

Atf İçin: Kılıç İ, Gök SG, 2021. Farklı Agregalarla Üretilen Silindire Sıkıştırılmış Betonların Donma-Çözülme Direncinin Araştırılması. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(4): 2849-2859.

To Cite: Kılıç I, Gök SG, 2021. Investigation of Freeze-Thaw Resistance of Roller Compacted Concretes Produced with Different Aggregates. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(4): 2849-2859.

Farklı Agregalarla Üretilen Silindire Sıkıştırılmış Betonların Donma-Çözülme Direncinin Araştırılması

İsmail KILIÇ^{1*}, Saadet Gökçe GÖK¹

ÖZET: Silindire sıkıştırılmış betonlar (SSB), geleneksel beton üretiminde kullanılan hammaddelerin kullanılmasıyla üretilen, üretim tekniğiyle kuru karışımla çalışılmaya olanak tanıyan, yol ve baraj inşaatlarında tercih edilen bir yapı malzemesidir. Bu deneysel çalışmada, silindire sıkıştırılmış beton üretiminde farklı agrega kullanımının, betonun donma-çözülme direncine etkisi araştırılmıştır. Silindire sıkıştırılmış beton üretiminde iri agrega olarak dolomit, bazalt, mermer ve kalker kullanılmıştır. Silindire sıkıştırılmış beton üretiminde, su/çimento oranı 0.35 ve taze halde çökme değeri sıfır olan beton karışımları hazırlanmış ve bu karışımlar iki kademe sıkıştırılarak kalıba yerleştirilmiştir. Numuneler, dökümden bir gün sonra kalıptan çıkartılarak kür havuzunda bekletilmiştir. Kirece doymun suda 90 gün boyunca bekletilen suya doymun küp numuneler, +20°C sıcaklıkta 12 saat, -20°C sıcaklıkta 12 saat olmak üzere tekrarlayan donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. 25, 50 ve 75 çevrim sonunda silindire sıkıştırılmış beton numunelerdeki ağırlık ve ultrases geçiş hızları kaydedilmiştir. 75 çevrim sonunda numunelerin ortalama basınç dayanımı ile verilerdeki standart sapma ve değişkenlik katsayısı değerleri belirlenmiştir. 75 donma-çözülme döngüsü sonunda, basınç dayanımı kaybı, dolomit agregası ile üretilen numunelerde %12.2, bazalt ile üretilenlerde %13.8, mermer ile üretilenlerde %3.3, kalker ile üretilenlerde %4.6 olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, agrega türünün silindire sıkıştırılmış betonların donma-çözülme dayanıklılığı üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Agregası, dayanıklılık, donma-çözülme döngüsü, ultrases geçiş hızı, silindire sıkıştırılmış beton

Investigation of Freeze-Thaw Resistance of Roller Compacted Concretes Produced with Different Aggregates

ABSTRACT: Roller compacted concretes are a building material that can be produced using the raw materials used in traditional concrete production, which allows working with dry mix with the production technique, and is preferred for use in road and dam constructions. In this experimental study, the effect of using different aggregates in roller compacted concretes on the freeze-thaw resistance of concrete was investigated. Dolomite, basalt, marble and limestone were used as coarse aggregates in the production of roller compacted concrete. In roller compacted concrete production, concrete mixtures with zero slump value and water/cement ratio of 0.35 were prepared, and these mixtures were compressed in two stages and placed in the mold. The specimens were demolded 24 h after casting and moist-cured. The water-saturated cube specimens, which were kept in lime-saturated water for 90 days, were subjected to repeated freeze-thaw cycles of 12 hours at +20°C and 12 hours at -20°C. At the end of 25, 50 and 75 cycles, the weight and ultrasonic pulse velocity (UPV) of roller compacted concrete specimens were recorded. At the end of 75 cycles, the average compressive strength, standard deviation and coefficient of variation values of the specimens were determined. At the end of 75 freeze-thaw cycles, the compressive strength loss was determined as 12.2% in the samples produced with dolomite aggregate, 13.8% in those produced with basalt, 3.3% in those produced with marble, and 4.6% in those produced with limestone. As a result of the experimental study, it was observed that the aggregate type was effective on the freeze-thaw resistance of the roller compacted concretes.

Keywords: Aggregate, durability, freeze-thaw cycle, ultrasonic pulse velocity, roller compacted concrete

¹ İsmail KILIÇ ([Orcid ID: 0000-0001-5556-512X](https://orcid.org/0000-0001-5556-512X)), Saadet Gökçe GÖK ([Orcid ID: 0000-0002-7879-1610](https://orcid.org/0000-0002-7879-1610)), Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: İsmail KILIÇ, e-mail: ismail.kilic@klu.edu.tr

GİRİŞ

Silindirle sıkıştırılmış betonlar (SSB), geleneksel betona göre kuru kıvama sahip, taze halde çökmenin sıfır olduğu betonlardır. Dayanıklılık özellikleri, düşük maliyet, hızlı ve kolay üretim, düşük hidratasyon ısı gibi avantajlarıyla sıklıkla karayolu, baraj ve havaalanı pisti inşaatlarında tercih edilmektedir (Pei-wei ve ark., 2006; Amarnath ve Ganesh Babu, 2011; Mardani-Aghabaglou ve ark., 2013). Erken yaşlardaki dayanımının yüksek olması, aşınma ve erozyon direnci gibi olumlu yönleriyle öne çıkan silindirle sıkıştırılmış betonların tasarımı farklı yöntemlerle yapılabilmektedir (Mardani-Aghabaglou ve ark., 2020).

Donma-çözülme direnci, betonun dayanıklılık özelliklerinden biridir. Betonun yapısı gereği, içerisinde kılcal boşluklar bulunmaktadır. Su/bağlayıcı oranı arttığında, kılcal boşluk hacminde artış meydana gelir ve malzemenin su emme kapasitesi artar. Kılcal boşluklardan beton içerisine giren su donduğunda, hacminde yaklaşık % 9 oranında bir artış meydana gelmektedir. Beton içerisinde bu hacim artışını karşılayabilecek miktarda boşluk bulunmadığında, donan su, beton içerisinde gerilmeler oluşturur, oluşan iç gerilmeler betonun çekme dayanımını aştığında betonda çatlak oluşumu gerçekleşir. Özellikle betonun suya doygun olması durumunda bu durum önem arz eder. Tekrar eden donma-çözülme döngüleri, beton yüzeyinde bozulmalara, dökülmelere, kesitte çatlaklara sebebiyet verebilmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanımı ile beton içinde sürüklenmiş hava boşluğu oluşturularak bu durumun engellenmesi mümkündür. Su/bağlayıcı oranını azaltarak daha geçirimsiz bir beton elde etmek de donma-çözülme direncini olumlu yönde etkileyecektir. Erken yaşlarda, betonun dona karşı korunması, priz gecikmesinin engellenmesi ve dayanım kayıplarının önlenmesi açısından önemlidir. Donma-çözülme direnci, betonun doygunluk derecesinden, geçirgenliğinden ve donabilecek su miktarından etkilenir (Mindess ve ark., 2003).

Silindirle sıkıştırılmış betonlar, geleneksel betona göre daha yeni bir yapı malzemesi olup bu malzemenin donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığı ve diğer özellikleri üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Dolen, 1991; Kilic ve Gok, 2021a; Mardani-Aghabaglou ve ark., 2013; Abbaszadeh ve Modarres, 2017; Rad ve Modarres, 2017; Zhang ve ark., 2018; Algin ve Gerginci, 2020; Kilic ve Gok, 2021b). Karışım oranları ve karışımda kullanılan bileşenler, silindirle sıkıştırılmış betonun donma-çözülme direnci üzerinde etkilidir (Ghafoori ve Cai, 1998; Delatte ve Storey, 2005; Hazaree ve ark., 2011). Silindirle sıkıştırılmış betonların dona karşı dirençlerinin geleneksel betona göre düşük olduğu ve don etkisi nedeniyle hava sürüklenmemiş betonlarda mikroçatlak oluşumunun gözlemlendiği birçok çalışmada bildirilmiştir. Üretim aşamasında laboratuvar koşulları ile saha koşullarının farklılığı nedeniyle meydana gelebilen değişiklikler ve bu tür kuru karışımların, saha koşullarında üretimde uygun bir hava boşluğu sistemi elde etmedeki zorluk sonuçları üzerinde etkili olabilmektedir. Uygun bağlayıcı miktarı ve beton tasarımı ile yeterli don direnci elde edilebilmektedir (PCA, 2004; Luhr, 2006). Sıkıştırma işlemi sırasında düzensiz hava boşlukları oluşmaktadır, silindirle sıkıştırılmış betonun yeterli don direncine sahip olabilmesi için donmaya dirençli agregalar kullanılarak üretilmesi, uygun hava boşluğu sistemine sahip olması, belirli bir olgunluk derecesine kadar uygun kür koşullarının sağlanması, böylece beton içerisinde donabilecek suyun azaltılması gerekir (Ragan, 1986).

Betonu oluşturan bileşenlerin kalitesi, beton özelliklerine doğrudan etki eder. Beton üretiminde kullanılan malzemeler arasında en büyük hacmi agregaların oluşturduğu düşünüldüğünde, agregaların özelliklerinin betonun fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerinde etkisi olacağı aşikardır. Agregalar, jeolojik oluşumlarına göre sınıflandırılırsa, magmatik (volkanik), sedimanter (tortul) ve metamorfik (başkalaşım) olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bu çalışmada, dolomit, bazalt, mermer ve

kalker agregaları kullanılarak silindire sıkıştırılmış beton üretimi yapılmış, agrega türünün silindire sıkıştırılmış beton numunelerin donma-çözülme direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışmada, bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosu ve karma suyu olarak Kırklareli şebeke suyu kullanılmıştır. Karışımlarda, iri agrega olarak dolomit, bazalt, mermer ve kalker olmak üzere dört farklı agrega türü kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir, ince agrega olarak ise bu agregaların yanı sıra doğal kum kullanılmıştır. Agregalar elenerek boyutlarına göre ayrılmış, kırmataş II (12-19 mm), kırmataş I (4-12 mm) ve kırmataş tozu (0-4 mm) olacak şekilde üç farklı boyutta kullanılmıştır. Her karışımda ayrıca 0-4 mm boyut aralığında doğal kum kullanılmıştır.

Dolomit, kireçtaşlarında sönmemiş kirecin yerini kısmen ya da tamamen kalsine manyezitin alması ile oluşan, masif yapılı, köşeli ve sert olan genellikle bej renkli taşlardır. Jeolojik kökenlerine göre, tortul taşlar olarak sınıflandırılmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan dolomit agregası Pınarhisar bölgesinden temin edilmiş olup iri agrega olarak dolomit kullanılan beton numunelerinde, D kodu kullanılmıştır.

Bazalt, volkanik taşlardan olup masif yapılı, sert ve dayanıklı bir taştır. Siyah ve koyu gri tonlu renklere sahiptir. Bu çalışmada kullanılan bazalt agregası, Afyon bölgesinden temin edilmiş olup bazalt kullanılarak üretilen numunelerde, B kodu kullanılmıştır.

Mermer, başkalaşım sonucunda kalkerin (kireçtaşı) yeniden kristalleşmesiyle meydana gelmektedir. Mermer, masif yapı ve taneli dokuya sahiptir. Bu taşın renkleri genellikle beyaz veya açık gridir. Kökenlerine göre başkalaşım taşlar olarak sınıflandırılmaktadır. Çalışmada kullanılan mermer agregası, Afyon bölgesinden temin edilmiş olup mermer agregası kullanılarak üretilen beton numuneleri M kodu ile ifade edilmiştir.

Kalker (kireçtaşı), kalsiyum karbonattan oluşan tortul bir kayadır. Kalker, oldukça sağlam ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Kökenlerine göre tortul taşlar olarak sınıflandırılmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan kalker agregası Silivri-Çatalca bölgesinden temin edilmiştir. Kalker agregasından üretilen silindire sıkıştırılmış beton numunelerinde K kodu kullanılmıştır.

Agregalara ilişkin fiziksel özellikler ve Los Angeles aşınma kaybı değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Agregaların özellikleri (Savaş, 2019)

Agrega Türü	Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (g cm ⁻³)	Özgül Ağırlık	Su Emme (%)	Los Angeles (LA) Aşınma Kaybı (%)
Dolomit	Kırmataş II	2.80	0.56	19.6
	Kırmataş I	2.80	0.37	
	Kırmataş Tozu	1.59	2.81	
		1.61	1.75	
Bazalt	Kırmataş II	1.90	2.81	10.6
	Kırmataş I	1.56	2.82	
	Kırmataş Tozu	1.63	2.83	
		1.80	1.56	
Mermer	Kırmataş II	1.60	2.70	42.9
	Kırmataş I	1.75	2.71	
	Kırmataş Tozu	1.89	2.74	
		1.60	1.92	
Kalker	Kırmataş II	1.68	2.80	24.8
	Kırmataş I	1.75	2.81	
	Kırmataş Tozu	1.64	2.82	
			1.16	
Doğal Kum		2.76	1.30	-

Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi'ne (KGM, 2006) göre yol kaplamalarında kullanılacak iri agregalar için aşınma kaybı %30'dan az olmalıdır. Deneylerde kullanılan iri agregalardan sadece mermer agregası bu sınır değerinin üzerine çıkmıştır. Farklı amaçla kullanılabilme ihtimali nedeniyle, deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Ayrıca TS 706 EN 12620+A1 standardına göre, binalarda kullanılacak agregalarda, 500 devir sonrası aşınma kaybının %50'nin altında olması gerekmektedir (TSE, 2009). Deneylerde kullanılan agregalarda bu değer sağlanmaktadır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan agrega karışımının granülometrisi Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Agrega granülometrisi

Agrega Türü	% Geçen Elek açıklığı (mm)													
	19	16	12,5	9,5	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.075	0.063	
Dolomit	100	86	73	68	63	49	41	32	22	11	5	3	2	
Bazalt	100	90	78	70	64	53	45	36	24	11	4	2	1	
Mermer	100	90	78	73	68	50	44	39	28	14	3	1	0	
Kalker	100	96	86	77	67	42	29	22	14	6	3	2	1	

Beton karışım miktarları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Beton karışım miktarları (1 m³)

Beton Kodu	S/Ç	Su (kg m ⁻³)	Çimento (kg m ⁻³)	Kırmataş II (kg m ⁻³)	Kırmataş I (kg m ⁻³)	Kırmataş Tozu (kg m ⁻³)	Doğal Kum (kg m ⁻³)
D	0.35	150	429	488	488	488	488
B	0.35	150	429	293	587	587	489
M	0.35	150	429	378	567	567	378
K	0.35	150	429	195	584	389	681

Çalışmada küp numuneler kullanılmıştır. Her agrega türü için 3 adet şahit, 3 adet ise donma-çözülme çevriminde kullanılmak üzere 6 numune üretilmiştir.

Metot

Farklı agregalarla yapılan karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.35 ve çökme sıfır olacak şekilde tasarım yapılmıştır.

ASTM C 1435 (ASTM, 2014) standardına göre silindirle sıkıştırılmış beton numunelerinin üretimi yapılmıştır. Sıkıştırma işlemi Şekil 1'de gösterilen, kalıp şekli ile uyumlu özel üretilmiş başlık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Küp numunelerin sıkıştırılma işlemi iki kademe gerçekleştirilmiştir. Her bir tabaka, 20 saniye boyunca sıkıştırılmıştır.

Çalışmada, 15 cm kenar uzunluklu küp numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler, üretimden bir gün sonra kalıptan çıkarılmış, donma-çözülme kabineye konana kadar, kür havuzunda ve kirece doymun suda 90 gün bekletilmiştir.

Silindirle sıkıştırılmış beton numuneleri, 90 gün boyunca kür havuzunda, kirece doymun suda bekletildikten sonra tekrarlayan donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır. Her bir çevrim, 12 saat süresince +20°C sıcaklık ve 12 saat süresince -20°C sıcaklıkta bekletme aşamalarından oluşmaktadır. Her bir çevrim, 1 günlük zaman dilimine denk gelmektedir. 25, 50 ve 75 çevrim sonunda numuneler tartılarak ağırlıkları kaydedilmiş, ultrases geçiş hızı, Şekil 2'de gösterilen Proceq marka Pundit PL-200 ultrasonik test cihazı ile belirlenmiştir. Dört farklı iri agrega kullanılarak üretilen silindirle sıkıştırılmış beton numunelerinde ultrases geçiş hızı ASTM C 597 (ASTM, 2002) standardına göre tespit edilmiştir.



Şekil 1. SSB üretim aşaması



Şekil 2. Ultrasonik test cihazı

Basınç dayanımı deneyi 75 çevrim donma-çözölmeye maruz kalan küp numuneler ile şahit numuneler üzerinde yapılmıştır. Silindirle sıkıştırılmış beton numunelerinde basınç dayanımı, TS EN 12390-3 standardına göre belirlenmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Donma-çözölme etkisine maruz bırakılmayan (şahit) numunelerdeki ortalama ultrases geçiş hızları Çizelge 4'te verilmiştir.

ASTM C 597'ye (ASTM, 2002) göre ultrases geçiş hızı 3.5 ile 4.5 km s⁻¹ arasındaysa beton kalitesi iyi kabul edilir. Farklı agregalar kullanılarak üretilen tüm SSB numunelerinde ultrases geçiş hızının 3.5 km s⁻¹'den büyük olduğu görölmektedir. Mermer ve kalker ile üretilen numunelerde beton kalitesi iyi iken, dolomit ve bazalt ile üretilen numunelerde ultrases geçiş hızı 4.5 km s⁻¹'den büyük olduğundan, bu agregalarla üretilen numunelerde ASTM C 597 (ASTM, 2002) tanımına göre beton kalitesinin çok iyi olduğu söylenebilir.

Çizelge 4. Donma-çözölme etkisine maruz bırakılmayan numunelerde ultrases geçiş hızı

	Ortalama Ultrases Geçiş Hızı (km s ⁻¹)	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	4.83	0.09	1.86
B	4.73	0.04	0.85
M	4.19	0.06	1.43
K	3.80	0.30	7.89

Donma-çözölme etkisine maruz kalmayan numuneler incelendiğinde, değişkenlik katsayılarının düşük olduğu ve dağılımların homojen olduğu ifade edilebilir. Kalker ile üretilen numunelerde ortalama ultrases geçiş hızı daha düşük, değişkenlik katsayısı ise daha büyük olmuştur. Ultrases geçiş hızının büyük olduğu numunelerde, boşluk miktarının daha az olduğu söylenebilir, buna bağlı olarak bu numunelerde geçirimsizliğin daha az olması ve basınç dayanımının daha büyük olması beklenmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, dolomit agregası ile üretilen numunelerde beton kalitesinin daha iyi

olması beklenmektedir. Bu sonucun elde edilmesinde, sıkıştırma işlemi de etkili olmaktadır. Sabit sıkıştırma süresinde daha iyi sıkışan numuneler, daha düşük boşluk oranına sahip olacağından basınç dayanımı, beton durabilitesi ve beton kalitesi de bu durumdan etkilenecektir.

Şahit numunelerin basınç dayanımları Çizelge 5'te verilmiştir. Burada, beton basınç dayanımı sonuçlarının ultrases geçiş hızı verileriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Ultrases geçiş hızı büyük olan numunelerde, daha büyük basınç dayanımı elde edilmiştir. Tahribatsız bir deney yöntemi olan ultrases geçiş hızının belirlenmesi, beton içerisindeki boşluk miktarı hakkında bilgi verdiği için, dolaylı olarak beton basınç dayanımı hakkında fikir verebilmektedir. Bununla birlikte, ölçüm alınan nokta değişikçe ultrases geçiş hızı değerlerinde değişme olacağı ve sıkıştırma yönünün de elde edilen sonuçlar üzerinde etkili olabileceğinin göz önünde bulundurulmasında fayda vardır. Şahit numunelerin beton basınç dayanımları incelendiğinde, standart sapmaların düşük, değişkenlik katsayılarının da buna bağlı olarak düşük ve dağılımın homojen olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. Donma-çözülme etkisine maruz bırakılmayan numunelerin basınç dayanımları

	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	78.8	0.6	0.76
B	68.8	3.1	4.51
M	48.2	1.7	3.53
K	47.5	1.2	2.53

25 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerdeki ağırlık değişimleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. 25 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerin ağırlık değişimi

	Ortalama Ağırlık Değişimi (%)	Standart Sapma (%)	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	-0.85	0.28	32.94
B	-1.58	0.20	12.66
M	-1.68	0.48	28.57
K	-4.34	0.09	2.07

25 donma-çözülme döngüsünün ardından, numunelerde bir miktar ağırlık kaybı görülmüştür ancak belirgin bir çatlak oluşumu ya da numune yüzeyinde hasar gözlenmemiştir. En fazla ağırlık değişiminin kalker ile üretilen agregalarda olduğu görülmektedir. Öte yandan, bu çizelgede değişkenlik katsayılarının arttığı, dolomit ve mermer agregaları ile üretilen numunelerde dağılımın homojenlikten uzaklaştığı görülmektedir.

25 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri Çizelge 7'de verilmiştir. Burada da en yüksek ultrases geçiş hızı değerleri, dolomit agregası ile üretilen silindirle sıkıştırılmış beton numunelerinde elde edilirken, en düşük değerlerin kalker agregası ile üretilen numunelerde olduğu görülmektedir. Bazı agrega türleri için, donma-çözülme etkisine maruz bırakılmayan numunelerde daha düşük ultrases geçiş hızı değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu sonucun elde edilmesinde sıkıştırma işleminin etkili olduğu, farklı numuneler üzerinden ve farklı noktalardan alınan ölçümlerin sonuçları değiştirmiş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, numune yaşlarının farklı oluşu ve devam eden hidrasyon reaksiyonunun boşluk yapısını etkilemesi de sonuçlar üzerinde etkili olabilmektedir.

50 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerdeki ağırlık değişimleri Çizelge 8'de verilmiştir. Ağırlıklardaki azalmanın artan çevrim sayısı ile birlikte arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, numunelerde 50 çevrim sonunda dağılıma, parçalanma gibi bir durumla karşılaşılması.

Çizelge 7. 25 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerde ultrases geçiş hızı (km s^{-1})

	Ortalama Ultrases Geçiş Hızı (km s^{-1})	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	4.95	0.02	0.40
B	4.61	0.08	1.74
M	4.44	0.14	3.15
K	4.14	0.25	6.04

Çizelge 8. 50 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerin ağırlık değişimi

	Ortalama Ağırlık Değişimi (%)	Standart Sapma (%)	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	-0.97	0.25	25.77
B	-1.82	0.16	8.79
M	-1.72	0.69	40.12
K	-4.40	0.05	1.14

50 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri Çizelge 9'da verilmiştir. Ultrases geçiş hızı değerlerine göre 50 çevrim sonunda beton kalitesinin iyi seviyelerde olduğu görülmektedir.

Çizelge 9. 50 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerde ultrases geçiş hızı (km s^{-1})

	Ortalama Ultrases Geçiş Hızı (km s^{-1})	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	4.92	0.00	0.00
B	4.56	0.09	1.97
M	4.42	0.13	2.94
K	4.13	0.22	5.33

75 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerdeki ağırlık değişimleri Çizelge 10'da verilmiştir. En fazla ağırlık değişimi, 75 çevrim sonunda da, kalker agregası ile üretilen numunelerde gözlenmiştir.

75 çevrim sonunda en az ağırlık değişiminin dolomit agregası ile üretilen numunelerde olduğu görülmektedir. Öte yandan, saha koşullarının laboratuvardaki sıkıştırma koşullarından farklı olabileceği öngörüldüğünden, uygulamada boşluk yapısının farklı olabileceği ve bu durumun donma-çözülme direnci üzerinde etkili olabileceğinin vurgulanmasında fayda bulunmaktadır.

Çizelge 10. 75 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerin ağırlık değişimi

	Ortalama Ağırlık Değişimi (%)	Standart Sapma (%)	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	-1.27	0.19	14.96
B	-2.16	0.15	6.94
M	-1.74	0.39	22.41
K	-4.75	0.10	2.11

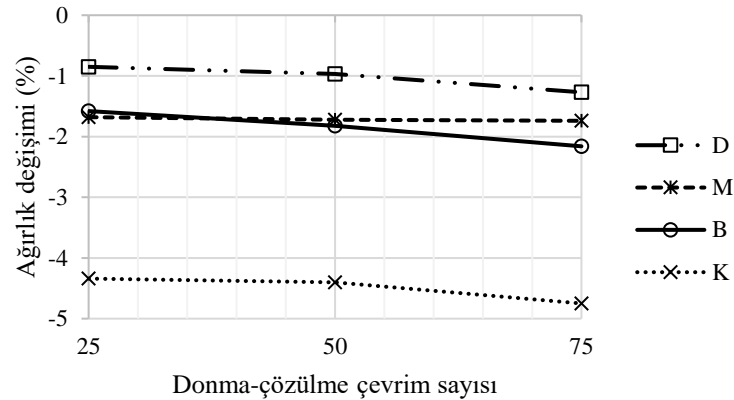
75 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri Çizelge 11'de verilmiştir. Ortalama ultrases geçiş hızı değerlerine göre beton kalitesi iyi seviyelerde olmasına rağmen, ultrases geçiş hızı değerlerinde belirgin bir düşüş olması nedeniyle deney 75 çevrim sonunda sonlandırılmıştır.

Çizelge 11. 75 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerde ultrases geçiş hızı (km s^{-1})

	Ortalama Ultrases Geçiş Hızı (km s^{-1})	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	4.90	0.03	0.61
B	4.55	0.17	3.74
M	4.33	0.23	5.31
K	4.04	0.27	6.68

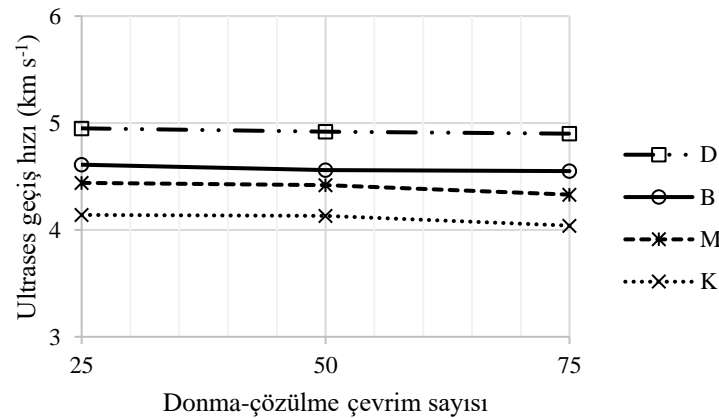
Donma-çözülme çevrim sayısına bağlı olarak ağırlık değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Sıkıştırma derecesinin elde edilen sonuçlarda ve ağırlıklar arasındaki farkta etkili olduğu söylenebilir.

Çevrim sayısından bağımsız olarak en fazla yüzdece ağırlık kaybı, kalker ile üretilen numunelerde olmuştur. En az ağırlık kaybının dolomit agregası kullanılarak üretilen silindirle sıkıştırılmış beton numunelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Donma-çözülme sayısına bağlı olarak ağırlık değişimi

Agrega türüne göre, donma-çözülme çevrim sayısına bağlı olarak ultrases geçiş hızının değişimi Şekil 4'te verilmiştir. En düşük ultrases geçiş hızı değerleri kalker kullanılarak üretilen silindirle sıkıştırılmış betonlarda elde edilmiştir.



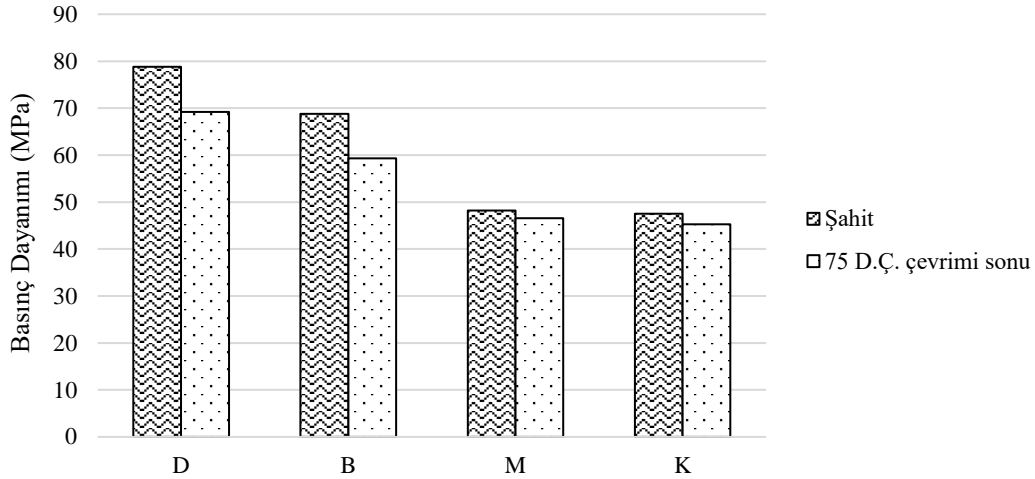
Şekil 4. Ultrases geçiş hızının donma-çözülme çevrim sayısına bağlı değişimi

Ultrases geçiş hızının en yüksek olduğu numuneler, dolomit kullanılarak üretilen silindirle sıkıştırılmış betonlar olmuştur.

75 donma-çözülme çevrimi sonunda deneyler sonlandırılmış ve numuneler üzerinde basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Basınç deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 12'de verilmiştir. Donma-çözülme etkisine maruz bırakılmayan numunelerin basınç dayanımları ile 75 donma-çözülme çevrimi sonunda elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 5'te grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 12. 75 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerin basınç dayanımı (MPa)

	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı (%)
D	69.2	5.9	8.53
B	59.3	1.8	3.04
M	46.6	2.0	4.29
K	45.3	1.0	2.21



Şekil 5. Basınç dayanımı

Farklı çalışmalarda, betonun don direnci üzerinde etkili olan en önemli faktörün, çimento hamurunun düzgün dağılmış hava gözenek sistemi bulundurması olduğu belirtilmiştir (Pigeon ve ark., 1996; Janssen, 1997; Şahin, 2003). Geleneksel betonda, düzgün dağılmış hava boşlukları hava sürükleyici katkı kullanımıyla oluşturulabilmekte, bu şekilde betonun donma-çözülme dayanıklılığı artırılabilir. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, sıkıştırma işleminden kaynaklanan düzensiz dağılımlı gözenek sistemi oluşması donma-çözülme dayanıklılığı üzerinde olumsuz etki yaratabilmektedir. 75 çevrim sonundaki basınç dayanımları incelendiğinde, silindirle sıkıştırılmış betonlarda dayanım kaybı görülmektedir, bu kayıp düşük dayanımlı numunelerde daha az olmuştur. 75 donma-çözülme döngüsü sonunda, basınç dayanımı kaybı, dolomit agregası ile üretilen numunelerde %12.2, bazalt ile üretilenlerde %13.8, mermer ile üretilenlerde %3.3, kalker ile üretilenlerde %4.6 olarak saptanmıştır. En düşük ortalama basınç dayanımı kalker ile üretilen numunelerde elde edilmekte olup 75 donma-çözülme çevrimi neticesinde bu numunelerde ortalama basınç dayanımı 45.3 MPa olarak kaydedilmiştir. Deneysel çalışmada, agrega türünün silindirle sıkıştırılmış betonun donma-çözülme dayanıklılığı üzerinde etkili olduğu görülmüş, mermer ve kalker ile üretilen numunelerde nihai dayanım daha düşük olmasına rağmen donma-çözülme etkisi sonucunda dayanım kayıpları daha düşük seviyelerde olmuştur. Bu sonucun elde edilmesinde, daha boşluklu yapının donan suyun hacim genişlemesine izin vermesi etkili olmuş, bu boşluklu yapı ise daha düşük basınç dayanımı değerleriyle sonuçlanmıştır. Geleneksel beton üretiminde hava sürükleyici katkı kullanımının donma-çözülme dayanıklılığını artırması ancak beton basınç dayanımında katkısız numunelere göre düşüş meydana getirmesi de bu sonucu destekler niteliktedir. Geleneksel beton üretiminde, bu çalışmada elde edilen verileri destekleyecek şekilde, agrega türünün betonun donma-çözülme etkisine olan direncini etkilediğini gösteren çalışmalar mevcuttur (Şengül ve ark., 2003). Betonun donma-çözülme dayanıklılığı üzerinde, su/bağlayıcı oranı, çekme dayanımı, sıcaklık ve nem durumunu belirten kür koşulları, donma hızı, betondaki boşluk yapısı, boyut ve dağılımı, boşlukların aralarındaki bağlantı şekli, betonun doygunluk derecesi, donabilecek su miktarı gibi faktörler etkilidir (Şengül ve ark., 2003). Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, bu faktörlere ek olarak boşluk yapısını değiştiren sıkıştırma işleminin de etkili olacağı düşünülmektedir.

SONUÇ

Çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Donma-çözülme etkisine maruz bırakılmayan numunelerde, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerlerine bakılarak dolomit agregası ile üretilen silindirle sıkıştırılmış beton numunelerin beton kalitesinin en iyi olduğu söylenebilir.
- Bazalt ve dolomit agregası ile üretilen numunelerde, mermer ve kalkerle üretilenlere göre daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Bazalt ve dolomitin, taş türü olarak diğerlerinden daha sert ve dayanıklı olmaları bu sonucun elde edilmesinde etkili olmuştur.
- Agregat türü, silindirle sıkıştırılmış betonun donma-çözülme dayanıklılığı üzerinde etkili olmuştur.
- Mermer ve kalker ile üretilen SSB numunelerde basınç dayanımı daha düşük olmuş, buna karşın donma-çözülme etkisi sonucunda dayanım kayıpları daha az olmuştur. Kireçtaşı ve kireçtaşının başkalaşımı sonucu oluşan mermerin yüksek oranda $CaCO_3$ içermesi, agregalardaki gözeneklilik miktarı ya da karışımlardaki agregat granülometrisinin farklılığı böyle bir sonucun oluşmasında etkili olmuş olabilir.
- Bu konu ile ilgili olarak ilerleyen çalışmalarda, donma-çözülme çevrim sayısının artırılması, bu çalışmada uygulanan kütleli donma deneyleri yerine yüzeysel donma deneylerinin uygulanması, hava sürükleyici katkı kullanımı ile SSB üretimi yapılarak katkı kullanımının donma-çözülme direnci üzerindeki etkisinin incelenmesi, saha koşullarını birebir temsil eden silindirle sıkıştırılmış beton uygulamalarının uzun süreli yerinde gözlenmesi ile araştırmaların artırılması faydalı olacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, deneysel çalışmalardaki katkılarından dolayı İnş. Yük. Müh. Ahmet Okan Savaş'a teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar, makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

KAYNAKLAR

- Abbaszadeh R, Modarres A, 2017. 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.
- Algin Z, Gerginci S, 2020. Freeze-Thaw Resistance and Water Permeability Properties of Roller Compacted Concrete Produced with Macro Synthetic Fibre. *Construction and Building Materials*, 234, 117382, 1-9.
- Amar Nath Y, Ganesh Babu K, 2011. Transport Properties of High Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33 (10): 1057-1062.
- ASTM C 1435, 2014. "Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer". American Society for Testing and Materials, ASTM International, USA.
- ASTM C 597, 2002. "Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete". American Society for Testing and Materials, ASTM International, USA.
- Delatte N, Storey C, 2005. Effects of Density and Mixture Proportions on Freeze-Thaw Durability of Roller-Compacted Concrete Pavement. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1914 (1): 45-52.
- Dolen TP, 1991. Freezing and Thawing Durability of Roller-Compacted Concrete. *ACI Symposium Publication*, 126, 101-114.

- Ghafoori N, Cai Y, 1998. Laboratory-Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash: Part II—Long-Term Durability. *Materials Journal*, 95 (3): 244-251.
- Hazaree C, Ceylan H, Wang K, 2011. Influences of Mixture Composition on Properties and Freeze-Thaw Resistance of RCC. *Construction and Building Materials*, 25, 313-319.
- Janssen DJ, 1997. The Influence of Material Parameters on Freeze-Thaw Resistance with and without Deicing Salt, *Frost Resistance of Concrete*. Edited by M.J. Setzer and R. Auberg, E&FN SPON, 3-10, New York, USA.
- Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi, 2006. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kilic I, Gok SG, 2021a. A Study on Investigating the Properties of Alkali-Activated Roller Compacted Concretes, *Advances in Concrete Construction*, 12 (2): 117-123.
- Kilic I, Gok SG, 2021b. Strength and Durability of Roller Compacted Concrete with Different Types and Addition Rates of Polypropylene Fibers, *Revista de La Construcción*, 20 (2): 205-214.
- Luhr DR, 2006. Frost Durability of Roller-Compacted Concrete Pavements: Research Synopsis. 1-4.
- Mardani-Aghabaglou A, Andıç-Çakır Ö, Ramyar K, 2013. 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.
- Mardani-Aghabaglou A, Bayqra SH, Özen S, Altun MG, Faqiri ZA, Ramyar K, 2020. Silindire Sıkıştırılmış Beton Karışımlarının Tasarım Yöntemleri ve Yapılan Çalışmalar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (3): 419-431.
- Mindess S, Young JF, Darwin D, 2003. *Concrete*, Second Edition, Prentice Hall Pearson Education Inc., New Jersey, ABD.
- Pei-wei G, Sheng-xing W, Ping-hua L, Zhong-ru W, Ming-shu T, 2006. The Characteristics of Air Void and Frost Resistance of RCC with Fly Ash and Expansive Agent. *Construction and Building Materials*, 20 (8): 586-590.
- Pigeon M, Marchand V, Pleau R, 1996. Frost Resistant Concrete. *Construction and Building Materials*, 10 (5): 339-347.
- Portland Cement Association, 2004. Frost Durability of Roller-Compacted Concrete Pavements, Research and Development Bulletin RD 135, Service d'Expertise en Matériaux Inc., Canada.
- Rad SAM, Modarres A, 2017. 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.
- Ragan SA, 1986. Evaluation of the Frost Resistance of Roller-Compacted Concrete Pavements. *Transportation Research Record 1062*, TRB, National Research Council, 25-32, Washington.
- Savaş AO, 2019. Farklı Tür Agregalarla Üretilen Silindire Sıkıştırılmış Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış)*.
- Şahin R, 2003. Normal Portland Çimentolu Betonların Don Direncinin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu ve Hasar Analizi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış)*.
- Şengül Ö, Taşdemir C, Kuruç Ş, Sönmez R, 2003. Agregaların Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisi. III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Aralık 2003, İstanbul, 43-50.
- TS 706 EN 12620+A1, 2009. "Beton agregaları". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2003. "Sertleşmiş Beton Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini" Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Zhang W, Zhang J, Chen S, Gong S, 2018. Degradation of Roller-Compacted Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycles and Immersion in Potassium Acetate Solution. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, Article ID 4282181, 8 pages. DOI: 10.1155/2018/4282181.