edilememiştir. Ayrıca basınç dayanımı testi için üretilen silindir numunelerin 3 tabaka halinde sıkıştırılması sonucunda, tabakalar arasında bölgesel boşluklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu boşluklar nedeniyle tabakalar arasında yeterli aderans sağlanamamış ve basınç dayanımı değerlerinde düşme meydana gelmiştir.

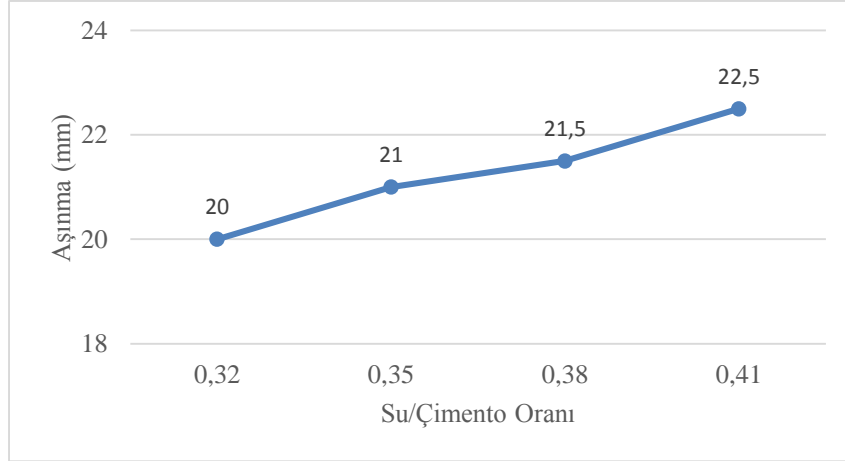
Eğilme dayanımı değerlerinde bütün s/ç oranlarında, TÇMB [41] silindirle sıkıştırılmış beton tasarım rehberinde istenilen minimum 4,2 MPa değerinin üzerine çıkmıştır. En yüksek eğilme dayanımı değerini 10,2 MPa olarak B kodlu örnekler, en düşük eğilme dayanımı değerini ise 7,5 MPa olarak D kodlu örnekler vermiştir.



Şekil 5. Farklı S/Ç oranlarında SSB örneklerinin basınç altında su işleme derinlikleri

Farklı su/çimento oranlarına sahip kontrol SSB örneklerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, S/Ç oranı düştükçe su işleme derinliğinin de azaldığı tespit edilmiştir. En düşük su işleme derinliği, A kodlu S/Ç oranı 0,32 olan SSB örneğinde, 29 mm olarak belirlenmiştir. Bu veriler beton karışımında su miktarının artmasıyla birlikte boşluk oranının da arttığının göstergesi olmuştur.

TS EN 206 [42] standardında belirtilen maksimum su işleme derinliği 50 mm'den düşük ve numunelerin ortalama su işleme derinliği 40 mm'den küçük olduğunda betonun su geçirimsiz, eğer bu ortalama 30 mm'den daha az ise zararlı sulara karşı da dirençli olduğu kabul edilmektedir. Bu standarda göre, üretmiş olduğumuz SSB örneklerinin tamamının 40 mm'den daha az su işleme derinliğine sahip oldukları için su geçirimsiz beton sınıfında olduklarını söylemek mümkündür.



Şekil 6. Farklı S/Ç oranlarında SSB örneklerinin aşınma değerleri

Aşınmanın testinde, aşındırıcı toz ile dönen diskin yüzeyde açmış olduğu oyuğun alt ve üst sınır çizgileri arasındaki mesafe ölçülmüştür. Bu mesafe arttıkça, SSB örnekleri yüzeyinde açılan oyuğun derinliği de orantılı olarak artacaktır. Aynı zamanda bu mesafe arttıkça, ona ters orantılı olarak malzemenin aşınma direnci düşmektedir. Grafik incelendiğinde, S/Ç oranı ile birlikte aşınma miktarında artış olduğu görülmektedir. En yüksek aşınma 22,5 mm olarak D kodlu ve S/Ç oranı 0,41 olan SSB örneğinde, en düşük aşınma A kodlu ve S/Ç oranı 0,32 olan SSB örneğinde tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Su/çimento oranı 0,32, 0,35, 0,38 ve 0,41 olarak üretilen SSB örnekleri üzerinde yapılan deneyler sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- SSB örneklerinde, A kodlu karışım hariç B, C ve D kodlu karışımlarda C 30/37 sınıfı beton dayanımına ulaşılmıştır.
- Eğilme dayanım değerleri A, B, C ve D olmak üzere tüm karışımlarda, beton yol uygulamaları için gerekli olan minimum 4,2 MPa dayanım değerini sağlamıştır.
- Basınç ve eğilme dayanımlarında en yüksek değerleri S/Ç oranı 0,35 olan karışım vermiştir.
- A kodlu karışım hariç tutulursa, S/Ç oranının artmasıyla birlikte basınç ve eğilme dayanımlarında düşüş tespit edilmiştir.
- S/Ç oranı arttıkça, SSB örneklerinde basınç altında su işleme derinliği ve aşınma miktarı da artmıştır.
- Basınç altında su işleme derinliği ve aşınma yönünden en iyi sonuçları S/Ç oranı 0,32 olan karışım vermiştir.

Ayrıca, basınç dayanımı testi için üretilen silindir numunelerin 3 tabaka halinde sıkıştırılması sonucu tabakalar arasında bölgesel boşluklar olduğu gözlemlenmiş ve bu boşluklar nedeniyle tabakalar

arasında yeterli aderansın sağlanamamış olmasının basınç dayanımı değerlerini olumsuz yönde etkilediği düşünülmüştür. Bu nedenle üretilecek olan SSB örneklerinin mümkünse tek tabaka halinde sıkıştırılması gerektiği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, üretim aşamasında vermiş olduğu katkılardan dolayı İnş.Yük.Müh. Ahmet Okan SAVAŞ'a teşekkür ederler.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını bildirmektedirler.

YAZARLARIN KATKILARI

İsmail KILIÇ: Kavramsallaştırma, metodoloji, gözetim ve liderlik sorumluluğu, analiz, yazma-orijinal taslak hazırlama, yazma-inceleme ve düzenleme. Saadet Gökçe GÖK: Veri toplama, inceleme, verinin düzenlenmesi, görselleştirme.

KAYNAKLAR

- [1] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. Hazaree, *Guide for Roller Compacted Concrete Pavements*, National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University, 2010.
- [2] N. Ağırlioğlu, *Baraj Planlama ve Tasarımı*, Su Vakfı Yayınları, c.2, s.259, İstanbul, 2005.
- [3] D. Luhr, *Roller Compacted Concrete Applications for Pavements*, Portland Cement Association, 2008.
- [4] M. Adamu, B.S. Mohammed and M.S. Liew, “Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica”. *Construction and Building Materials*, vol. 171, pp.521–538, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.138>.
- [5] C. D. Atiş, “Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition”, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp.1112–1121, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.037>.
- [6] C. Cao, W. Sun and H. Qin, “Analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash”, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 1, pp. 71–75, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00203-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00203-3).

- [7] M. Chi and R. Huang, “Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 45, pp. 148–156, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.001>.
- [8] L. Courard, F. Michel and P. Delhez, “Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 390–395, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.040>.
- [9] F. Debieb, L. Courard, S. Kenai and R. Degeimbre, “Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates”, *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 11, pp. 3382–3387, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.031>.
- [10] K. Jingfu, H. Chuncui and Z. Zhenli, “Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives”, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 42, no. 8, pp. 1117–1124, 2009, <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9447-x>.
- [11] A. Mardani-Aghabaglou, Ö. A. Çakır and K. Ramyar, “Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, no. 1, pp. 259–266, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.009>.
- [12] A. Meddah, M. Beddar and A. Bali, “Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 72, pp. 187–192, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.052>.
- [13] A. Modarres and Z. Hosseini, “Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material”, *Materials and Design*, vol. 64, pp. 227–236, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.072>.
- [14] C. Wang, W. Chen, H. Hao, S. Zhang, R. Song and X. Wang, “Experimental investigations of dynamic compressive properties of roller compacted concrete (RCC)”, *Construction and Building Materials*, vol.168, pp.671–682, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.112>.
- [15] X. Wang, S. Zhang, C. Wang, F. Liu, R. Song and P. Wei, “Initial damage effect on dynamic compressive behaviors of roller compacted concrete (RCC) under impact loadings”, *Construction and Building Materials*, vol. 186, pp.388–399, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.141>.
- [16] X. Wang, S. Zhang, C. Wang, R. Song, C. Shang and X. Fang, “Experimental investigation of the size effect of layered roller compacted concrete (RCC) under high-strain-rate loading”, *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 45–57, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.03>.

- [17] PCA, *Guide Specification for Construction of Roller Compacted Concrete Pavements*, Portland Cement Association, Haziran, 2004.
- [18] İ. Ö. Yaman, H. Ceylan, "Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar", *TMH*, 480, 60/2015-4, s:44-61, 2015.
- [19] K. Jingfu, H. Chuncui, and Z. Zhenli, "Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives", *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 42, no. 8, pp. 1117–1124, 2009, <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9447-x>.
- [20] K.D. Hansen and W.G. Reinhardt, *Roller Compacted Concrete Dams*, Mc Graw-Hill, pp. 298, 1991.
- [21] W. Adaska, *Roller Compacted Concrete (RCC)*, PCA Research & Development Information Serial No. 2975, Skokie, IL: Portland Cement Association, 2006.
- [22] G. Topličić-Ćurčić, D. Grdić, N. Ristić, and Z. Grdić, "Properties, materials and durability of rolled compacted concrete for pavements", *Zaštita materijala*, vol. 56, no. 3, pp. 345-353, 2015.
- [23] ACI Committee, *Guide to Roller-Compacted Concrete Pavements (ACI 327R-14)*, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2014.
- [24] R. F. Andriolo, *The Use of Roller Compacted Concrete*, Past-Press, ISSMFE, pp.554, Sao Paulo, 1998.
- [25] TÇMB, *Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yollar Teknik Şartnamesi*, Ankara, 2017.
- [26] K. H. Khayat, N. A. Libre and Z. Wu, *Roller Compacted Concrete for Rapid Pavement Construction. Technical Report*, 2019.
- [27] A. Benouadah, M. Beddar and A. Meddah, "Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber", *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 9, no. 2, pp. 623, 2017, <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i2.1>
- [28] S. M. Hejazi, S. M. Abtahi and F. Safaie, "Investigation of thermal stress distribution in fiber-reinforced roller compacted concrete pavements", *Journal of Industrial Textiles*, vol. 45, no. 5, pp. 896–914, 2016, <https://doi.org/10.1177/1528083714542827>
- [29] P. Sukontasukkul, U. Chaisakulkiet, P. Jamsawang, S. Horpibulsuk, C. Jaturapitakkul and P. Chindapasirt, "Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, no. e00271, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00271>
- [30] KGM, *Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2016.

- [31] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska and C. Hazaree, *Guide for Roller Compacted Concrete Pavements*, National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University, 2010.
- [32] ASTM C 1435, “*Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer*”, American Society for Testing and Materials, ASTM International, USA, 2014.
- [33] TS EN 933-1, “*Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini - Eleme Yöntemi*”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [34] TS EN 1097-6, “*Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini*”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [35] TS EN 12350-2, “*Beton- Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi*”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [36] TS EN 12350-6, “*Beton- Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk*”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [37] TS EN 12390-3, “*Sertleşmiş Beton Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini*”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [38] TS EN 12390-5, “*Sertleşmiş Beton Deney Numunelerinde Eğilme Dayanımının Tayini*”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [39] TS EN 12390-8, “*Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini*”, TSE, Ankara, 2019.
- [40] BS EN 1342, “*Setts of natural stone for external paving –Requirements and test methods*”, British Standard, 2000.
- [41] TÇMB, *Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar Tasarım Rehberi*, Ankara, 2018.
- [42] TS EN 206, “*Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk*”, TSE, Ankara, 2017.