Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 23, Sayı 1, 2018 ARAŞTIRMA

DOI: 10.17482/uumfd.419244

ELEKTRİKSEL DİRENÇ İLE ISITMA YOLUYLA UYGULANAN KÜRÜN BETON ÖZELİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet CANBAZ [*]
Muammer AKÇAY [**]
Semih ERGİN [***]

Alınma:14.05.2016; düzeltme: 15.11.2017; kabul:16.04.2018

Öz: Soğuk havalarda beton karma suyunun donması betonda dayanım kaybına ve geçirimliliğe neden olmaktadır. Ayrıca soğuk hava koşullarında beton prizini oldukça yavaş alır. Bu çalışmada, soğuk havada hızlı priz alan beton üretilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla elektriksel direnç kullanılarak beton içeriden ısıtılmış ve kısa sürede betonun prizini tamamlaması sağlanmıştır. Isıtma için kullanılan kablo farklı boy ve farklı şekillerde kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Hazırlanan beton karışımı bu kalıplara yerleştirilerek derin dondurucuya konulmuştur. Derin dondurucuda -15, -20, -25 derece ortam sıcaklıklarında priz alıncaya kadar bekletilmiştir. Betonun priz alma sürecindeki sıcaklığı her 30 dakikada bir ölçülmüştür. Bu yöntemle soğuk hava koşullarına rağmen 4,5 saat gibi kısa bir sürede beton priz almıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler kür havuzuna bırakılmıştır. 7. ve 28. günde numunelerden kesilerek alınan 8 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda betonun birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı, su emme, ultrases geçiş hızları hesaplanmıştır. Oldukça düşük sıcaklıklarda elektrik direnci ile ısıtma sayesinde betonun prizini tamamlamasının beton özelikleri üzerinde olumlu etkileri gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektriksel Direnç, Beton, Soğuk Hava, Fiziksel ve Mekanik Özelikler

Effect of Heat Curing with Electrical Resistance on the Concrete Properties

Abstract: Freezing of the concrete mix water in cold weather caused strength loss of concrete and permeability. Besides, the setting of concrete is accomplished slowly in the cold weather conditions. In this study, the main goal is the production of quickly setting concrete in a cold weather. For this purpose, the inner side of a concrete part is heated by an electrical resistance and therefore the setting of concrete is completed in a short while by this way. The cable for heating purpose is placed with different lengths and shapes in the template. Prepared concrete mix is placed this templates in deep freeze. They are waited until setting period of concrete in deep freeze at -15, -20, -25 degrees ambient temperature. The concrete temperature during the setting period of concrete is measured. The concrete is set in a short time such as 4.5 hours though by using this method in the cold weather conditions. Samples were removed from the mold and left to cure pool. After having experiments on 8 cm cube samples cut form the samples day 7th and 28th day, the unit weight of concrete, compressive strength, water absorption, ultrasonic pulse velocity are calculated. Completion of concrete setting through heating electrical resistance at very low temperatures has had a positive impact on the concrete characteristics.

Keywords: Electrical Resistance, Concrete, Cold Weather, Physical and Mechanical Properties.

[*] İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
[**] Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye.
[***] Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
İletişim Yazarı: Yrd. Doç. Dr. Mehmet CANBAZ (mcanbaz@ogu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Soğuk iklim bölgelerinde kar yağışı ve buzlanma uzun süre etkili olabilmektedir. Özelikle dış hava koşullarına açık beton yollar, kaldırımlar, köprüler, pistler bu etkiler altındadır. Kar ve buzun temizlenmesi yoğun emek harcanarak uzun bir sürede yapılmaktadır. Buz çözücü tuzların kullanılması durumunda ise, hem betona hem de çevredeki doğal ortama zarar verilmektedir. Şekil 1'den de görüldüğü gibi, elektrik direnci kullanılarak beton yollar ısıtılabilmektedir (Devi 2012). Sertleşmiş betonların soğuk dış ortam koşullarında üzerinde oluşabilecek buz ve karların eritilmesi için beton üretimi sırasında nikel parçacıkları katılmış ve verilen gerilim ile elektriksel ısıtma sağlanmıştır. Oluşan ısının beton üzerindeki kar ve buzu kısa sürede erittiği belirtilmiştir (Zhang vd. 2011). Elektriksel olarak iletken betonun normal betonla kaplanması ile üzerindeki karların eritilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır (Tumidajski 2003). Bunların dışında beton içerisine elektriksel direnç yerleştirilerek binaların ısıtılması için çeşitli çalışmalar da yapılmıştır (Jacobsz vd. 2017; Olesen, 2001). Beton ve üzerindeki kaplamaların çeşitli etkilere karşı davranışını belirlemek için elektriksel direnç ölçüm yöntemleri kullanılmıştır (Mei vd. 2000). Çimento kompozitlerinin de farklı malzemeler kullanılarak elektriksel ve ısısal özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar da mevcuttur (Chung 2001). Ayrıca betonarmede donatının korozyonunu engellemek için elektrik akımından faydalanılarak katodik koruma uygulanmaktadır (Xu vd. 2009). Portland çimento hamuru üzerine uygulanan elektrik alan çevrimlerinin mikro yapıda boşluk yapısı ve ağının, kapillerite üzerinde etkili olduğu görülmüştür (Sohn vd. 1998). Taze haldeki uçucu küllü betonların hidratasyon gelişimini belirlemek için de elektriksel dirençlerden yararlanılmıştır (Xiao vd. 2008). Taze haldeki çimento pastasından elektrik akımı geçirilerek ısıtılması yolu ile priz süreleri kısaltılabilmektedir (Topçu vd. 2012). Beton üzerinde yapılan elektriksel ölçümlerde kullanılan aletlerin frekans değişimlerinin de malzeme davranışına etkisi olduğu görülmüştür (Wilson vd. 1990). Soğuk hava koşullarında beton dökümü yapıldığında önlem alınmaz ise, beton yapımında kullanılan su donar. Beton taze halde olduğu için hacminde bir artma oluşur. Çimento ile hidratasyon reaksiyonlarını yapacak suyun bir kısmı donduğu için beton yeterli dayanım kazanamaz. Hava sıcaklığının veya uygulanacak kür yöntemleri ile beton sıcaklığının arttırılması durumunda su çözülür ve çimento ile reaksiyona devam eder. Ancak buzun erimesi ile oluşan boşluğu dolduracak kadar hidratasyon ürünü oluşmaz ve beton dayanımı az, geçirgenliği yüksek olur (ACI 1994). Beton sıcaklığının düşük olması priz süresini arttırır. Dayanım kazanma hızını düşürür ve hatta durmasına sebep olur. Bu sürenin artması kalıp alma süresini de arttırır (Topçu vd. 2005, Topçu vd. 2002). Bu yüzden ekonomik olarak da olumsuz etkiler oluşmaktadır. Sıcaklıktaki 10 ^{o}C'lik azalma, priz süresini iki kat arttırmaktadır. Bu amaçla taze beton aşamasında prizin kısa sürede alınabilmesi için betonun belirli bir sıcaklıkta tutulması gerekir.



Şekil 1:
Yolların elektrikle ısıtılması (Devi, 2012).

Antifriz kullanılarak suyun donma noktası düşürülüp oluşabilecek buzun betona zararı engellense de, betonun priz süreci oldukça yavaş gerçekleştiğinden bu aşamada yapılacak soğuktan bakım verimli olmamakla birlikte maliyetli olabilmektedir. Bu çalışmada, betonun soğuk hava koşullarında hızlı priz alabilmesi amacı ile beton içine kablo döşenerek elektrik direnci ile ısıtılmıştır. Daha önce bu amaçla yürütülen bir uygulama olmadığı için kablo ile betonun ısıtılmasının farklı amaçlar için etkili olarak kullanımı açıklanmıştır. Yapılan deneysel çalışma ile de bu yöntemin soğuk hava koşullarında priz süresine ve sertleşmiş betonun fiziksel ve mekanik özeliklerine etkisi belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

2.1.1. Çimento

Bu çalışmada ÇİMSA Eskişehir Çimento fabrikasında üretilen CEM I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özelikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özelikleri

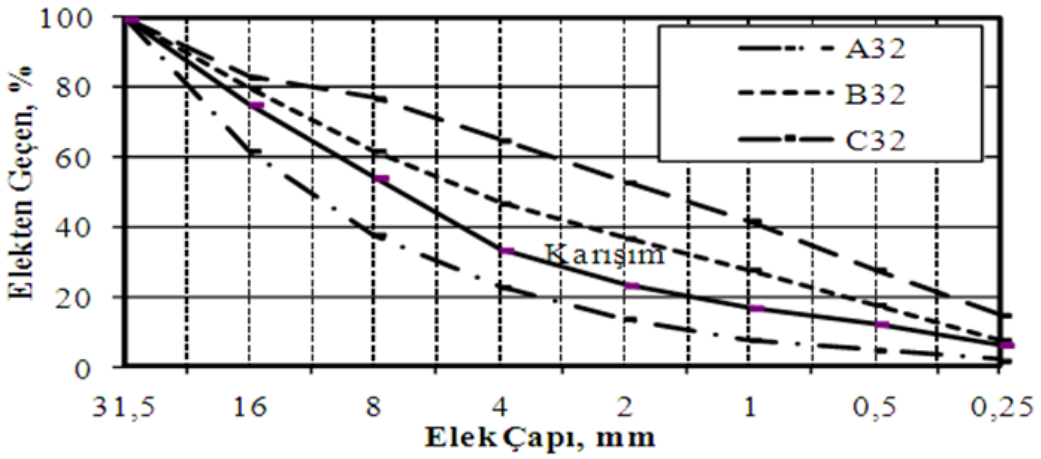
Bileşim	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	SO_3	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
%	19,42	4,47	2,7	1,21	63,8	0,28	0,59	2,89	65,36	6,39	7,28	8,22
Özgül Ağırlık	incelik, cm^2/g	90µ, %	45 µ, %	Kıvam suyu,%	Priz Başlama, dk.		Priz sonu, dk		Basınç Dayanımı, MPa			
									1gün	2gün	7gün	28gün
3060	3455	0,4	4,6	27	185		285		14,2	25,2	44,9	59,8

2.1.2. Su

Çalışmada Eskişehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.3. Agrega

Çalışmada 0-4 mm kırmakum, 4-16, 16-32 mm kırmataş kullanılmıştır. Agrega karışımının granülometri eğrisi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2:
Agrega granülometrisi.

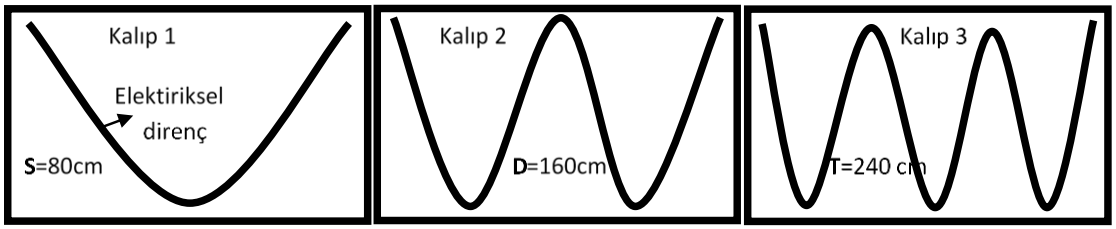
2.2. Metot

Agrega karışımı 0-4 mm kırmakumdan % 40, 4-16 mm kırmataştan % 10, 16-32 mm kırmataştan % 50 alınarak hazırlanmıştır. Beton üretiminde dozaj 350, su-çimento oranı ise 0,55 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan beton karışımı Şekil 3'te görülen kalıba yerleştirilmiştir. Kalıp 3 gözlü olup her bir göz 8x50x70 cm ebatlarındadır. Gözlerin her birinin ortalarına sarmal şeklinde sırası ile 80, 160, 240 cm elektrik rezistansı beton dökümünden önce yerleştirilmiştir.



Şekil 3:
Kalıplar ve Elektriksel rezistans.

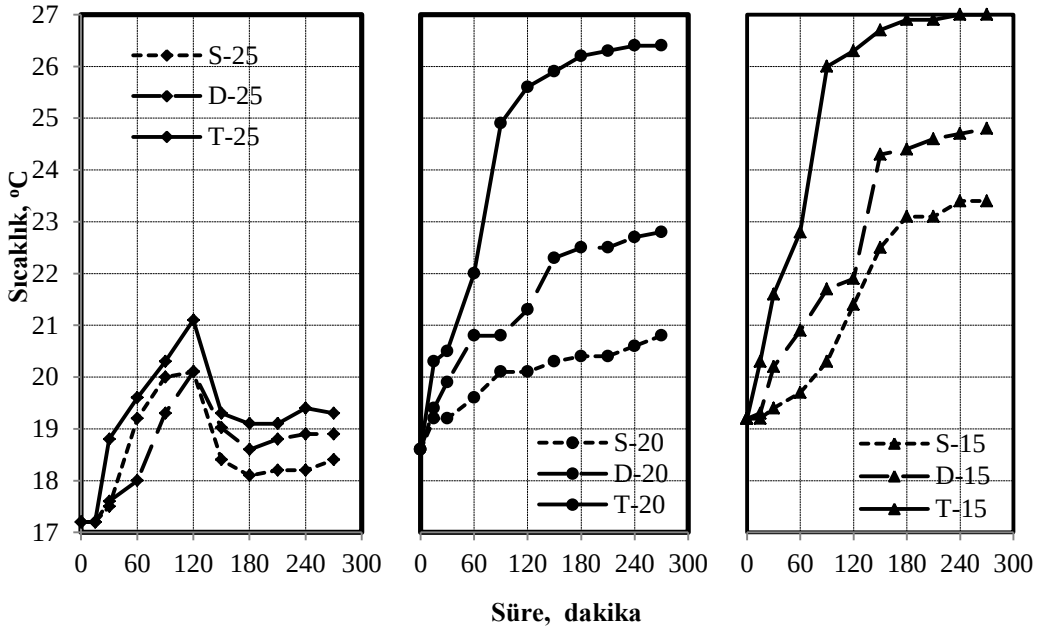
Spiral kablo boruları Şekil 4'te görüldüğü gibi her bir kalıbın en kesiti olarak ortasına gelecek şekilde tellerle sabitlenmiştir. Daha sonra bu spiral boruların içerisinden rezistans geçirilmiştir. Bu rezistans çift iletkenli, 3 m uzunluğunda soğuk uca sahip ısıtıcı kablodur. Hazırlanan beton karışımları, kalıba, kabloların konumunu değiştirmeyecek şekilde dikkatlice yerleştirilmiştir. Beton tokmak ve ince şişler yardımı ile sıkıştırılmıştır. Ancak kablolar etkili bir sıkıştırmaya izin vermemiştir. Vakit kaybedilmeden taze beton sıcaklığı farklı noktalardan ölçülmüş ve sıfır okuması olarak kaydedilmiştir. Hemen sonra, kalıp daha önce istenilen sıcaklığa getirilmiş derin dondurucunun içerisine dikkatlice yerleştirilmiştir. Her yarım saatte bir beton sıcaklıkları ölçülmüştür. Derin dondurucunun üç kademeli soğutma kapasitesi dikkate alınarak yapılan ölçümlerde sıcaklık değerleri sırasıyla -15, -20, -25 ^{0}C olarak ölçülmüş ve bu değerler ortam sıcaklığı olarak seçilmiştir. Beton numuneler bu ortamda 4.5 saat bekletilmiştir. Deneme üretimleri sırasında kontrol betonu olarak elektrik rezistans ile ısıtılmayan betonlar üretilmiş; ancak bu betonlar, belirtilen ortam sıcaklıklarında prizini tamamlayamadığı için üzerinde deney yapılamamıştır. Prizini alan betonlar önce derin dondurucudan daha sonra kalıptan çıkarılarak kür havuzuna yerleştirilmiştir. 7. ve 28. günlerde numuneler kür havuzundan çıkarılmıştır. 8 cm kalınlığında plak şeklindeki numunelerin kablo geçmeyen kısımlarından 8x8x8 cm'lik küp numuneler kesilmiştir. Beton küp numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı (UGH) ve basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Ayrıca ağırlıkça su emme ve kapiler su emme deneyleri yapılmıştır. Her bir deney üç adet beton küp numunesi üzerinde yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.



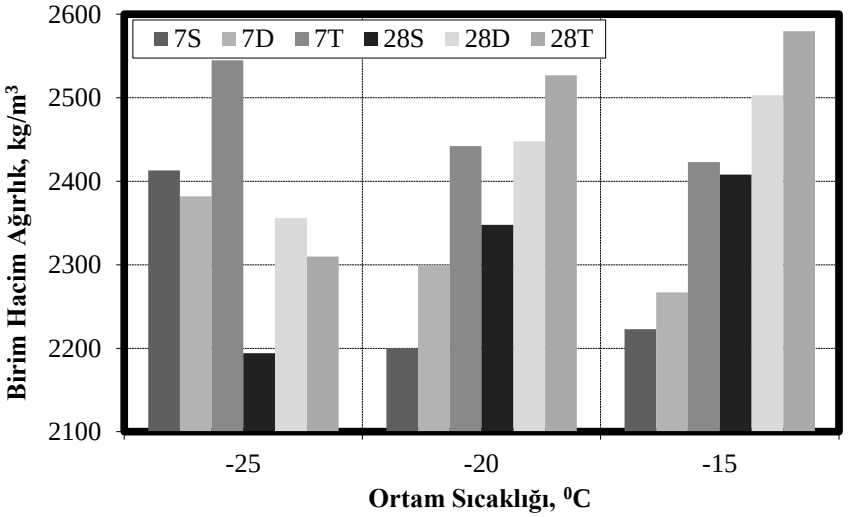
Şekil 4:
Kalıp içerisindeki elektriksel direnç uzunluk ve yerleştirme biçimleri.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

-15, -20, -25 ^{o}C sıcaklıklarda bekletilen numunelerin priz süresince sıcaklıkları 30 dk arayla ölçülerek kaydedilmiş ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde -25 ^{o}C sıcaklıkta bekletilen numunelerde ortalama sıcaklık 19 ^{o}C civarında olduğu görülürken, -15 ^{o}C ve 240 cm elektriksel direnç bulunan numunelerde sıcaklık 27 ^{o}C'ye kadar ulaşmıştır. Düşük ortam sıcaklığına rağmen tüm betonların iç sıcaklığı priz için ideal sıcaklıklara ulaşmıştır. Burada ilk sıcaklık okuması normal oda koşullarında (derin dondurucuya konulmadan) kablo ile ısıtılmaya başlanmadan hemen önce yapıldığı için sıcaklıklar 17-19 ^{o}C aralığındadır. Soğuk ortamda bekletilen numunelerin sıcaklığının artışına hidratasyon ısısının da etkisi olmuştur. Ancak bu etki, kablo ile ısıtma kadar etkili değildir. Çünkü prizini almayan dolayısı ile deneyi yapılamayan kablosuz kontrol numunelerinde sıcaklıklar -15 ^{o}C'ye ulaşan oranlarda düşmüştür.

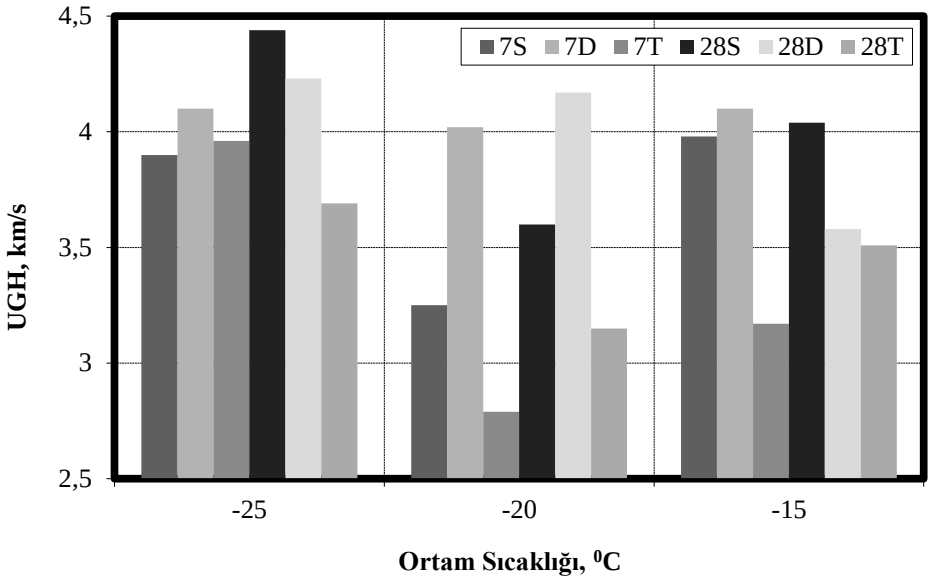


Şekil 5:
Taze beton sıcaklığına elektriksel dirençle ısıtmanın etkisi



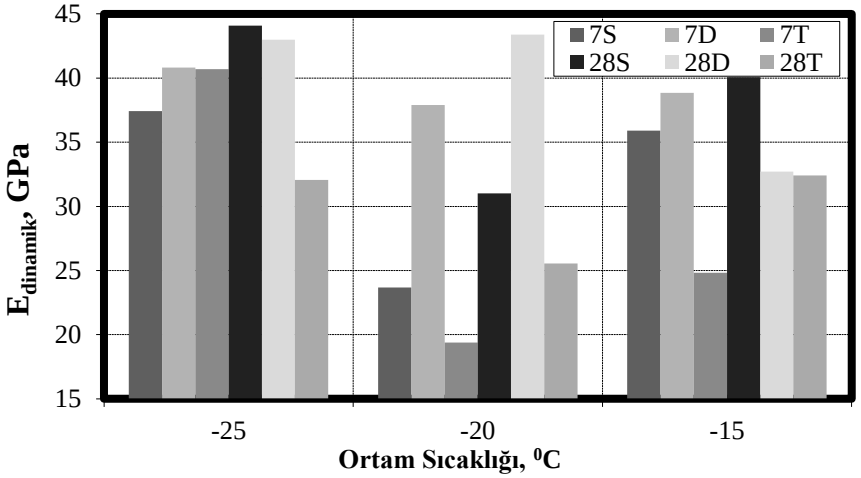
Şekil 6:
Beton birim hacim ağırlığına elektriksel dirençle ısıtmanın etkisi

Şekil 6'da numunelerin ortam sıcaklıkları ile birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekil 6 incelendiğinde birim hacim ağırlıklar 2200-2600 kg/m^3 arasında değişmektedir. Geleneksel betonlarda birim ağırlık değeri 2400 kg/m^3 civarındadır. Çalışmamızda birim ağırlıklar geniş bir aralıkta değişim gösterdiği görülmüştür. 28 günlük numunelerin birim hacim ağırlıkları ortam sıcaklığı arttıkça % 10'a varan oranlarda artmıştır. Erken yaşlarda ise numunelerin birim hacim ağırlığı ortam sıcaklığı arttıkça % 5 civarında azalmıştır. Şekil 6'da verilen birim ağırlık deney sonuçlarında en uzun rezistans kullanılan numunelerin birim ağırlıkları genel olarak 7 ve 28 günde en yüksek değerleri almıştır. Şekil 7'de numunelerin UGH'larının ortam sıcaklığı ile değişimi görülmektedir. Şekil 7 incelendiğinde ultrases geçiş hızı deney sonuçlarıyla birim ağırlık deney sonuçları arasında beklenen uyum gözlemlenmiştir. İyi kalitede bir beton için UGH 3,5-4,5 km/sn aralığında değişirken, çalışmamızda numunelerin tamamının bu aralıkta olmadığı görülmüştür. UGH 160 cm rezistans kullanılan numunelerde daha fazla olduğu görülürken, en düşük UGH 240 cm rezistans kullanılarak üretilen numunelerde saptanmıştır. UGH'nin genel olarak -25 ^{o}C ortam sıcaklığında bekleyen numunelerde daha yüksek olduğu görülmüştür. UGH betonda yer alan boşluklar konusunda fikir vermektedir. Bu sebeple, 240 cm rezistans kullanılan numunelerde yerleşme problemlerinden dolayı meydana gelen boşlukların UGH'yi düşürdüğü şeklinde bir sonuca varılmıştır. Ortam sıcaklığının -25 ^{o}C'ye kadar düşmesi durumunda dahi, rezistans kullanılması ile priz alan betonun ileri yaşlardaki fiziksel özeliklerinin çok büyük bir olumsuzluğa maruz kalmayacağı görülmüştür.

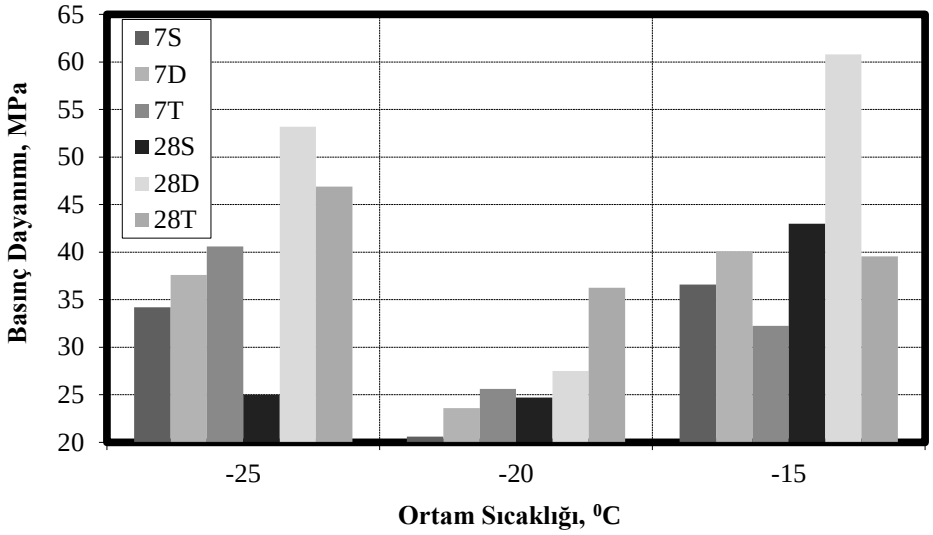


Şekil 7:
Beton UGH'sine elektriksel dirençle ısıtmanın etkisi

Şekil 8'de dinamik elastisite modülünün ortam sıcaklığına bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 8 incelendiğinde birim hacim ağırlık ve UGH'ye bağlı hesaplanan dinamik elastisite modülleri 80 cm rezistans ile ısıtılan -25 ^{o}C ortam sıcaklığında bekleyen numunelerde en yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 9'da farklı sıcaklıklarda bekletilmiş numunelerin basınç dayanımı değişimi görülmektedir.



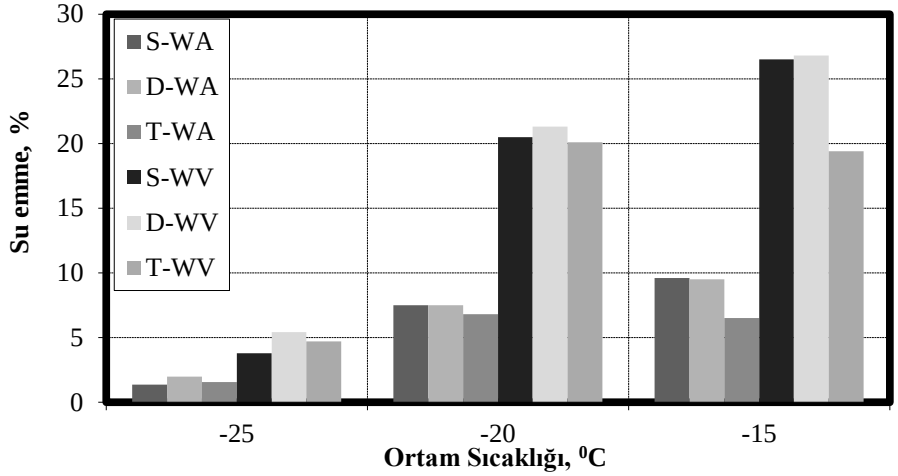
Şekil 8:
Beton numunelerinin dinamik elastisite modülü sonuçlarındaki değişimler



Şekil 9:
Beton basınç dayanımına elektriksel dirençle ısıtmanın etkisi

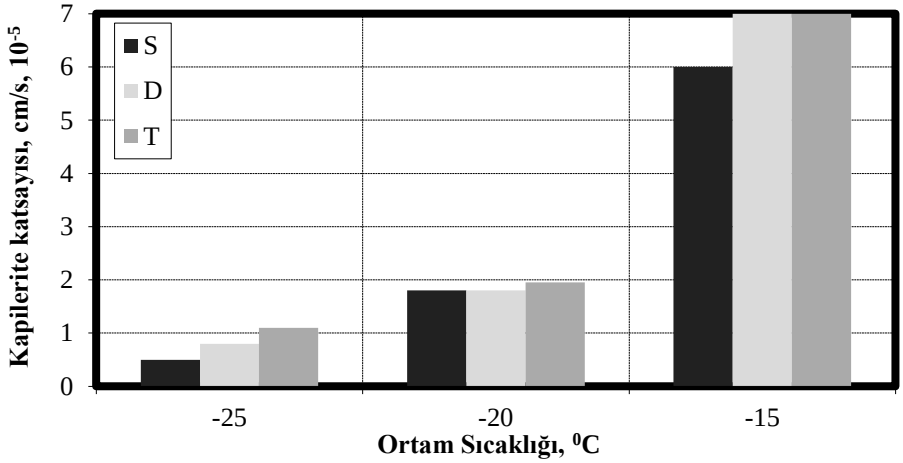
Şekil 9 incelendiğinde basınç dayanımları -20 ^{o}C ortam sıcaklığında bekleyen numunelerde en düşük olduğu görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı ise -15 ^{o}C ortam sıcaklığında bekleyen, 160 cm rezistans ile ısıtılan numunelerde olmuştur. Genel olarak elde edilen basınç dayanımları taşıyıcı sistemde rahatlıkla kullanılabilecek beton sınıfını sağlamıştır. Basınç dayanım sonuçlarına göre, 160 cm elektriksel direnç kullanımı olumlu sonuçlar doğurmuştur. Diğer deney sonuçlarında da görüldüğü gibi priz süreleri 4.5 saat gibi sürelerde prizi tamamladığı görülse de ortam sıcaklığına ve rezistans uzunluğuna bağlı olarak beton sıcaklığındaki değişim deney sonuçlarını etkilemiştir. Rezistans uzunluğu ve ortam sıcaklığı değişimi beton basınç dayanımını % 100'e ulaşan oranlarda etkilemektedir. Rezistans ile beton kürünün soğuk havada beton dökümlerinde avantaj sağladığı ve dayanımları arttırdığı görülmüştür. Ancak kabloların sebep olduğu yerleşme ve sıkıştırma problemi betonda makro boşluk miktarını değişken oranda arttırdığı için, basınç dayanımlarındaki artış oranının geniş bir aralıkta meydana geldiği saptanmıştır. Bu açıdan kendi kendine yerleşip sıkışan betonlar gibi uygulamalarda bu yöntemin daha etkili olacağı düşünülmektedir. Şekil 10'da ortam sıcaklığına ve rezistans uzunluğuna bağlı olarak su emme oranı değişimi görülmektedir. Şekil 10 incelendiğinde ortam sıcaklığının azalması su emme oranlarını % 20 oranında arttırmıştır. Bu

artış oranı, 240 cm rezistans kullanılan numunelerde daha az gerçekleşmiştir. Yerleştirme sırasında oluşan boşlukların etkili bir sıkıştırma ile giderilememesi nedeni ile oluşan makro boşluklar su emme oranlarını arttırmıştır. Ayrıca beton sıcaklığının artışı ve erken yaşta oluşan yapıların mikroyapıda doluluğu arttırması geçirimliliği azaltmıştır.



Şekil 10:
Beton su emmesine elektriksel dirençle ısıtmanın etkisi

Şekil 11'de ise ortam sıcaklığına göre kapiler su emme katsayıları verilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde ortam sıcaklığı -25 ^{o}C'den -20 ^{o}C'ye arttırıldığında kapiler su emme katsayısı % 100'e ulaşan oranlarda; -20 ^{o}C'den -15 ^{o}C'ye ulaştığında ise, kapiler su emme katsayısının 3 kata kadar arttığı gözlemlenmiştir. Beton ısıtmada kullanılan 80 cm rezistans uzunluğu, diğerlerine göre kapiler su emme katsayısını azaltmıştır. Numunelerin su emme oranlarına göre 240 cm elektriksel direnç kullanımı önerilebilir.



Şekil 11:
Beton kılcal su emmesine elektriksel dirençle ısıtmanın etkisi

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Taze betonun priz alabilmesi için ideal sıcaklıklar 15-30 ^{o}C arasındadır. 15 ^{o}C altında priz alma hızı oldukça yavaşlarken, 30 ^{o}C üzerinde priz hızlanmakta, büzülme çatlakları oluşmakta, beton daha yerleştirilmeden priz almaktadır. -25 ^{o}C gibi ortam sıcaklığına

rağmen betonda ideal sıcaklıklar gerçekleşmiş ve priz ortalama 4,5 saat gibi bir sürede sona ermiştir.

- Ortam sıcaklığının artması ileri yaşlarda birim hacim ağırlığını arttırırken, erken yaşlarda azaltmıştır. 80 ve 160 cm rezistans ile ısıtılan beton numunelerinde UPV değerleri incelendiğinde boşluklar açısından kaliteli bir beton üretiminin gerçekleştiğini gözlemlenmektedir.
- Beton basınç dayanımı için 28 günlük dayanımlar esas alınır. Buna göre dayanımlar en düşük 25 MPa bulunurken, 60 MPa ulaşmıştır. Elde edilen betonlar, yapı taşıyıcı sistemlerinde kullanılabilir.
- Ortam sıcaklığının artması, beton su emme oranlarını ve kapiler su emme katsayılarını arttırmıştır. 240 cm rezistans ile ısıtılan betonların su emmeleri daha avantajlı olurken, 80 cm rezistans ile ısıtılan betonların kapiler su emme katsayılarının daha yararlı olduğu görülmüştür. Su emmenin fazla olması betonlar için istenmeyen bir durumdur.

Taze halde betonun bir kere bile donması betonun dayanımında ve geçirimliliğinde azalmaya neden olurken, rezistans ile ısıtma sayesinde soğuk havalarda bile beton sıcaklığı istenilen derecelerde tutulabilmektedir. Bu durumda dayanım kazanmış betonun özelikleri büyük ölçüde olumsuz etkilenmemektedir. Ancak beton priz aldığında yeterli dayanım kazanmamıştır. Beton sertleştikten sonra yeterli dayanım kazanıncaya kadar ısıtma veya mevcut ısıyı korumak için de ayrıca önlem alınması tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

1. ACI 306 R – 88 (1994) , "Cold Weather Concreting", *ACI Manual of Practice*.

2. Chung D.D.L.. (2001) Cement-matrix composites for thermal engineering, *Applied Thermal Engineering* 21, 1607-1619. doi: 10.1016/S1359-4311(01)00043-6.

3. Devi. (2012) Kar-Buz Birikimini Engelleme Sistemleri, *Raf Ürün Dergisi*, 36, 40.

4. Jacobsz, G. S. B., and Gryzagoridis, J. (2017, August). Finite difference method heat transfer applied to thermally activated building systems. In Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 2017 International Conference on the (pp. 1-7). IEEE. doi: 10.23919/ICUE.2017.8067996.

5. Mei Z., Chung D.D.L. (2000) Effects of temperature and stress on the interface between concrete and its carbon fiber epoxy-matrix composite retrofit, studied by electrical resistance measurement, *Cement and Concrete Research* 30, 799-802. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00238-6.

6. Olesen, B. W., & Liedelt, D. F. (2001). Cooling and heating of buildings by activating their thermal mass with embedded hydronic pipe systems. Proceedings of the ASHRAE-CIBSE, Dublin, Ireland, 3-4.

7. Sohn D., Mason T.O. (1998) Electrically Induced Microstructural Changes in Portland Cement Pastes. Advn Cem Bas Mat 7, 81–88. doi: 10.1016/S1065-7355(97)00056-4.

8. Topçu İB, Karakurt C, (2002) Farklı Çimentolar ile Üretilen Betonlarda Olgunluk Kavramı, *ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, 14 Ekim, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

9. Topçu İB, Toprak MU, (2005) Fine aggregate and curing temperature effect on concrete maturity, *Cement and Concrete Research* 35, 758– 762. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.04.023.

10. Topçu İB, Uygunoğlu T., Hocaoğlu İ., (2012) Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures, *Construction and Building Materials* 28, 414–420. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.068.

11. Tumidajski P.J., Xie P., Arnott M., Beaudoin J.J. (2003) Overlay current in a conductive concrete snow melting system, *Cement and Concrete Research* 33, 1807–1809. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00198-4.

12. Wilson J.G., Whittington H.W. (1990) Variations in the electrical properties of concrete with change in frequency. *IEE Proceedings*, Vol. 137, No. 5.

13. Xiao L., Li Z. (2008) Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement, *Cement and Concrete Research* 38, 312–319. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.027.

14. Xu J., Yao W.. (2009) Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode, *Construction and Building Materials* 23, 2220–2226. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.002.

15. Zhang K., Han B., Yu. (2011) Nickel particle based electrical resistance heating cementitious composites, *Cold Regions Science and Technology* 69, 64–69. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.07.002.