

Döşemeden ve Duvardan Soğutma Sistemlerinde Mahal İçerisindeki Akış ve Isı Transferinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Murat SANDIK
Müslüm ARICI
Hasan KARABAY

ÖZET

Bu çalışmada, döşemeden ve duvardan soğutma sistemlerinin etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Soğutulacak mahalın Kocaeli’de olduğu kabul edilerek dış ortam sıcaklığı 36 °C alınmıştır. Soğutma sisteminde sirküle edilecek su sıcaklıkları 15 °C, 20 °C ve 25 °C alınarak, parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Hem döşemeden hem de duvardan soğutma sistemi için ayrı ayrı oluşturulan kapalı hacimler içerisindeki hava akışı ve ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla ticari bir yazılım kullanılarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri çözülmüştür. Duvardan soğutma sisteminde katı yüzeylere yakın bölgeler hariç mahalın içerisindeki havanın durağan olduğu, cidarlara yakın bölgelerdeki havanın hareketli olduğu ve bu hareketli havanın oda içerisinde sirkülasyon oluşturduğu görülmüştür. Döşemeden soğutmada ise mahal içerisindeki hava hareketlerinin zamana bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Her iki soğutma sisteminde de oda içerisinde ulaşılan maksimum hızlar konfor şartlarını bozacak seviyelerde değildir. Döşemeden soğutma sisteminde ısıyla gerçekleşen ısı transferi, toplam ısı transferinin yaklaşık %97’sini oluştururken, duvardan soğutma sisteminde bu değer yaklaşık %86 mertebelerinde kalmaktadır. Aynı soğutma suyu sıcaklığı için duvardan soğutmadaki mahal sıcaklıkları döşemeden soğutma sistemine göre daha düşük olmaktadır. Sonuç olarak, duvardan soğutma sisteminin etkinliğinin döşemeden soğutma sistemine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Radyant Soğutma Sistemleri, Döşemeden Soğutma Sistemleri, Duvardan Soğutma Sistemleri, Termal Konfor.

1. Giriş

Radyant ısıtma ve soğutma sistemleri tarih boyunca yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Örneğin döşemeden ısıtmanın ilkel versiyonlarının kullanımı Çin’de M.Ö. 10.000 yıllarına kadar dayanmaktadır. Daha ileriki zamanlarda benzer sistemler Yunan ve Roma imparatorlukları döneminde de fırında yanmış odun veya kömürün baca gazının bina döşemesi altında sirküle edilmesi suretiyle mahal ısıtılması sağlanmıştır. Bu teknik Avrupa’da Roma imparatorluğundan sonra gözden kaybolmuş; fakat gelişimini Kore, Çin ve Japonya’nın bir kısmında

Abstract:

In this study, a comparative study between floor cooling system and wall cooling system is carried out numerically to estimate fluid flow and heat transfer in a residential building located in Kocaeli province. Computations are performed for three different cooling water temperatures of 15 °C, 20 °C and 25 °C. It is observed that the flow in the room is steady for wall cooling system while it is unsteady for floor cooling system. The air in the room is almost stationary except near solid surfaces for both cooling systems. The ratio of radiative heat transfer to total heat transfer is about 97% and 86% for floor cooling and wall cooling systems, respectively. For the same cooling water temperature, wall cooling system results lower room temperature comparing with floor cooling system. It is concluded that the performance of the wall cooling system is better than floor cooling system.

Key Words:

Radiant Cooling System, Floor Cooling System, Wall Cooling System, Thermal Comfort

Makale

yavaş yavaş devam ettirmiştir. Değiştirilmiş versiyonu ise 19. yüzyılda Avrupa'da tekrar gün yüzüne çıkarak o zamandan beri kullanılmaktadır. Modern şekli olan ısıtılmış ya da soğutulmuş suyun döşeme altına yerleştirilmiş borulardan sirküle ettirilmesi 1900' lü yıllarda İngilizler tarafından önerilmiştir. Daha sonra bu teknoloji Avrupalı ve Asyalı göçmenlerin etkisiyle 1930'lu yıllarda Kuzey Amerika'da benimsenmiştir. 1993'te İsviçre'de günümüzde de kullanılan PEX plastik boruların bu tür sistemlerde kullanımına kadar çelik ve bakır boruların kullanımı korozyon ve güvenilirlik problemleri yaratmıştır. Günümüzde Kore'de binaların %95'inin, Çin'de ise %85'inin ısıtılmasında döşemeden ısıtmadan faydalanılmaktadır. Modern hidronik radyant sistemler Avrupa'da inşaat endüstrisine hâkim olmuştur. 2010 yılında Kuzey Amerika'da binaların sadece %5'lik bir kısmında bu tür sistemler kullanılırken yeni yapılan ticari binaların %7.5'lik kısmında ise radyant sistemler tercih edilmiştir ve bu kullanım oranının 2013 yılında iki katına çıkacağı beklenilmektedir [1].

Günümüzde ısıtma ve soğutma ihtiyacının karşılanması için çeşitli yöntemler ve cihazlar kullanılmaktadır. Yüksek yatırım maliyeti, yüksek enerji tüketimi ve hava akımı, gürültü vb. olumsuz iç mekân havasından dolayı birçok Avrupa ülkesinde tam havalandırılmalı klasik ısıtma soğutma sistemlerinin kullanımı önerilmemekte ve hatta yasaklanmaktadır. Bu tür klasik ısıtma soğutma sistemlerine alternatif olarak boruları döşeme, tavan, duvar vb. bina yapısına ya da çok katlı binalarda beton levhanın merkezine gömülü, hidronik radyant ısıtma ve soğutma sistemleri kullanılmaktadır [3]. Radyant döşeme sistemlerinin kullanımı ile hem ısıtma hem de soğutma işlemi yapılarak sistemin tüm yıl boyunca çift çevrimli olarak kullanımının yanı sıra yarattığı konfor ve enerji tüketimi sebebiyle doğal kaynakların ve çevrenin korunmasına katkıda bulunmaktadır [2].

Radyant döşeme sistemlerinde, sistemde kullanılan su döşeme altına belirli aralıklarla yerleştirilmiş borular içerisinde sirküle ettirilerek döşemenin dolayısıyla oturma mahalin istenilen konfor şartları dâhilinde ısıtılmasını ve soğutulmasını sağlar. Birçok ülkede bu tür sistemler konutlar, kiliseler,

hangarlar, hastaneler, endüstriyel binalar, spor salonları vb. binaların ısıtılmasında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak döşemeden soğutma sistemleri, ısıtma kadar çok yaygın değildir [4]. Radyant ısıtma - soğutma sistemleri, termal konfor ve enerjiden tasarruf etme potansiyeline sahiptir. Çünkü sistem, geleneksel sistemlere nazaran soğutma için yüksek sıcaklığa ve ısıtma için düşük sıcaklığa gereksinim duymaktadır. Bu da sistemde birçok düşük kaliteli doğal enerji kaynağının direkt ya da dolaylı olarak kullanımına imkân tanımaktadır [5, 6]. Radyant ısı değiş tokuşu doğrudan mahalde oturan insanlar ile çevredeki duvar ve tavan gibi yüzeylerdeki ısı değişimini etkiler. Bu suretle de mahal içerisinde üniform bir termal çevre kurulmuş olunur. Yüksek radyant ısı geçişi ve mahalde yaşayan insanların döşeme yüzeyine yakın olmasından dolayı aynı döşeme sistemlerinin mahal soğutması için de kullanımı mümkün olmaktadır. Bununla birlikte döşemeden soğutma sistemleri için ısı taşınım katsayısı, döşemeden ısıtma sistemlerine göre oldukça düşüktür. Ayrıca döşemeden soğutma sistemleri için kabul edilebilir döşeme sıcaklığı, düşey doğrultudaki sıcaklık farkı ve çiğ noktası sıcaklığı soğutma kapasitesini azaltan faktörlerdir. Bu sebeplerden dolayı yüksek soğutma kapasiteleri için döşemeden soğutma sistemlerinin tasarımı, döşemeden ısıtma sistemlerine göre çeşitli farklılıklar içerir [4]. Döşemeden soğutma sistemleri geleneksel soğutma sistemlerine benzememektedir. Çünkü klasik soğutma sistemlerinde ısı transferi sadece konveksiyon ile meydana gelirken döşemeden soğutma sistemlerinde çevreyle olan ısı transferi hem konveksiyon hem de ışınlıma gerçekleşir [7].

Döşemeden soğutma sistemleri ile ilgili literatürde çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır [1-12]. Özellikle bu sistemin termal konfor açısından insan vücuduna olan etkileri incelenmiştir. İnsanın cilt sıcaklığı 45 °C'den fazla 18 °C'den de az olursa çeşitli ağrılara sebep olmaktadır. Bu yüzden yaşam mahallerinin dikkatli düzenlenmesi, sağlık ve konfor açısından büyük önem arz etmektedir [8]. Birçok uluslararası standartlara göre insanlar için termal konfor sıcaklığı, oturularak yapılan aktivitelerde kış için 20 °C ile 24 °C arasında iken yaz için 23°C ile 26 °C arasında değişmektedir [3]. Ancak ortam sıcaklığı, üzerinde

yaz kıyafeti bulunan ve mahal içerisinde oturan insanlar için 26 °C'yi geçmemelidir [4]. Döşemeden soğutma sistemlerinde ısı transferi soğutulmuş döşeme yüzeyi ile ortamdaki sıcak hava arasında gerçekleşir. Bundan dolayı özellikle soğutma ihtiyacının en fazla olduğu yaz döneminde ve sıcak ve nemli hava şartlarına sahip iklimlerde, soğutulmuş döşeme yüzeyinde yoğunlaşma olasılığı oldukça yüksektir. Sistemin döşeme sıcaklığını sınırlayan bir diğer önemli faktör de çığ noktası sıcaklığıdır [2,3,4,9]. Bazı standartlara göre döşemeden soğutma sistemleri için mahal içerisinde olması gereken bağıl nem %60 ile %70 arasında değişmektedir. Bu bağıl neme karşılık gelen hava sıcaklığı 26 °C ve bu sıcaklığa tekabül eden çığ noktası sıcaklığı 17 °C ile 20 °C arasında olmaktadır. Farklı standartlara göre önerilen mutlak nem değeri 11.5 gr/kg olup bu değere karşılık gelen çığ noktası sıcaklığı 16 °C'dir. Bu sonuçlara göre döşemeden soğutma sistemleri için döşeme yüzey sıcaklığı 16 °C ile 20 °C aralığında olmakla birlikte birçok ulusal ve uluslararası standartlara göre mahal içerisinde oturmuş halde ya da ayakta normal ayakkabı giyerek bulunan insanlar için önerilen döşeme üstü sıcaklıkları 18/19 °C ile 29 °C arasında değişmektedir. Buna göre döşemeden soğutma sistemlerinin kullanıldığı mahal içerisinde oturmuş halde bulunan insanlar için kabul edilebilir en düşük döşeme sıcaklığı 20 °C'dir [4].

Termal konfor için önemli olan bir diğer parametre düşey doğrultudaki sıcaklık farkıdır. Buna göre yerde oturan insan için 0.1 m seviyesindeki ayak bileği ile 1.1 m seviyesindeki başı arasındaki havanın sıcaklık farkı sınırı 3 °C olarak önerilmektedir. Çünkü soğutulmuş döşeme ile mahal arasındaki ısı transferinin büyük bir kısmı ışınlama ile gerçekleşmektedir. Ayak bileği seviyesindeki hava düşük konvektif ısı transferi sebebiyle çok fazla soğuyamamaktadır. Bu sebepten dolayı döşemeden soğutma sistemleri için düşey doğrultudaki sıcaklık farkı rahatsızlığa sebebiyet vermez [4].

Döşemeden soğutma sistemleri, güneş radyasyonunun etkili olması beklenen geniş camlı pencerelerin kullanıldığı hava limanı, kapalı alışveriş merkezleri gibi büyük binalarda verimli şekilde kullanılabilir

mektedir [7, 10]. Dünyanın en geniş döşemeden soğutma sistemli yapısı Bangkok, Tayland'da yapılan havalimanında kurulmuş olup 150.000 m²'lik döşemeden soğutma sistemi büyük yolcu salonu ve ana terminal binasına uygulanmıştır. Binada nem giderici havalandırma sistemiyle birlikte döşemeden soğutma sistemi uygulanmış olup sistemi besleyen giriş su sıcaklığı 13 °C, geri dönüş sıcaklığı 19°C ve döşeme sıcaklığı 21 °C'dir [4]. Döşemeden soğutma sisteminin uygulandığı bir diğer yer maksimum 20 m tavan yüksekliğine sahip yolcu salonu olan Tianjin, Çin tren istasyonudur. Bu istasyonun ısıtılması ve soğutulmasında hem yazın hem de kışın çift etkili olarak çalışan ve havalandırma sistemiyle kombine edilmiş döşemeden ısıtma ve soğutma sistemi kullanılmıştır. Sistemde tasarlanan döşeme sıcaklığı 23 °C olup bu değer, yoğunlaşmayı önlemek amacıyla döşemeye yakın havanın çığ noktası sıcaklığından sadece 1 °C daha yüksektir. Konfor şartlarını yakalamak için sistemde 20 °C'lik su dolaştırılmıştır [5].

Her ne kadar döşemeden soğutma sistemleri yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına uygun olması sebebiyle enerji tasarrufu sağlanmasına izin verse de özellikle nemli ve sıcak iklim koşullarına sahip bölgelerde döşeme yüzeyinde çığ noktası sıcaklığına bağlı olarak yoğunlaşma riski söz konusu olduğu için sistemin soğutma kapasitesi sınırlanmaktadır. Bu yüzden döşemeden soğutma sistemleri ile birlikte nem giderici havalandırma sistemlerinin kullanılması önerilmektedir [9, 11]. Bununla birlikte sistemde kullanılan borularda herhangi bir delinme vb. olumsuzluklar yaşanmaması için döşeme üzerine mukavemet artırıcı malzemeler kullanılmalıdır. Bu da sistemin soğutma performansına olumsuz yönde etki ederek hem işletme maliyetinin hem de ilk yatırım maliyetinin artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca döşemeden soğutma sistemlerinde döşemede kullanılan beton kütlelerin termal ısı depolama etkisi sebebiyle iç ortam şartlarındaki ani değişikliklere sistem çabuk cevap verememektedir [9]. Bu olumsuzluklardan dolayı son yıllarda duvardan soğutma sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Duvardan soğutma sistemlerinde kullanılan borular döşemeden ziyade duvara monte edilerek mahal soğutması yapılmaktadır. Duvardan soğutma sistemleri, yerden

Makale

soğutma sistemlerinin avantajlarını ihtiva etmekle birlikte ayrıca yeni avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlardan başlıcaları, döşemeden soğutma sisteminde kullanılan mukavemet arttırıcı elemanlara ihtiyaç duymaması sebebiyle yatırım maliyetlerini düşürmesi ve aynı zamanda ısıl direnci de düşürerek soğutma verimini arttırması ve rejime ulaşma zamanını kısaltmasıdır. Bununla birlikte mahal içerisindeki duvar yüzey alanı, döşeme yüzey alanına göre daha fazla olduğundan dolayı gerekirse soğutma yüzey alanı arttırılarak duvardan soğutma sisteminin ihtiyaç duyacağı su sıcaklığı daha da yükseltilebilir. Duvardan soğutma sistemlerinin döşemeden soğutma sistemlerine göre en büyük avantajı, çalışması esnasında meydana gelen herhangi bir sızıntı sonucu, arızaya hemen müdahale edilerek tamirinin kolaylıkla yapılabilmesidir.

Bu çalışmada, döşemeden ve duvardan soğutma sistemlerinde kullanılan su sıcaklıklarının mahal içerisindeki hava hareketlerine ve ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla 36 °C dış ortam sıcaklığına sahip Kocaeli için, 15 °C, 20 °C ve 25 °C su sıcaklıkları kullanılarak, döşemeden ve duvardan soğutma sistemlerinin mahal içerisindeki hava hareketlerine ve ısı transferine olan etkilerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

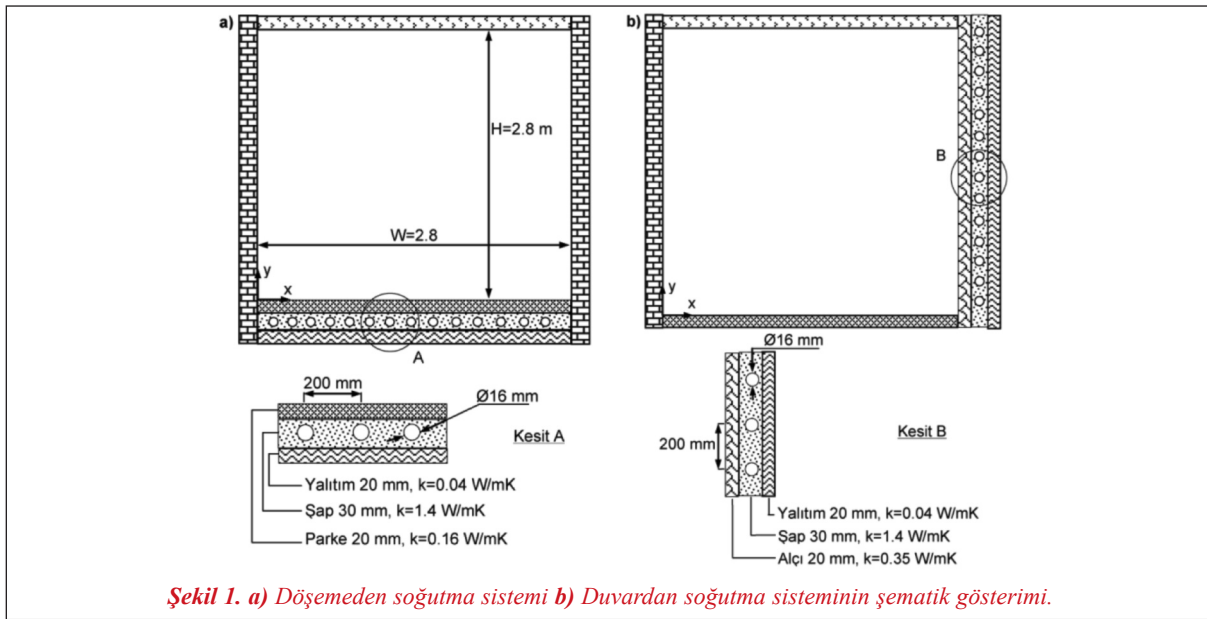
2. Problemin Tanıtımı ve Sayısal Çözüm Metodu

Bu çalışmada, Şekil 1'de şematik olarak gösterilen 2.8 m eninde (W) ve 2.8 m boyunda (H) olan bir mahal içindeki hava hareketleri ve ısı transferi döşemeden ve duvardan soğutma durumları için sayısal olarak incelenmiştir. Döşemeden soğutma analizinde Şekil 1a'da görüldüğü gibi tavan ve sağ duvar adyabatik olarak kabul edilirken, duvardan soğutmada ise döşeme ve tavan adyabatik olarak kabul edilmiştir. Dış ortamla temas halinde olan duvar, sol duvar olup yapısal olarak dıştan içe doğru; 30 mm kalınlığında dış sıva ($k=1.40$ W/mK), 35 mm kalınlığında yalıtım ($k=0.040$ W/mK), 20 cm kalınlığında tuğla ($k=0.45$ W/mK) ve 20 mm kalınlığında iç sıvadana ($k=0.87$ W/mK) oluşmaktadır. Dış duvar ve çevresi arasındaki ısı geçişi, taşınım sınır şartı ile modellenerek ısı taşınım katsayısı $h=22.7$ W/m²K alınmıştır.

Döşemeden soğutmada oda zemini en alt katmandan yukarıya doğru; 20 mm kalınlığında yalıtım ($k=0.04$ W/mK), içine 16 mm çapında boruların yerleştirildiği 30 mm kalınlığında şap ($k=1.4$ W/mK) ve 20 mm kalınlığında parkeden ($k=0.16$ W/mK) oluşmaktadır. Duvardan soğutmada ise Şekil 1b' de görüldüğü gibi sistem boruları iç duvara döşenmiş olup sağ duvar dıştan içe doğru sırası ile 20 mm kalınlığında yalıtım ($k=0.04$ W/mK), içine 16 mm çapında boruların yerleştirildiği 30 mm kalınlığında şap ($k=1.4$ W/mK) ve 20 mm kalınlığında alçıdan ($k=0.35$ W/mK) oluşmaktadır.

Sirkülasyon suyu sıcaklığının mahal sıcaklığına olan etkisini görmek amacıyla hesaplamalar 15 °C, 20 °C ve 25 °C su sıcaklıkları için yapılmıştır. Sayısal analizde sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS FLUENT 12.1 paket programı kullanılmıştır. Duvardan soğutma sisteminde zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilen analizlerle yakınsak çözümler elde edilebilirken, döşemeden soğutma sisteminin analizinde zamandan bağımsız yapılan çözümlerle yakınsak çözümler elde edilememiştir ve bu problem zamana bağlı olarak incelendiğinde yakınsak çözümler elde edilebilmiştir. Dolayısıyla duvardan soğutmada mahal içindeki akışın daimi, döşemeden soğutmada ise zamana bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Enerji ve momentum denklemleri ikinci mertebeden upwind yaklaşımıyla ayrıklaştırılmıştır. Her iki soğutma sistemi için akış laminar kabul edilmiştir. Analizlerde mahal içerisindeki ışınlama ısı transferi de dikkate alınmıştır. Bu amaçla Surface to Surface (S2S) modeli kullanılmıştır. Döşeme bünyesindeki (katı hacim) enerji denklemi ve akışkan ortam (mahal havası) için momentum ve enerji denklemleri beraber çözülmüştür. Mahal içindeki havanın yoğunluğu ideal gaz denkleminde çözülmüş, diğer fiziksel özellikler ise sabit kabul edilmiştir.

Soğuk suyun sirküle edildiği borular içerisindeki ısıl direncin, diğerlerine nazaran çok düşük olmasından dolayı, boru içerisinde sıvı bölgede momentum ve enerji denklemleri çözülmemiş, boru cidar sıcaklığı sirkülasyon suyu sıcaklığına eşit olarak kabul edilmiştir.

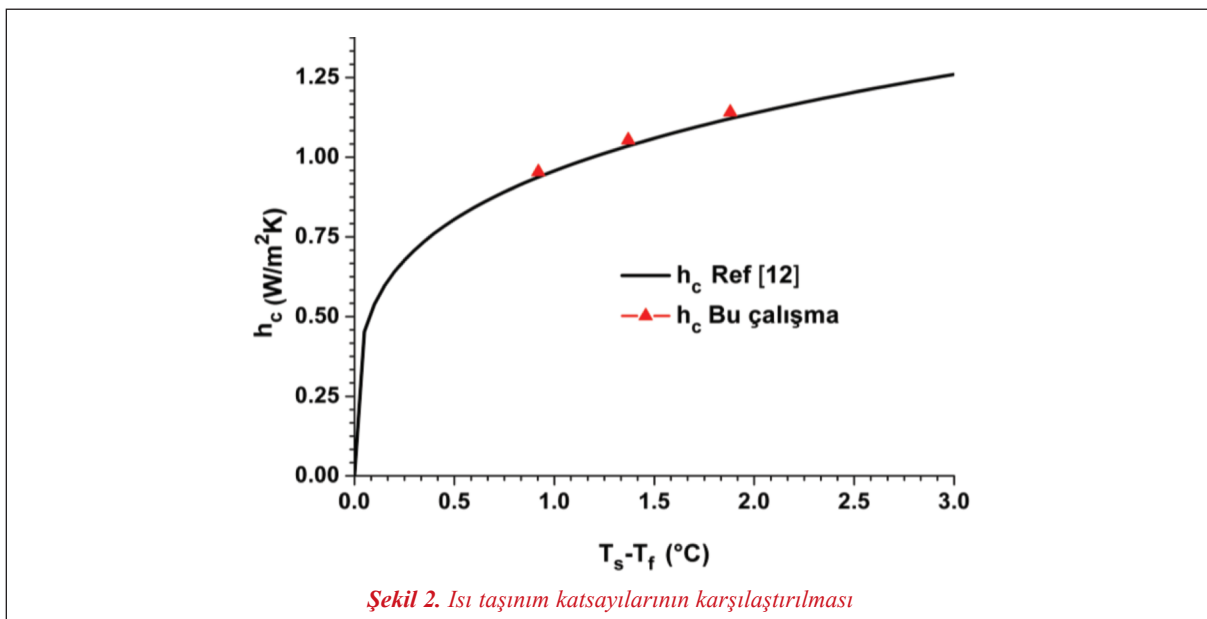


Şekil 1. a) Döşemeden soğutma sistemi b) Duvardan soğutma sisteminin şematik gösterimi.

Şekil 2’de bu çalışmada kullanılan çözüm yöntemi ile elde edilen sonuçlarla, literatürde verilen değerler kıyaslanarak bu çalışmanın doğrulaması gösterilmiştir. Bu amaçla, bu çalışmada döşeme yüzeyinde hesaplanmış ısı taşınım katsayıları literatürdeki benzer bir çalışmayla (Ref. [12]) karşılaştırılmıştır. Şekil 2’den görüldüğü gibi, soğutulmuş yüzey ile akışkan sıcaklığı arasındaki fark arttıkça her iki çalışmada da soğutulmuş yüzeydeki ısı taşınım katsayısı artmakta ve değerler birbirleri ile örtüşmektedir.

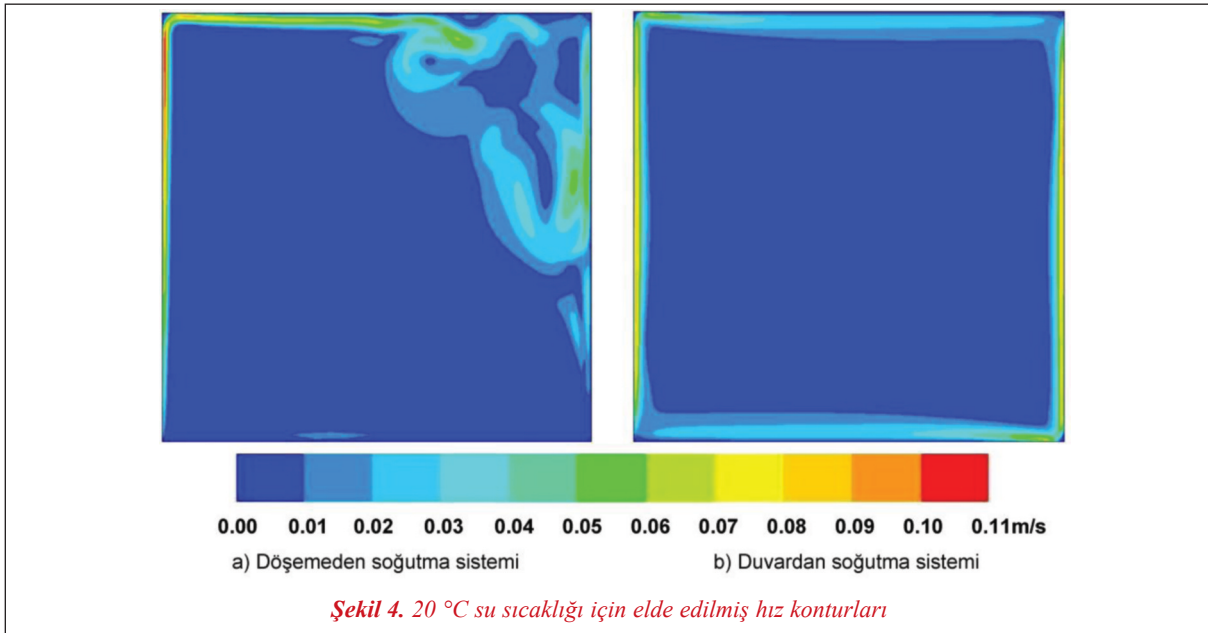
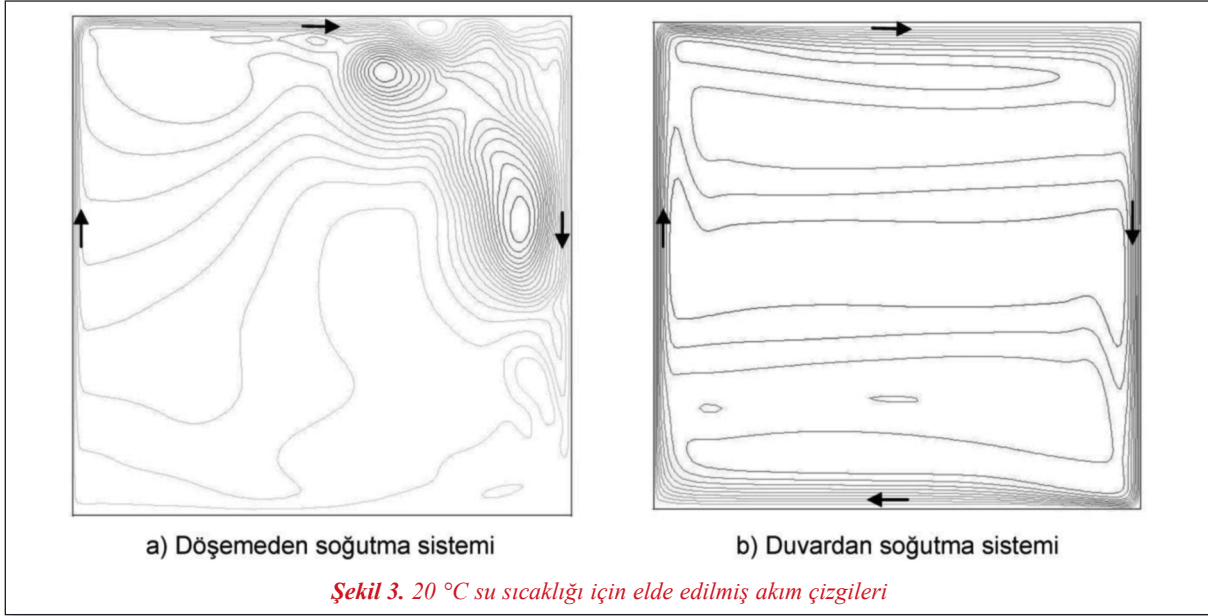
3. Sayısal Sonuçlar ve Tartışma

Döşemeden ve duvardan soğutma sistemine ait akım çizgileri ve hız konturları 20 °C su sıcaklığı için Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere mahallerin döşemeden ya da duvardan soğutulması, mahal içindeki hava hareketlerini ciddi bir şekilde etkilemektedir. Şekil 3b ve Şekil 4b’ten görüldüğü gibi duvardan soğutma uygulamasında, sağ duvardan soğuyarak aşağı doğru çökmekte olan soğuk hava sol taraftaki dış duvar tarafından ısıtılan havayı yükseltmektedir. Bu ardışık



Şekil 2. Isı taşınım katsayılarının karşılaştırılması

Makale



etki katı cidarlar üzerinde bir sınır tabaka akışı doğurmakta ve oda içinde yalnızca katı cidar üzerinde akan ve zamanla değişmeyen kararlı bir sirkülasyon oluşturmaktadır. Katı cidarların biraz ötesindeki, yani oda içindeki akışkan neredeyse durağan kalmaktadır. Yerden soğutma halinde ise (Şekil 3a ve Şekil 4a), tabana yakın bölgedeki akışkan soğuyarak zemine çökme eğilimi göstermektedir. Bununla beraber dış duvara yakın bölgedeki akışkan ısınarak yükselmekte ve tavan yüzeyine sevk edilmektedir. Tavan yüzeyinde akmakta olan akışkan Şekil 3a'da

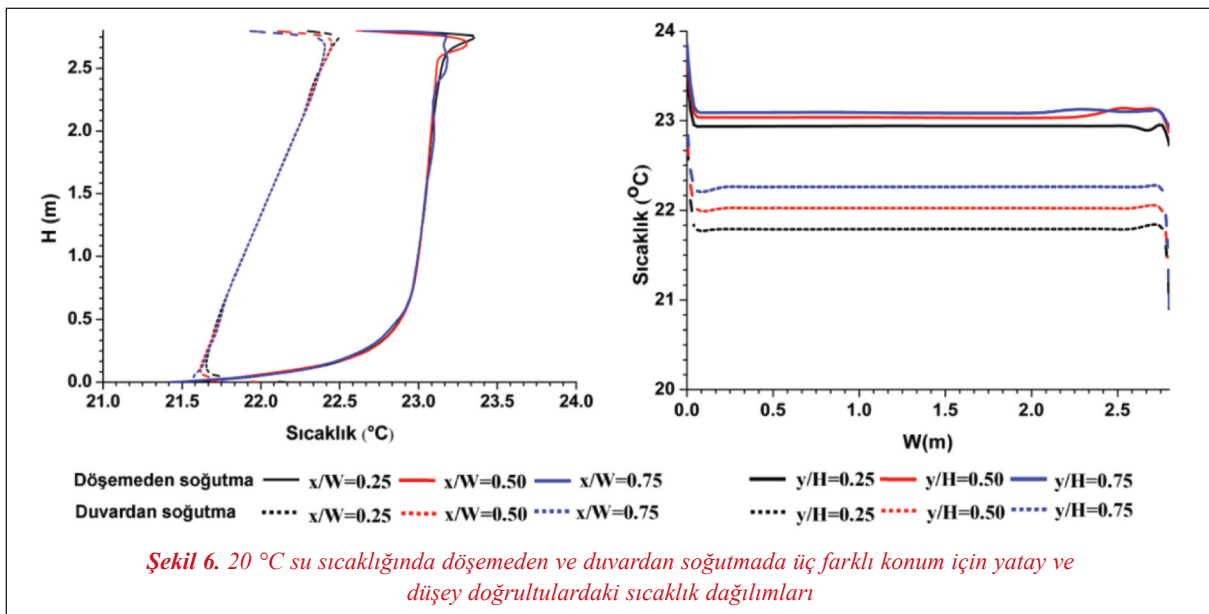
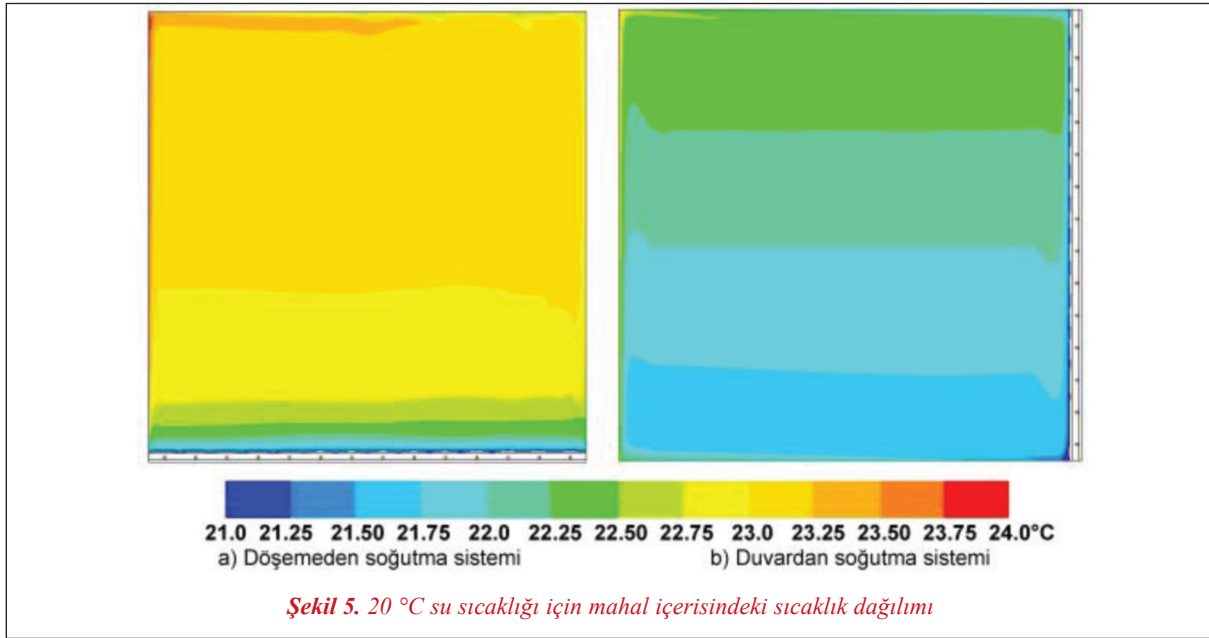
görüldüğü gibi peşi sıra girdaplar üreterek mahal içerisinde kararsız bir akışa sebep olmaktadır. Duvardan soğutmada, sol duvarda yükselen akışkan, soğuk duvarda soğurken çökelen akışkanın yerine sevk olmaktadır. Döşmeden soğutmada ise, soğuk havanın zeminde çöküp kalma eğilimi, soldan yükselen sıcak havayı, karşı duvar yüzeyinden aşağı doğru sevk edecek bir etkinin ortadan kalkmasına ve dolayısı ile oda içerisinde kararsız bir akışın oluşmasına sebep olmaktadır. Her ne kadar her iki soğutma metodunda farklı akış alanları görülse de, Şekil 3 ve

Şekil 4'ten görüldüğü gibi, oda içerisinde oluşan hızlar her iki soğutma sisteminde de çok küçük mertebelerde kalmaktadır. Yoğunluk farkı ile oluşan kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile mahal içindeki hava hızlarının en fazla 0.1 m/s mertebelerine yaklaşabildiği ve bu değerlerin de sadece cidara yakın olan sınır tabaka akışı bölgesi içinde olduğu görülmektedir. Sınır tabakanın dışında yani odanın neredeyse tamamında hava hızlarının 0.01 m/s mertebelerinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca, döşemeden soğutmada zemin yüzeyinde durağan bir akışkan görülmesi-

ne rağmen, duvardan soğutmada zemin yüzeyinde ayak bileği seviyelerindeki hızların 0.03 m/s mertebelerine ulaştığı ve diz seviyelerinin üstündeki hava tabakasının ise durağan olduğu görülmektedir.

Her iki soğutma sisteminde de ulaşılan hava hızları konfor şartlarını bozacak mertebelerde değildir.

Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla, oda içerisindeki sıcaklık dağılımı ve üç farklı konum için yatay ve dikey doğrultulardaki sıcaklık profilleri gösterilmiş-



Makale

tir. Bu şekillerde gösterilen sonuçlar 20 °C su sıcaklığı için yürütülmüş analizlere aittir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere döşemeden soğutma sisteminde mahal içerisindeki hava sıcaklığı duvardan soğutma sistemine göre az da olsa daha yüksektir. Döşemeden soğutma sisteminde mahal içerisindeki hava sıcaklığı yaklaşık olarak 22.97 °C iken duvardan soğutma sisteminde bu değer 22.03 °C bulunmuştur. Ayrıca 20 °C su sıcaklığı için döşemeden soğutma sisteminde elde edilen döşeme sıcaklıkları da birbirlerine yakın seviyelerdedir. Ortalama döşeme sıcaklığı döşemeden soğutmada 21.58 °C, duvardan soğutmada 22°C olmaktadır. Döşemeden soğutma sisteminde döşeme sıcaklığı ile ortalama oda sıcaklığı arasındaki fark 1.39 °C olurken duvardan soğutma sisteminde bu değer neredeyse sıfırdır (0.04 °C). Bunlara ek olarak, duvardan soğutma sisteminde döşemeden tavana doğru gidildikçe sıcaklığın lineer olarak arttığı ve zemin ve tavan seviyeleri arasındaki sıcaklık farkının 0.5 °C mertebesinde olduğu görülmektedir. Bu değer termal konfor yönünden herhangi bir rahatsızlığa sebep olacak seviyede değildir. Döşemeden soğutma sisteminde ise sıcaklığın diz seviyesinin altında ani olarak düştüğü, diğer bölgelerde neredeyse sabit kaldığı söylenebilir. Sonuç olarak duvardan soğutma sistemi döşemeden soğutma sistemine göre az da olsa daha iyi termal konfor şartları sağlamaktadır.

Döşemeden ve duvardan soğutma sistemlerinde su sıcaklığının hava sıcaklıkları ve ısı transferine etkisini göstermek amacıyla Tablo 1'de ortalama döşeme ve ortalama hava sıcaklıkları, iç ve dış duvar sıcaklıkları ve tavan sıcaklıkları verilmiştir. Yukarıda bahsedildiği gibi, döşemeden soğutma sisteminde mahal içerisindeki hava hareketleri kararsız olmakta, hesaplamala-

rın zamana bağlı olarak yapılmasını gerektirmektedir. Bu hesaplamalarda ulaşılan hızlar çok küçük mertebelerde kaldığı için, akışın kararsız olmasının tabloda sunulan ortalama değerler üzerinde ciddi bir etkisi yoktur. Tablo 1'de sunulan değerlere göre her iki soğutma sistemi için, azalan su sıcaklığı ile beklenildiği gibi ortalama döşeme ve oda sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. Döşemeden soğutma sistemlerinde elde edilen ortalama oda sıcaklığı, aynı su sıcaklığı için duvardan soğutma sistemine göre daha yüksektir. Yani, 15 °C, 20 °C ve 25 °C su sıcaklıkları için döşemeden soğutma sisteminde elde edilen ortalama mahal sıcaklıkları, duvardan soğutma sistemine göre sırasıyla 1.27 °C, 0.94 °C ve 0.64 °C daha yüksektir. Bu durumda aynı mahal sıcaklıklarının elde edilebilmesi için döşemeden soğutma sisteminde daha düşük sıcaklıktaki su kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır. Ayrıca 15 °C, 20 °C ve 25 °C su sıcaklıkları için döşemeden soğutma sisteminde iç ve dış duvar yüzey sıcaklıkları arasındaki fark sırasıyla 1.22 °C, 0.96 °C, 0.63 °C iken duvardan soğutma sisteminde ise bu fark 2.62 °C, 1.96 °C, 1.32 °C olmaktadır. Işınım ile ısı transferinin ortalama oda sıcaklığına olan etkisi, su sıcaklığının artmasıyla azalmaktadır. Soğutulmuş yüzeyler ile mahal içerisinde ışınım ile gerçekleşen ısı transferi sonucunda soğutulmuş yüzeylerdeki sıcaklık artışı su sıcaklıklarına göre sırasıyla, duvardan soğutma sisteminde 1.38 °C, 1.02 °C, 0.67 °C olurken döşemeden soğutma sisteminde 1.93 °C, 1.53 °C ve 2.4 °C olmaktadır.

Soğutulmuş yüzeylere ait ısı taşınım katsayıları da Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre duvardan soğutma sistemi için soğutulmuş yüzeydeki ısı taşınım katsayıları döşemeden soğutma sistemine göre daha yük-

Tablo 1. Döşemeden ve Duvardan Soğutmada Analiz Sonucu Elde Edilen Sonuçlar

	Döşemeden soğutma sistemi			Duvardan soğutma sistemi		
	T _{su} =15°C	T _{su} =20°C	T _{su} =25°C	T _{su} =15°C	T _{su} =20°C	T _{su} =25°C
T _{hava} (°C)	19.00	22.97	26.97	17.73	22.03	26.33
T _{döşeme} (°C)	17.10	21.58	26.04	17.67	21.99	26.31
T _{iç duvar} (°C)	18.78	22.73	26.85	16.42	21.05	25.68
T _{dış duvar} (°C)	20.00	23.69	27.48	19.04	23.01	27.00
T _{tavan} (°C)	18.63	22.80	26.78	17.81	22.08	26.37
h _{soğutulan yüzey} (W/m ² K)	5.88	6.16	6.39	8.87	9.05	9.41

sektir. Bunlara ek olarak her iki soğutma sisteminde su sıcaklığı artırıldığında ısı taşınım katsayısı artmaktadır. Yapılan analizler sonucunda her iki soğutma sisteminde de ısı transfer mekanizması olarak ışıınının dominant olduğu, döşemeden soğutmada toplam ısı transferinin %97'sinin, duvardan soğutmada ise %86'sının ışıınınla gerçekleştiği görülmüştür.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada 36 °C dış ortam sıcaklığına sahip Kocaeli ili için 15 °C, 20 °C ve 25 °C olmak üzere üç farklı su sıcaklığı kullanılarak döşemeden ve duvardan soğutma sistemlerinin karşılaştırılması sayısal olarak yapılmıştır. Buna göre bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Duvardan soğutma sisteminde mahal içerisindeki akış daimi olurken, döşemeden soğutma sisteminde zamana bağlı olmaktadır. Ancak döşemeden soğutmadaki zamana bağlı olan akış alanının sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi yok denecek kadar azdır.
- Mahal içerisindeki hava hızları her iki sistemde de küçük mertebelere sahiptir.
- Aynı su sıcaklığı için duvardan soğutma sisteminde elde edilen döşeme sıcaklığı döşemeden soğutma sistemine göre daha yüksek olurken ortalama oda sıcaklığı daha düşük mertebelere sahiptir. Ancak aradaki sıcaklık farkı çok belirgin seviyelerde değildir.
- Döşemeden soğutma sisteminde, döşeme yüzeyi ile diz seviyesindeki hava sıcaklık farkı yaklaşık olarak 1.39 °C iken, bu seviyenin üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı oluşmaktadır. Duvardan soğutma sisteminde ise döşeme yüzeyi ile ayak bileği seviyesindeki hava sıcaklığı arasında sadece 0.04 °C'lik bir fark bulunmaktadır. Ancak duvardan soğutma sisteminde döşemeden tavana doğru bir sıcaklık tabakalaşması oluşmakta, ancak taban ve tavan seviyeleri arasındaki fark 0.5 °C mertebelerinde olduğu için konfor şartları bakımından olumsuz bir etki yaratmamaktadır.
- Duvardan soğutma sisteminde ışıınının ısı transferine olan etkisi döşemeden soğutma sistemine göre daha azdır.
- Soğutulan yüzeydeki ısı taşınım katsayısı duvardan soğutma sisteminde daha yüksek olmaktadır.

Yukarıda özetlenen sonuçlar, döşeme üzerinde günlük hayatta sık sık kullanılan halı, mobilya vb. eşyaların olmadığı kabul edilerek elde edilmiştir. Döşeme üzerinde bulunan bu tür eşyalar, döşemeden soğutma sisteminin performansını olumsuz yönde etkilerken, duvardan soğutma sisteminde böyle bir durum söz konusu değildir. Ayrıca, duvardan soğutma sistemi kullanıldığında sistemde kullanılan boruların tek bir duvar yerine mahaldeki diğer duvarlara da yerleştirilmesi suretiyle ısı transfer yüzey alanı artırılarak sistemde daha yüksek sıcaklıkta su kullanımı ile soğutma yapılabilir. Dolayısıyla hem işletme maliyetleri azaltılırken hem de sera gazı emisyonlarının azaltılması suretiyle çevreci bir soğutmanın yapılmasına imkân tanır. Sonuç olarak, duvardan soğutma sistemlerinin uygulamada döşemeden soğutma sistemlerine göre daha fazla tercih edilmesi önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] Crocker, C, Higgins, J, Radiant Heating & Cooling Systems: A Theoretical Discussion, Literature Review and Future Research, Technical Report, Acoustics & Noise Research Group, University of British Columbia, 2012.
- [2] Lim, J. H, Jo, J. H, Kim, Y. Y, Yeo, M. S, Kim, K. W, Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings, Building and Environment, 41, 60-73, 2006.
- [3] Olesen, B. W, Radiant heating and cooling by embedded water-based systems, International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark, 2004.
- [4] Olesen B. W, Radiant Floor Cooling Systems, ASHRAE Journal, 16-22, 2008.
- [5] Hu, R, Niu, J. L, A review of the application of radiant cooling & heating systems in Mainland China, Energy and Buildings, 52, 11-19, 2012.
- [6] Laouadi, A, Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software, Building and Environment, 39, 421-431, 2004.
- [7] Causone, F, Corgnati, S. P, Filippi, M, Olesen, B.W, Solar radiation and cooling load calculati-

Makale

- on for radiant systems: Definition and evaluation of the Direct Solar Load, *Energy and Buildings*, 42, 305-314, 2010.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Fundamentals Volume of ASHRAE Handbook, Chapter 8: Thermal Comfort*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, USA, 2001.
- [9] Song, D, Kim, T, Song, S, Hwang, S, Leigh, S. B, Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation, *Applied Thermal Engineering*, 28, 1299 – 1311, 2008.
- [10] Odyjas, A, Górká, A, Simulations of floor cooling system capacity, *Applied Thermal Engineering*, 51, 84-90, 2013.
- [11] Ren, Y, Li, D, Zhang, Y, Numerical Simulation of Thermal Comfort Degree in Radiant Floor Cooling Room, *Building Simulation*, 2007.
- [12] Carli, M. D, Scarpa, M, Tomasi, R, Zarrella, A, DIGITHON: A numerical model for the thermal balance of rooms equipped with radiant systems, *Building and Environment*, 57, 126-144, 2012.