

Zemin Altı Otopark Yol Yüzeylerinde Buzlanma Önleyici Sistemin Hidronik Isıtma Kaplaması Kullanılarak Sayısal Olarak Modellenmesi

Nurullah KAYACI*

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ
(ORCID: [0000-0002-8843-8191](https://orcid.org/0000-0002-8843-8191))



Anahtar kelimeler: Yol güvenliği, Hidronik ısıtmalı Kaplama, Zemin altı otopark, Kar-buz oluşumu, MATLAB.

Öz

Metropol kentlerde yüksek katlı binalar veya rezidansların kış aylarında zemin altı otoparklarının giriş ve çıkış alanlarında oluşan kar veya buz nedeniyle araçların otoparka giriş ve çıkışları ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bir yol yüzeyindeki kaygan koşulları azaltmak için kimyasal tuz veya kar küreme gibi mekanik olan bazı konveksiyonel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin gerek yol altyapılarına gerekse çevresel sorunlara neden olduğundan daha çevreci ve alternatif bir yöntem olan Hidronik Isıtmalı Kaplama (HHP) yönteminin kullanılması ön plana çıkmaktadır. HHP yöntemi araçların geçtiği yolun altına yerleştirilmiş ve içinden sıcak akışkan geçen borulardan oluşmaktadır. Bu çalışmada, zemin altı otopark giriş ve çıkış yollarında oluşacak kar veya buzu önlemek amacıyla HHP sistemi için yeni bir model geliştirilmiştir. Önerilen modelin özgünlüğü ise, ısı kaynağı olarak kazan veya ısı pompası gibi ek bir ısıtma sistemi uygulamak yerine binanın merkezi ısıtma sisteminden faydalanılmasıdır. MATLAB programında geliştirilen yeni bir kod sayesinde, meteorolojik veriler kullanılarak, zemin otopark giriş ve çıkış alanının altına yerleştirilen PEX borularıyla araç yolunun ısıtılmasının zamana bağlı üç boyutlu olarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Zemin otopark giriş ve çıkış yollarında buz ve kar oluşmaması için borular arası mesafe, gömme derinliği, hava sıcaklığı ve akışkan giriş sıcaklığının etkileri incelenmiştir. Ek olarak, farklı hava sıcaklıklarına göre hidronik ısıtma borularının yerleşiminin ve akışkan giriş sıcaklığının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Numerical Modelling of Anti-icing System on Underground Car Park Road Surfaces Using Hydronic Heating Pavement

Keywords: Road safety, Hydronic heating pavement, Underground car park, Snow-ice formation, MATLAB.

Abstract

In winter months, it is serious problem for vehicles to enter and exit the car park due to snow or ice formed on the road surface of underground car park of high-rise buildings or residences in metropolitan cities. In order to reduce slippery conditions on a road surface, some conventional methods are used that are mechanical, such as chemical salt sprinkling or snow plowing. Since these methods cause both road infrastructures and environmental problems, the use of Hydronic Heating Pavement (HHP) method, which is a more greener and alternative method, comes to the fore. The HHP method consists of PEX pipes placed under underground car park road surfaces and hot fluid passing through them. In this study, a new model has been developed for the HHP system in order to prevent snow or ice formed on the underground car park road surfaces. However, the novelty of proposed model is that instead of implementing an additional heating system such as a boiler or heat pump as the heat source, the

*Sorumlu yazar: nkayaci@nku.edu.tr

Geliş Tarihi: 15.11.2021, Kabul Tarihi: 21.02.2022

central heating system of the building is used. Thanks to a new code developed in MATLAB, using meteorological data, transient 3-D temperature distribution is simulated in the heating of the road surface with PEX pipes placed under the surface of underground car park. The effects of distance between pipes, burial depth, air temperature and fluid inlet temperature on preventing ice and snow formed on road surface of the underground car park are examined. In addition to this, an optimization study is carried out for the placement of PEX pipes and fluid inlet temperature according to different air temperatures.

1. Giriş

Kış aylarında araç veya yaya olarak seyahat ederken yollardaki soğuk hava ve kar yağışının etkisiyle sürtünme katsayısının düşmesi birçok kazaları beraberinde getirmekte ve bu kazalar birçok kere oldukça yıkıcı sonuçlar doğurmaktadır [1]-[3]. Devletler vatandaşlarının yol güvenliğini sağlamak amacıyla düşük maliyetleri ve yüksek verimlilikleri nedeniyle kar ve buz çözücü tuzlar hala yaygın olarak uygulanmaktadır. Yapılan akademik çalışmalar ve projeler, bu tuzların yollara zarar verdiğini, bitki örtüsünü ve toprağı kirlettiğini göstermektedir [4]-[6]. Bir başka geleneksel kar temizleme yöntemi ise kar küreme makineleri ve süpürücüler gibi mekanik ekipmanların kullanılmasıdır. Mekanik ekipmanlar, yanlış kullanıldığında yol yüzeyine zarar vermekte ve bakım maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca mekanik ekipmanlar, yoğun kar yağışında çok daha fazla zaman ve iş gücü gerektirmektedir [7]. Bu iki kar kaldırma veya temizleme yöntemleri çevreci ve sürdürülebilir olmayan ve yıkıcı etkilere sahip olan yöntemler olduğu aşikârdır. Günümüzde teknolojinin gelişmesi ve insanların çevreye olan duyarlılıkları, özellikle yenilenebilir enerji kullanım yöntemleri gibi çevre dostu ve sürdürülebilir teknikleri kullanıma sokmaya itmektedir. Bu yöntemlerden ön plana çıkan Hidronik Isıtımlı Kaplama (HHP) yöntemidir [8]. HHP sistemleri, kar ve buz oluşumunu engellemek amacıyla yolların altına yerleştirilen PEX borularının içinde sıcak akışkan dolaştırılarak uygulanmakta ve bu sıcak akışkanı elde etmek için atık ısı [9], jeotermal [10]-[12] veya güneş enerjileri [13],[14] gibi kullanılmaktadır.

HHP sistemlerinin yollarda uygulanması ilk olarak 1948'de ABD'nin Oregon eyaletinde uygulanmış ve bu sistemde enerji kaynağı olarak jeotermal sıcak su kullanılmıştır [15]. Kurulan diğer bir HHP sistemi, İsviçre'de 1994'te yenilenebilir enerjiler

kullanarak bir köprü yüzeyinin kar ve buzunu çözmek için SERSO adı verilen bir proje başarıyla uygulanmıştır [16]. 2002'de Japonya kurulan ısıtılmalı kaldırımlar ve 2005'te Almanya'da tren platformuna kurulan ısıtma sistemleri de başka örnekler olarak söylenebilir [8].

HHP sistemini analiz etmek için farklı sayısal çalışmalar geliştirilmiş ve bu çalışmalarda yüzeyde kar ve buz oluşumunun önüne geçmek için çözüm alanının 3-D sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Bunu gerçekleştirmek için bazı çalışmalarda hazır paket programları COMSOL [13], ANSYS FLUENT [17] vb. kullanılırken bazı çalışmalarda ise programlama dillerinde yeni bir kod geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, zemin altı otopark giriş ve çıkış yollarında oluşacak kar ve buz önlemek amacıyla HHP sisteminin 3-boyutlu modellenmesi MATLAB programında geliştirilen yeni bir kod sayesinde gerçekleştirilmiştir. Zemin otopark giriş ve çıkış alanının altına PEX boruları yerleştirilerek hidronik olarak araç yolunun ısıtılarak kar ve buz oluşumunun önüne geçilmesi noktasında simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Zemin otopark giriş ve çıkış yollarına uygulanan HHP sisteminde borular arası mesafe, gömme derinliği, hava sıcaklığı ve akışkan giriş sıcaklığının etkileri incelenmiştir. Ek olarak, farklı hava sıcaklıklarına göre HHP sistemine ait ısıtma borularının yerleşiminin ve akışkan giriş sıcaklığının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın özgünlüğü, (i) ısı kaynağı olarak kazan veya ısı pompası gibi ek bir ısıtma sistemi uygulamak yerine binanın merkezi ısıtma sisteminden faydalanılması, (ii) HHP sisteminde gerçekçi sınır koşullarına bağlı, meteorolojik verileri kullanarak, zamana bağlı 3-boyutlu sıcaklık dağılımını elde etmek için MATLAB programında yeni bir kod geliştirilmesidir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Sayısal model

Zemin otopark giriş ve çıkış yollarında donatılı betona yerleştirilen boruların etrafındaki üç boyutlu sıcaklık dağılımını çözmek için, meteorolojik veriler kullanılarak gerçekçi sınır koşullarına sahip yeni bir model geliştirilmiştir. Donatılı ve donatısız betondaki ısı transfer denklemleri, su sıcaklığının çözüm alanına dâhil edilmesiyle dinamik sınır koşullarına sahip iki boyutlu geometride çözüm gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni, boru eksenine boyunca sıcaklık gradyanı çok küçük olduğu için ihmal edilebilir olmasıdır. İlk olarak, Denk. (1) tüm çözüm alanı için iki boyutlu olarak çözülmekte ve daha sonra çözüm, üç boyutlu çözümü elde etmek için boru uzunluğu boyunca genişletilmektedir.

$$\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} \quad (1)$$

Sayısal problemi basitleştirmek için mevcut çalışmada bazı varsayımlar yapılmıştır. İlk varsayım, tüm yatay boruların donatılı beton ortamında aynı derinlikte gömülü olduğudur. İkinci olarak, su sıcaklığı y yönünde (boru eksenine dik) sabitken her boru için aynı akış hızı varsayılır. Üçüncü varsayım, hem kütle transferinin hem de kolektörlerin ısı transferi üzerindeki etkileri ihmal edilmiştir. Son olarak, ısı transfer ortamının (donatılı veya donatısız beton) homojen olduğu varsayılır; dolayısıyla termal özellikler (iletkenlik, difüzyon vb.) sabit değer olarak kabul edilir.

Zemin otopark giriş ve çıkış yollarında donatılı betona yerleştirilen yatay borular ve HHP sisteminin çözüm alanı Şekil 1'de görülmektedir. HHP sistemine ait geliştirilen modelde, L_p yatay paralel boruların uzunluğunu, B_p ise borular arası mesafeyi göstermektedir. Boruların gömüldüğü dikey mesafeye P_d , donatısız beton ve donatılı betonun dikey mesafeleri de sırasıyla S_p ve S_c 'dir. S_d ise simülasyon derinliğidir. Modelin alt sınır bölgesinden ($y=S_d$) izolasyon uygulandığında

dolayı alt sınır bölgesinden aşağıya doğru ısı transferi (q_a) olmadığı varsayılmıştır. q_t beton yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının toplamını ifade etmektedir. Çözüm alanı için problemin başlangıç ve sınır koşulları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$T_i = T(P_d, t) \Rightarrow t = 0 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=B_p/2} = 0 \quad (3)$$

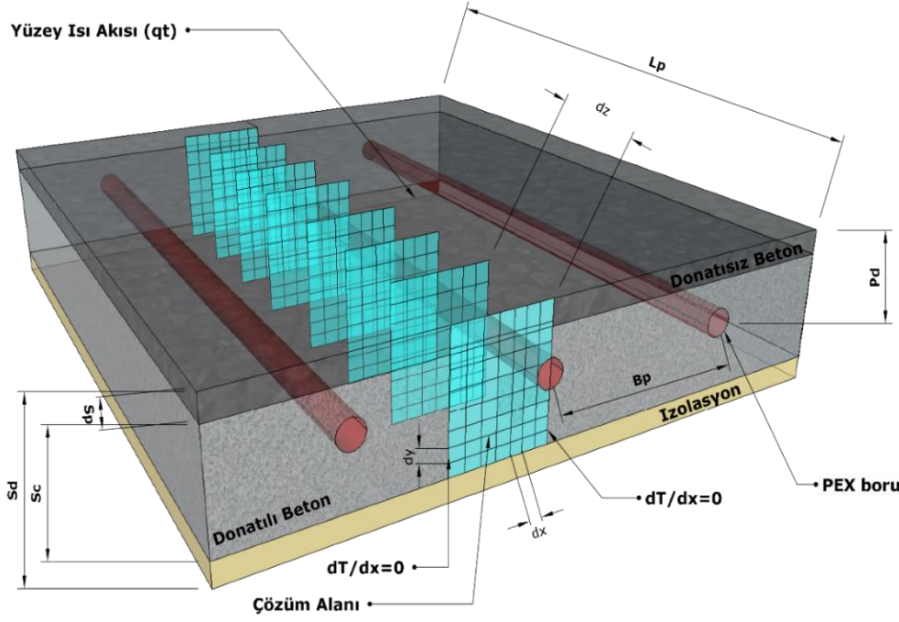
$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (4)$$

$$q_a (W / m^2) = 0, \quad y = S_d \quad (5)$$

$$q_t (W / m^2), \quad y = 0 \quad (6)$$

Enerji denge denklemleri yazılarak yüzey ısı akıları, yüzey-ortam ısı etkileşimi mekanizmaları dikkate alınarak gerçekleştirilir. Donatısız beton yüzeyindeki meydana gelen ısı akıları Taşınım, Buharlaştırma, Gelen güneş radyasyonu, Giden ve Gelen uzun dalga radyasyonu olup, bunlara ait eşitlikler MATLAB'da geliştirilen modelin içerisine meteorolojiden alınan verilerle birlikte entegre edilmiştir [18],[19]. Bu veriler, Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün İstanbul istasyonunda ölçülen veriler olup, toprak yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akıları hesaplanırken kullanılmıştır. İstanbul için ölçülen bu veriler şöyledir; aylık ortalama rüzgâr hızları, bağıl nemleri, en düşük ve en yüksek hava sıcaklıkları, güneş radyasyonları ve güneşlenme süreleridir.

Akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarını hesaplamak için borunun tamamını küçük parçalara ayırarak iki boyutlu çözüm alanları birbirlerine bağlanarak üç boyutlu donatılı betondaki sıcaklık profilleri elde edilmiştir. Geliştirilen modelde boru boyunca küçük bölümlere bölünen boruda, boru girişinden itibaren birinci bölümden çıkan akışkan sıcaklığı ikinci bölümün akışkan giriş sıcaklığı olarak alınmış ve bu boru boyunca gerçekleştirilerek üç-boyutlu sıcaklık profili elde edilmiştir. Akışkan çıkış sıcaklıkları, donatılı betonda boru ile çözüm alanı arasındaki enerji dengesi kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır;



Şekil 1. HHP sistemi ve çözüm alanı

$$T_{f,o} = T_c - (T_c - T_{f,in}) e^{\frac{-k_{RC} L_p}{m_f C_{p,f}}} \quad (7)$$

$T_{f,in}$, $T_{f,o}$ ve T_c sıcaklıkları sırasıyla akışkan giriş, çıkış ve beton sıcaklıklarını ifade etmektedir. C_p ve m_f ise sırasıyla akışkanın özgül ısı ve kütleli debisini simgelemektedir. k_{RC} borunun yerleştirildiği donatılı betonun ısı iletim katsayısıdır.

2.2 Sayısal modelin çözümü

Donatılı betondaki ısı transferinin çözümünde Değişen Yönlü Kapalı Formülasyon (DYKF-Alternating direction implicit) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, birbirini izleyen iki zaman adımında satır ve sütunlar için ayrı ayrı fark formülleri yazılarak düğüm sıcaklıkları elde edilmiştir. DYKF yönteminde Denk. (1)'in sonlu fark formu (n+1)'inci zamanda şöyledir;

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{(\Delta y)^2} \quad (8)$$

(n+2)'inci zamanda ise;

$$\frac{T_{i,j}^{n+2} - T_{i,j}^{n+1}}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j-1}^{n+2} - 2T_{i,j}^{n+2} + T_{i,j+1}^{n+2}}{(\Delta y)^2} \quad (9)$$

x ve y yönünde eşit aralık için;

$$\Delta x = \Delta y, \quad \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} = r \quad (10)$$

Bu formüller, her bir zaman adımında bilinenleri ve bilinmeyenleri bir arada olacak şekilde aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir;

$$-r T_{i-1,j}^{n+1} + (1+2r) T_{i,j}^{n+1} - r T_{i+1,j}^{n+1} = r T_{i,j-1}^n + (1-2r) T_{i,j}^n + r T_{i,j+1}^n \quad (11)$$

$$-r T_{i,j-1}^{n+2} + (1+2r) T_{i,j}^{n+2} - r T_{i,j+1}^{n+2} = r T_{i-1,j}^{n+1} + (1-2r) T_{i,j}^{n+1} + r T_{i+1,j}^{n+1} \quad (12)$$

HHP sistemi için geliştirilen model incelendiğinde, donatılı ve donatısız olmak üzere iki farklı katman bulunmakta ve bu katmanların termofiziksel özellikleri farklı olduğundan dolayı geliştirilen modele ayrı ayrı tanımlanması gerekmektedir. Bundan dolayı, donatılı ve donatısız beton arayüzeyinde her bir düğüm etrafındaki kontrol hacmi için enerji dengesi yazılmıştır. Şekil 2, düğüm etrafındaki kontrol hacmi ve ısı akıları dikkate alınarak donatılı ve donatısız beton arasındaki katman ara yüzeyindeki bir düğüm için enerji dengesini göstermektedir. Enerji dengesi aşağıda verilmiştir:

$$q_1 - q_2 + q_3 - q_4 = (\rho C_p)_{ave} (\Delta x)(\Delta y) \frac{\partial T_{i,j}}{\partial t} \quad (13)$$

Burada;

$$(\rho C_p)_{ave} = \frac{(\rho C_p)_{RC} + (\rho C_p)_{PC}}{2}, k_{ave} = \frac{k_{RC} + k_{PC}}{2} \quad (14)$$

Isı akısı terimleri ise:

$$q_1 = k_{ave} \frac{T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n}{\Delta x} \quad (15)$$

$$q_2 = k_{ave} \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n}{\Delta x} \quad (16)$$

$$q_3 = k_{PC} \frac{T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta y} \Delta x \quad (17)$$

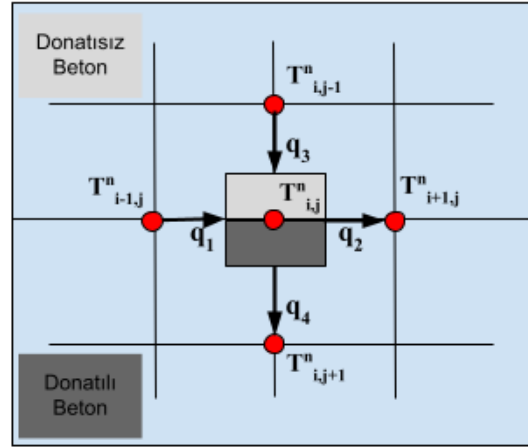
$$q_4 = k_{RC} \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta y} \Delta x \quad (18)$$

RC ve PC alt indisi sırasıyla donatılı ve donatısız betonu ifade etmektedir. C_p, ρ ve k sırasıyla katmanın özgül ısı, yoğunluk ve ısı iletim katsayısını simgelemektedir. DYKF yönteminin fark formülleri yeniden ele alınarak donatılı ve donatısız beton tabakasının üst ve alt arayüzey düğümleri için yeni fark formülleri elde edilmiştir. Denk. (19) ve (20) sırasıyla satırlar ve sütunlar için yeni ara yüzey formülleri olmuştur [20],[21].

$$-r_{ave} T_{i-1,j}^{n+1} + (1 + 2r_{ave}) T_{i,j}^{n+1} - r_{ave} T_{i+1,j}^{n+1} = r_{RC} T_{i,j-1}^n + (1 - r_{RC} - r_{PC}) T_{i,j}^n + r_{PC} T_{i,j+1}^n \quad (19)$$

$$-r_{RC} T_{i,j-1}^{n+2} + (1 + r_{RC} + r_{PC}) T_{i,j}^{n+2} - r_{PC} T_{i,j+1}^{n+2} = r_{ave} T_{i-1,j}^{n+1} + (1 - 2r_{ave}) T_{i,j}^{n+1} + r_{ave} T_{i+1,j}^{n+1} \quad (20)$$

DYKF denklemleri kullanılarak belirli bir zamanda donatılı ve donatısız betondaki sıcaklık dağılımı ardarda olarak çözülür. Sonuç matrisleri üç köşegenli olduğundan bu denklemler Thomas Algoritması kullanılarak çözülmüştür. DYKF sonlu fark denklemleri gerçekçi sınır koşulları ve meteorolojik verilerle birlikte MATLAB programına entegre edilerek çözülmüştür. MATLAB programında geliştirilen kodun çözüm algoritmasının akış diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Donatılı ve donatısız beton katmanlarının ara yüzeyindeki enerji dengesi

3. Simülasyon çalışması (İstanbul örneği)

Metropol kentlerde yüksek katlı binalar veya rezidansların kış aylarında zemin altı otoparklarının giriş ve çıkış alanlarında oluşan kar veya buz nedeniyle araçların otoparka giriş ve çıkışları neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Bunun önüne geçmek için Hidronik Isıtımlı Kaplama (HHP) yönteminin kullanılması şüphesiz doğru bir yaklaşımdır. Bu çalışmada, İstanbul'da zemin otopark giriş ve çıkış yollarında oluşacak kar veya buz önlemek amacıyla HHP sisteminin gerçekçi sınır koşulları ve meteorolojik verilerle MATLAB programında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. PEX boruların gömülü olduğu alana (8 m x 5 m) yatay ve paralel HHP sistemi yerleştirilerek otopark giriş ve çıkışlarında oluşacak kar veya buzun oluşmaması için simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Bu çalışmanın özgünlüğü, MATLAB programında geliştirilen bir kod olması dışında, ısı kaynağı olarak kazan veya ısı pompası gibi ek bir ısıtma sistemi uygulamak yerine binanın merkezi ısıtma sisteminin ısısından faydalanılmasıdır. Şekil 4'de binanın ısıtma sistemine gidiş ve dönüş hatları ve zemin otoparkına giriş ve çıkış yollarının altına yani donatılı ve donatısız betona yerleştirilen PEX borularının şematik görünümü sunulmuştur.

Donatısız beton yüzeyindeki tüm ısı akıları yukarıda bahsedilen sayısal modele dahil edilirken Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü İstanbul ofisinden alınan veriler MATLAB programına dahil edilerek simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan anahtar parametrelerin değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

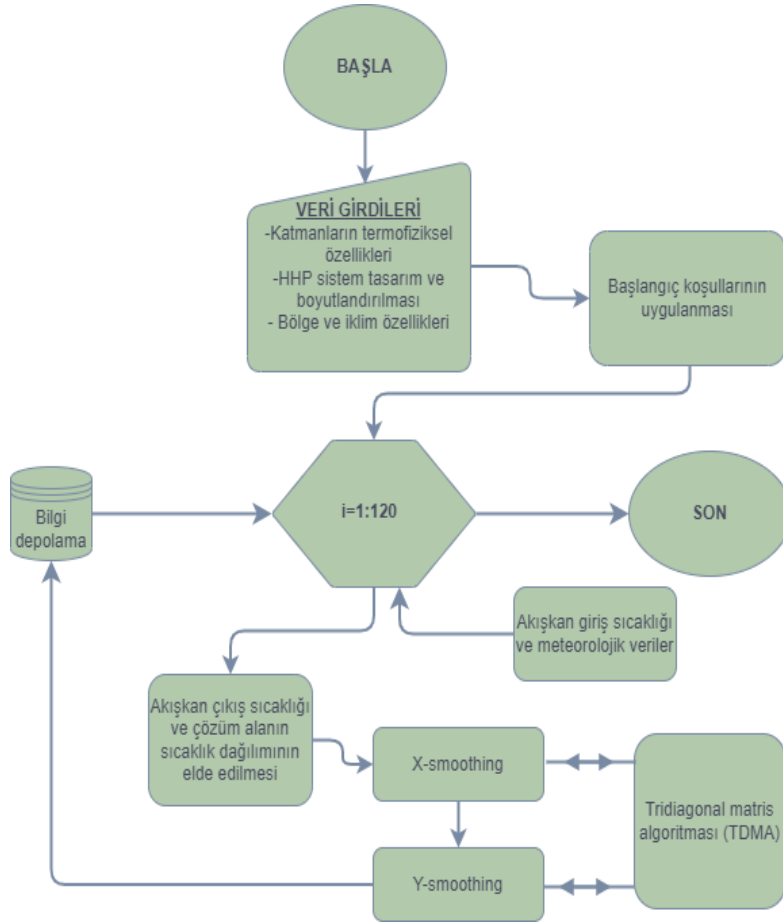
MATLAB programında geliştirilen HHP sistemine ait gerçekleştirilen simülasyon

çalışmalarının detayları Tablo 2’te verilmiştir. Simülasyonlar, İstanbul’da zemin otopark giriş ve çıkış yollarında oluşacak kar veya buzu önlemek amacıyla HHP sisteminin, 5 günlük süre boyunca gerçekçi sınır koşulları ve meteorolojik verilerle MATLAB programında modellenerek uygulanmıştır.

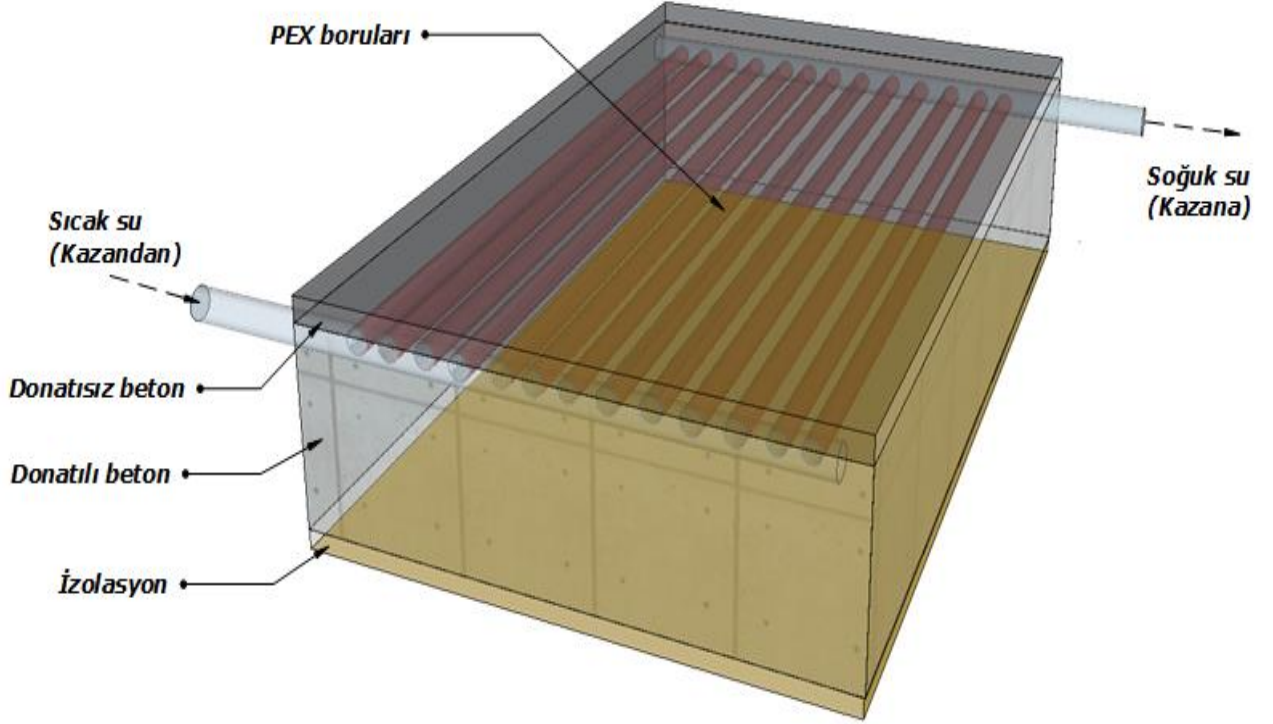
4. Bulgular ve Tartışma

Yüksek katlı binalar veya rezidansların zemin altı otoparklarının rampalı giriş ve çıkış alanlarında kış aylarında meydana gelen kar veya buz araçların otoparka giriş ve çıkışlarını oldukça zor bir durum haline getirmektedir. Bu çalışmada, İstanbul’da zemin otopark giriş ve çıkış yollarında oluşacak kar veya buzu önlemek amacıyla HHP sisteminin gerçekçi sınır koşulları ve meteorolojik verilerle MATLAB programında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma kapsamında, bir binanın rampalı otopark giriş ve çıkış yollarının

altına yerleştirilen PEX boruları sayesinde otopark giriş ve çıkışlarında oluşacak kar veya buzun oluşmaması noktasında simülasyon çalışmaları yapılmıştır. HHP sisteminde, otopark giriş ve çıkış yollarının yüzeyine yerleştirilen sensörler yardımıyla sistem kontrolörü devreye girmekte ve kazandan su alınmakta ve akabinde sıcak su PEX borularında dolaşarak yüzeyde kar veya buzun oluşmasını engellemektedir. Yapılan simülasyon çalışmalarında, rampalı otopark giriş ve çıkış yollarında buz ve kar oluşmaması için gömme derinliği, akışkan giriş sıcaklığı, hava sıcaklığı ve borular arası mesafenin etkileri incelenmiştir. Ek olarak, farklı hava sıcaklıklarına göre hidronik ısıtma borularının yerleşiminin ve akışkan giriş sıcaklığının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 5, $T_{f,in}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $B_p=0.1\text{ m}$ ($N=50$) ve $T_{hava}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerleri alınarak, farklı gömme derinliğine göre yüzeyden dikey mesafedeki ve boru merkezinden yatay mesafedeki sıcaklık dağılımını göstermektedir.



Şekil 3. Çözüm algoritmasının akış diyagramı



Şekil 4. Isıtma sisteminin PEX borularına bağlantısı ve sistem elemanlarının şematik görünümü

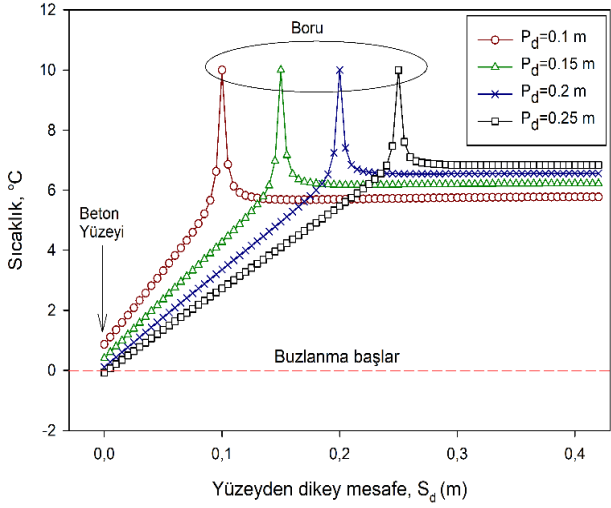
Tablo 1. Simülasyonda kullanılan parametrelerin değerleri

İş akışkanı	Su+Etilen Glikol, $Q_f= 1.143 \text{ m}^3/\text{h}$ ($N=50$)
Donatılı beton özellikleri	$k_{RC}=2.5 \text{ W/mK}$, $C_p=750 \text{ J/kgK}$, $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$
Donatısız beton özellikleri	$k_{PC}=0.7 \text{ W/mK}$, $C_p=920 \text{ J/kgK}$, $\rho=2110 \text{ kg/m}^3$
Katmanlarındüşey uzunlukları	$S_c=0.36 \text{ m}$, $S_p=0.06 \text{ m}$
Boru özellikleri	PEX, $k_b=0.40 \text{ W/mK}$
Boru geometrisi	$L_p=8 \text{ m}$, $D_o/D_i = 15/10 \text{ mm}$
Borular arası mesafe	$B_p=0.05 \text{ m}$ ($N=100$) - $B_p=0.2 \text{ m}$ ($N=25$)
Gömme derinliği	$P_d= 0.1-0.25 \text{ m}$
Akışkan Sıcaklığı	$T_{f, in}=10 \text{ }^\circ\text{C}$ - $70 \text{ }^\circ\text{C}$
Dış Hava Sıcaklığı	$T_{hava}= -10 \text{ }^\circ\text{C}$, $- 5 \text{ }^\circ\text{C}$, $0 \text{ }^\circ\text{C}$

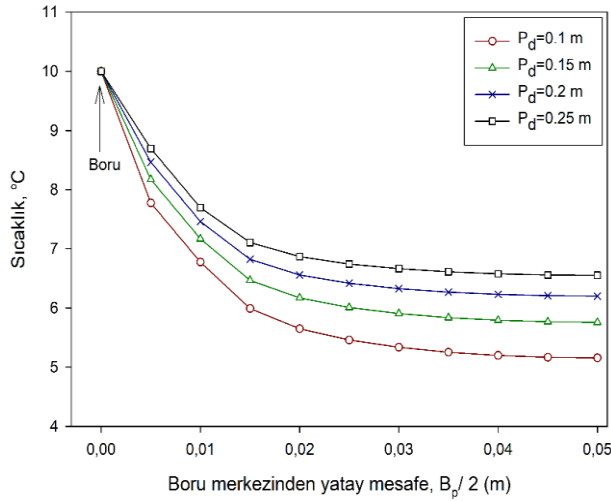
Tablo 2. Simülasyon çalışmasının detayları

Simülasyonlar	N	B_p	P_d	T_{fin}	T_{hava}
Sim.1	50	0.1	0.1	10 °C	0 °C
Sim.2	50	0.1	0.15	10 °C	0 °C
Sim.3	50	0.1	0.2	10 °C	0 °C
Sim.4	50	0.1	0.25	10 °C	0 °C
Sim.5	50	0.1	0.1	10 °C	0 °C
Sim.6	50	0.1	0.1	20 °C	0 °C
Sim.7	50	0.1	0.1	30 °C	0 °C
Sim.8	50	0.1	0.1	40 °C	0 °C
Sim.9	50	0.1	0.1	10 °C	-5 °C
Sim.10	50	0.1	0.1	20 °C	-5 °C
Sim.11	50	0.1	0.1	30 °C	-5 °C
Sim.12	50	0.1	0.1	40 °C	-5 °C
Sim.13	50	0.1	0.1	10 °C	-10 °C
Sim.14	50	0.1	0.1	20 °C	-10 °C
Sim.15	50	0.1	0.1	30 °C	-10 °C
Sim.16	50	0.1	0.1	40 °C	-10 °C
Sim.17	50	0.1	0.1	50 °C	-10 °C
Sim.18	100	0.05	0.1	10 °C	-5 °C
Sim.19	100	0.05	0.1	20 °C	-5 °C
Sim.20	100	0.05	0.1	30 °C	-5 °C
Sim.21	100	0.05	0.1	10 °C	-10 °C
Sim.22	100	0.05	0.1	20 °C	-10 °C
Sim.23	100	0.05	0.1	30 °C	-10 °C
Sim.24	100	0.05	0.1	40 °C	-10 °C
Sim.25	25	0.2	0.1	30 °C	-5 °C
Sim.26	25	0.2	0.1	40 °C	-5 °C
Sim.27	25	0.2	0.1	50 °C	-5 °C
Sim.28	25	0.2	0.1	60 °C	-5 °C
Sim.29	25	0.2	0.1	30 °C	-10 °C
Sim.30	25	0.2	0.1	40 °C	-10 °C
Sim.31	25	0.2	0.1	50 °C	-10 °C
Sim.32	25	0.2	0.1	60 °C	-10 °C
Sim.33	25	0.2	0.1	70 °C	-10 °C

Farklı gömme derinlikleri ($P_d=0.1$ m, $P_d=0.15$ m, $P_d=0.2$ m ve $P_d=0.25$ m) dikkate alınarak $S_d=0$ 'dan (beton yüzeyi) simülasyon derinliğine kadar dikey olarak sıcaklığın dağılımı Şekil 5a'da verilmiştir.



(a)



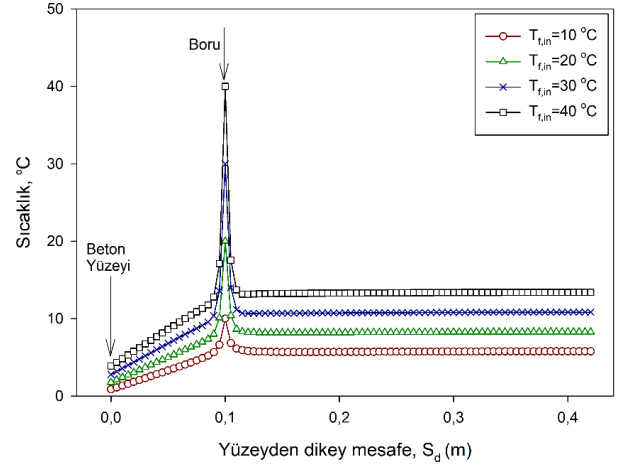
(b)

Şekil 5. Farklı gömme derinliğine göre dikey (a) ve yatay (b) sıcaklık dağılımı

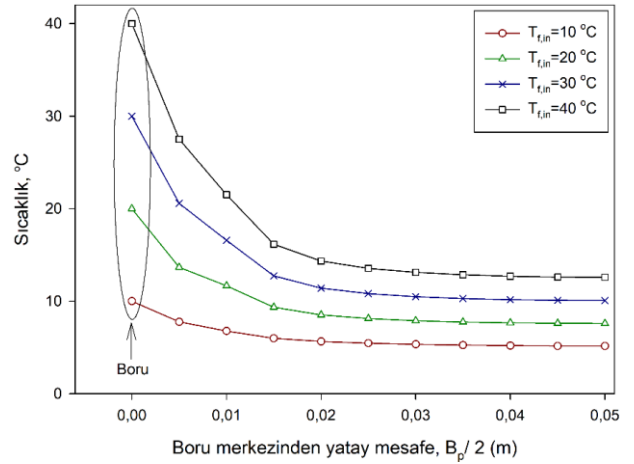
Buzlanma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de başlamakta olup, $P_d=0.2\text{ m}$ 'den daha büyük gömme derinliğinde buzlanma probleminin başlaması gerçekleşmektedir. Gömme derinliğinin yüzeye en yakın olduğu yerde yani $P_d=0.1\text{ m}$ 'de en yüksek sıcaklık elde edilmiştir. PEX borularının yüzeye yakın olması kar veya buz oluşumunun engellenmesinde önemli bir sonuç olduğu söylenebilir. Ek olarak, borunun gömüldüğü derinlikte boru içerisinde $T_{f,in}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de akışkan sağlandığından dolayı tüm gömme derinliklerinde en yüksek sıcaklık o bölgede oluşurken daha derinlere doğru sıcaklık çok değişmemektedir. Şekil 5b'de borunun olduğu yerde $T_{f,in}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de akışkan sağlandığından dolayı sıcaklık en yüksek olurken borudan yatay olarak uzaklaştıkça sıcaklık düşmektedir. Gömme

derinliği arttıkça yüzeye ulaşan ısı transferi azalmakta yani sıcaklık farkı daha az olduğu Şekil 5b'de görülmektedir.

$P_d=0.1\text{ m}$, $B_p=0.1\text{ m}$ ($N=50$) ve $T_{hava}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerleri alınarak, farklı akışkan sıcaklıklarına göre yüzeyden dikey mesafedeki ve boru merkezinden yatay mesafedeki sıcaklık dağılımları Şekil 6'da elde edilmiştir.



(a)

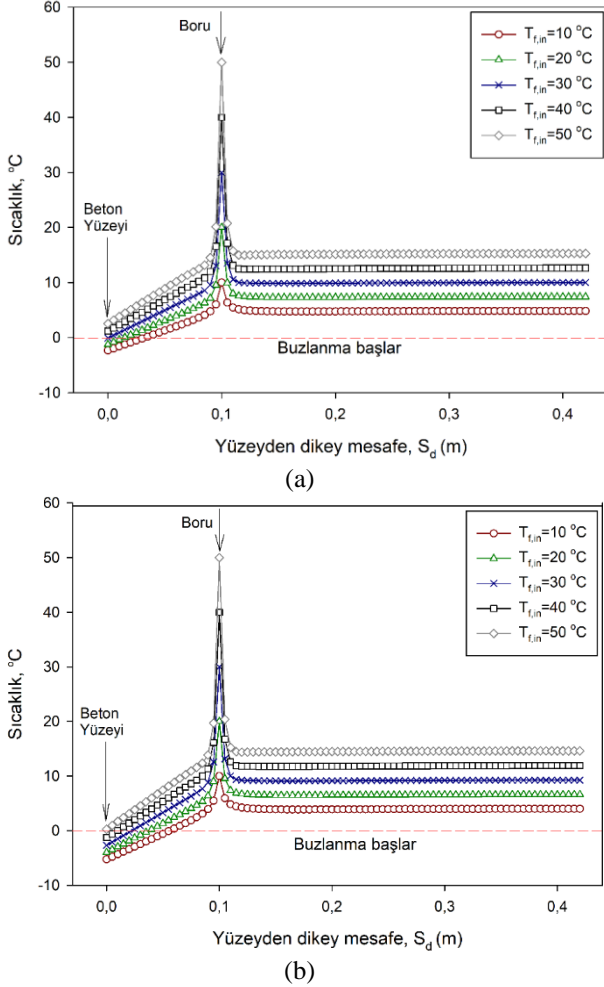


(b)

Şekil 6. Farklı akışkan sıcaklıklarına göre dikey (a) ve yatay (b) sıcaklık dağılımı

4 farklı akışkan sıcaklığı için yapılan analizler göstermiştir ki, yüzeyde en düşük akışkan sıcaklığı için bile herhangi bir kar ve buz oluşumu olmamakta ve akışkan sıcaklığı ne kadar fazla ise beton yüzeyinin sıcaklığı o kadar yüksek olurken kar ve buz oluşma ihtimali ise o kadar düşmektedir (Şekil 6a). Şekil 6b'de borunun olduğu yerde sıcaklık en yüksek olurken borudan yatay olarak uzaklaştıkça sıcaklık düşmektedir. Özetle, bu şartlar altında yani $P_d=0.1\text{ m}$, $B_p=0.1\text{ m}$ ($N=50$) ve $T_{hava}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerlerinde, binanın merkezi ısıtma sisteminden $T_f = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerinde akışkan sağlanması kar ve buz oluşmaması için yeterli olduğu görülmüştür.

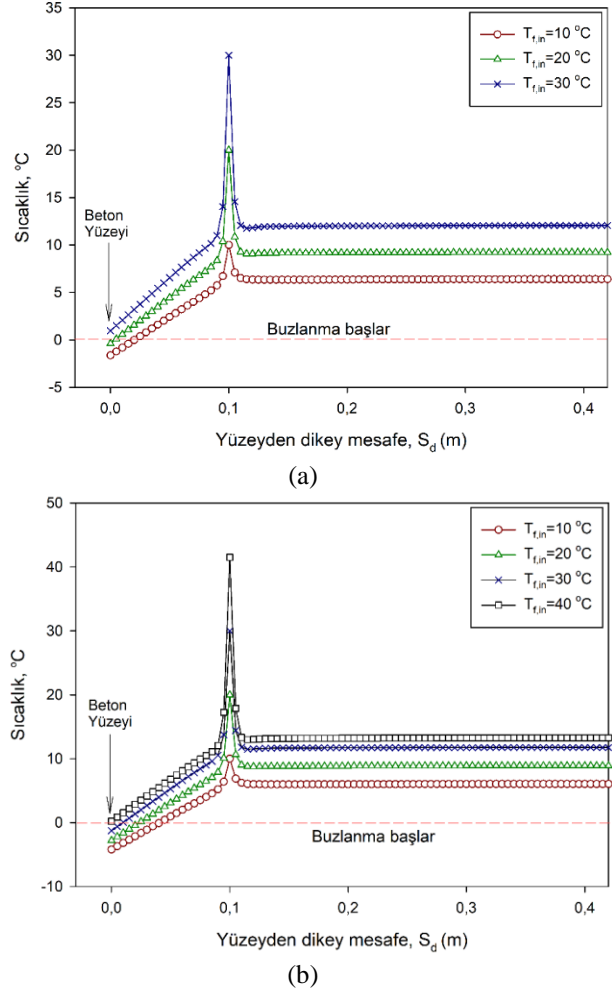
Şekil 7’de, $P_d=0.1$ m, $B_p=0.1$ m ($N=50$) değerlerinde, hava sıcaklığının -5 °C ve -10 °C’ye düştüğünde beton yüzeyinde kar ve buz oluşmaması için ısıtma kaynağından sağlanan farklı akışkan sıcaklıklarına göre yüzeyden dikey mesafedeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Şekil 7a’da, yüzeyde kar ve buz oluşmaması için akışkan sıcaklığının 30 °C’nin üstünde sağlanması gerektiği görülmektedir. Hava sıcaklığı -10 °C olduğunda ise, akışkan sıcaklığının 50 °C’nin altındaki tüm akışkan sıcaklıklarında ($T_{f,in}=10$ °C, $T_{f,in}=20$ °C, $T_{f,in}=30$ °C ve $T_{f,in}=40$ °C) otopark giriş ve çıkış yollarında kar ve buz oluştuğu Şekil 7b’de görülmektedir.



Şekil 7. $B_p=0.1$ m’de, $T_{hava}=-5$ °C (a) ve $T_{hava}=-10$ °C (b) için yüzeyden dikey mesafedeki sıcaklık dağılımı

Şekil 8’de, $P_d=0.1$ m, $B_p=0.05$ m ($N=100$) değerlerinde, hava sıcaklığının -5 °C ve -10 °C’ye düştüğünde beton yüzeyinde kar ve buz oluşmaması için binanın merkezi ısıtma kazanından sağlanan farklı akışkan sıcaklıklarına göre yüzeyden dikey mesafedeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Hava sıcaklığı -5 °C’ye düştüğünde, akışkan sıcaklığının 30 °C’nin

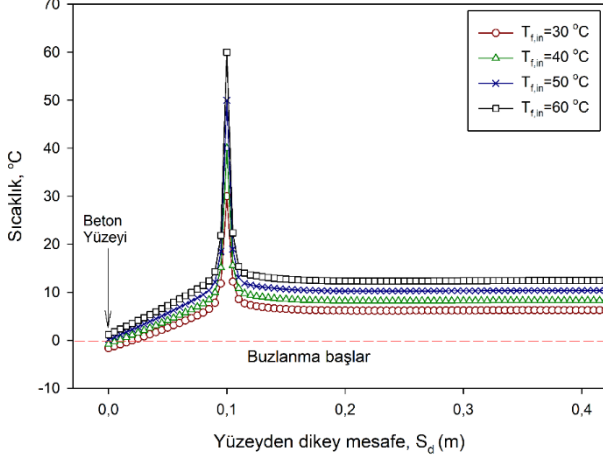
altındaki tüm akışkan sıcaklıklarında ($T_{f,in}=10$ °C ve $T_{f,in}=20$ °C) otopark giriş ve çıkış yollarında kar ve buz oluştuğu Şekil 8a’da görülmektedir.



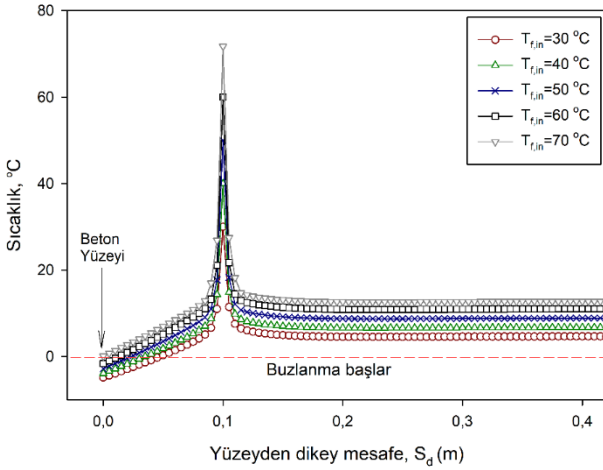
Şekil 8. $B_p=0.05$ m ($N=100$)’de $T_{hava}=-5$ °C (a) ve $T_{hava}=-10$ °C (b) için yüzeyden dikey mesafedeki sıcaklık dağılımı

Şekil 8b’de, beton yüzeyinde kar ve buz oluşmasını engellemek için akışkan sıcaklığının en az 40 °C olması gerektiği elde edilmiştir. 40 °C’nin altındaki akışkan sıcaklıklarında açık bir şekilde kar ve buz oluşumunun gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 7’de borulararası mesafe 0.1 m ya da paralel boru sayısı 50 iken, Şekil 8’de borulararası mesafenin 0.05 m ya da paralel boru sayısının 100 olduğu görülmektedir. Otopark giriş ve çıkış yolunun genişliği sabit ve 5 m olduğundan Şekil 7’ye göre Şekil 8’de daha çok paralel boru olmakta ve bu borular daha sık yerleştirilmiştir. Bu durum yani Şekil 7’ye göre Şekil 8’de, daha fazla PEX boru yerleştirildiğinden dolayı akışkan sıcaklıkları daha düşük olup binanın merkezi ısıtma kazanından daha az ısıtma yükü çekilmektedir. Ancak daha fazla boru yerleştirilmesi ilk yatırım maliyetini artıracığına dikkat edilmelidir.

Şekil 9'da, $P_d=0.1$ m, $B_p=0.2$ m ($N=25$) değerlerinde, hava sıcaklığının -5 °C ve -10 °C'ye düştüğünde beton yüzeyinde kar ve buz oluşmaması için ısıtma kaynağından sağlanan farklı akışkan sıcaklıklarına göre yüzeyden dikey mesafedeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir.



(a)

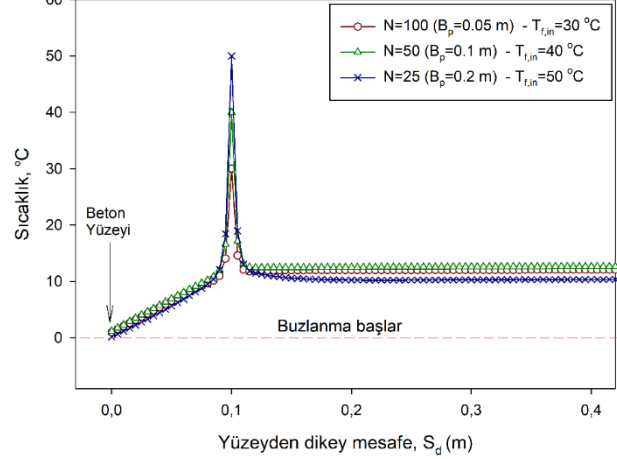


(b)

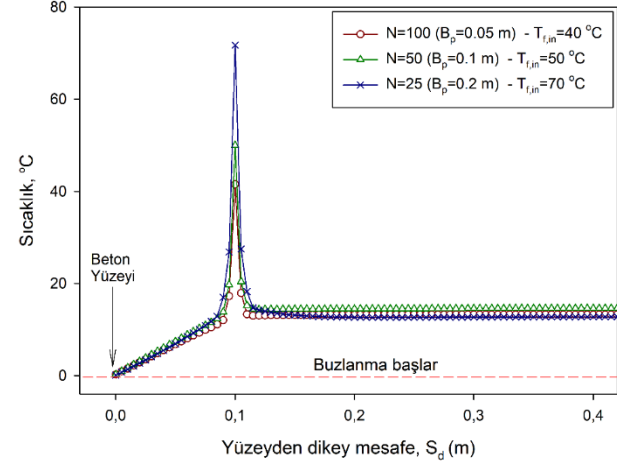
Şekil 9. $B_p=0.2$ m'de $T_{hava}=-5$ °C (a) ve $T_{hava}=-10$ °C (b) için yüzeyden dikey mesafedeki sıcaklık dağılımı

Şekil 9a'da, beton yüzeyinde kar ve buz oluşmaması için akışkan sıcaklığının 50 °C'nin üstünde sağlanması gerektiği görülmektedir. Hava sıcaklığı -10 °C olduğunda ise, akışkan sıcaklığının 70 °C'nin altındaki tüm akışkan sıcaklıklarında ($T_{f.in}=60$ °C, $T_{f.in}=50$ °C, $T_{f.in}=40$ °C ve $T_{f.in}=30$ °C) otopark giriş ve çıkış yollarında kar ve buz oluştuğu Şekil 9b'de görülmektedir. Borulararası mesafenin artması yani paralel boru sayısının azalması beton içerisine yerleştirilen PEX borularının içinde gezen akışkan sıcaklığının kar ve buz oluşmaması için daha yüksek sıcaklıklarda gönderilmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Belirli bir alana daha geniş aralıklarla daha az boru

yerleştirilmesi binanın merkezi sisteminden sağlanan ısıtma yükünü arttırdığı ancak daha az boru yerleştirileceği için ilk yatırım maliyetini de düşüreceği söylenebilir. Isıtma yükü ile maliyet arasında o bölge şartlarına göre optimum tasarımın yapılması oldukça önem kazanmaktadır. Örneğin bazı bölgelerde kış boyunca yoğun kar yağışı bir kere gerçekleşirken bazı bölgelerde bu sayı beş ve üstü gerçekleşmektedir. Bundan dolayı, yapılan tasarım, bölgenin meteorolojik durumları referans alınarak optimum olanı seçilmelidir.



(a)



(b)

Şekil 10. $T_{hava}=-5$ °C (a) ve $T_{hava}=-10$ °C (b) için elde edilen optimizasyon sonuçları

Hava sıcaklığının -5 °C ve -10 °C'ye düştüğünde beton yüzeyinde kar ve buz oluşmaması için paralel boru sayısının ısıtma kaynağından sağlanan farklı akışkan sıcaklıklarına göre yüzeyden dikey mesafedeki sıcaklık dağılımları Şekil 10'da sunulmuştur. Şekil 10a'da, hava sıcaklığının -5 °C olduğu durum için, gerçekleştirilen optimizasyon neticesinde, $N=100$, $N=50$ ve $N=25$ değerlerinde belirlenen akışkan giriş sıcaklıkları sırasıyla 30 °C, 40 °C ve 50 °C'dir. Otopark giriş ve çıkış yollarına yerleştirilen Paralel PEX boru sayısı arttıkça ısıtma

kaynağında gönderilen akışkan sıcaklığı düştüğü elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre, İstanbul'da hava sıcaklığı -5 °C'ye kadar düşmesi durumunda otopark giriş ve çıkış yollarına belirli parametreler de dikkate alınarak yerleştirilmiş paralel boru sayısına göre hangi akışkan sıcaklığı gönderileceği açıkça görülebilir. Benzer şekilde, hava sıcaklığının -10 °C olduğunda, $N=100$, $N=50$ ve $N=25$ değerleri için Şekil 10b'de elde edilen akışkan giriş sıcaklıkları sırasıyla 40 °C, 50 °C ve 70 °C'dir. Paralel boru sayısının azalması yani borulararası mesafenin artması beton içerisine yerleştirilen PEX borularının içinde gezen akışkan sıcaklığının kar ve buz oluşmaması için daha yüksek sıcaklıklarda gönderilmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Belirli bir alana daha geniş aralıklarla daha az boru yerleştirilmesi ısıtma kaynağından sağlanan ısıtma yükünü arttırdığı ancak daha az boru yerleştirileceği için ilk yatırım maliyetini de düşüreceği söylenebilir.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, İstanbul'da zemin altı otopark giriş ve çıkış yollarında oluşacak kar veya buz oluşumunu önlemek için, HHP sisteminin gerçekçi sınır koşulları ve meteorolojik verilerle MATLAB programında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma kapsamında, bir binanın rampalı otopark giriş ve çıkış yollarının altına yerleştirilen PEX boruları sayesinde otopark giriş ve çıkışlarında kar veya buzun oluşmaması noktasında 33 adet simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında, rampalı otopark giriş ve çıkış yollarına yerleştirilen PEX borularına ait gömme derinliği, akışkan giriş sıcaklığı, hava sıcaklığı ve borular arası mesafenin etkileri incelenmiştir. Ek olarak, farklı hava sıcaklıklarına göre PEX borularının yerleşiminin ve akışkan giriş sıcaklığının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- PEX borularının yüzeye yakın yerleştirilmesi yani gömme derinliğinin az olması kar veya buz oluşumunun engellenmesinde önemli bir sonuç olduğu görülmüştür.
- Borulararası mesafe az ya da paralel boru sayısı fazla olduğunda binanın merkezi ısıtma

kazanından daha az ısıtma yükü çekilmektedir. Bununla beraber, daha fazla boru yerleştirilmesi ilk yatırım maliyetini artıracığı da bilinmelidir.

- $P_d=0.1$ m, $B_p=0.1$ m ($N=50$) ve $T_{hava}=0$ °C değerlerinde, binanın merkezi ısıtma sisteminden $T_{f,in}=10$ °C değerinde akışkan sağlanması kar ve buz oluşmaması için yeterli olduğu görülmüştür.
- Hava sıcaklığının -5 °C ve -10 °C olduğunda, yüzeyde kar ve buz oluşmaması için, paralel boru sayılarının $N=100$, $N=50$ ve $N=25$ değerleri için akışkan giriş sıcaklıkları sırasıyla 30 °C, 40 °C, 50 °C ve 40 °C, 50 °C, 70 °C'dir. Paralel boru sayısının artması beton içerisine yerleştirilen PEX borularının içinde gezen akışkan sıcaklığının daha düşük sıcaklıklarda gönderileceği anlaşılmıştır.
- HHP sisteminin tasarımı yapılırken bölgeye ait meteorolojik veriler dikkate alınarak yerleştirilecek paralel boru sayısı yani borular arası mesafe optimize edilmelidir. Bu yerleşim sistemi bir kere yapılacağından dolayı değiştirilmesinin zor olduğu bilinmelidir. Ancak, yerleşim sistemine göre binanın merkezi ısıtma sisteminden çekilen ısı yükü farklı hava sıcaklıklarına göre de kontrol edileceğinden dolayı kar ve buz birikimi engellenmesi noktasında, bu yük kontrolörler yardımıyla arttırılabilir veya azaltılabilir olduğu açıkça ifade edilebilir.
- Bu sistemlerin uygulanma maliyetleri (ilk yatırım+işletme maliyetleri) araçlarda meydana gelebilecek maddi kazaların maliyetleriyle karşılaştırıldığında oldukça yatırım yapılabilir olduğu ifade edilebilir.

Gelecekte bu sistemlerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri ve Türkiye'nin 4 veya 5 farklı iklim bölgesi için uygulanması üzerine çalışmalar yapılacaktır. Diğer yandan, bu sistemlerin araç yollarının yanında yaya yollarında da uygulanması planlanmaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur

Kaynaklar

- [1] J. Norrman, M. Eriksson, and S. Lindqvist, "Relationships between road slipperiness, traffic accident risk and winter road maintenance activity," *Clim. Res.*, vol. 15, pp. 185–193, 2000.
- [2] A. K. Andersson, "Winter road conditions and traffic accidents in Sweden and UK: present and future climate scenarios," Göteborg University, Göteborg, 2010.
- [3] A. D. W. Nuijten, "Runway temperature prediction, a case study for Oslo Airport, Norway," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 125, pp. 72–84, 2016.
- [4] M. A. Equiza *et al.*, "Long-term impact of road salt (NaCl) on soil and urban trees in Edmonton, Canada," *Urban forestry & urban greening*, vol. 21, pp. 16–28, 2017.
- [5] N. Aghazadeh, M. Nojavan, and A. A. Mogaddam, "Effects of road-deicing salt (NaCl) and saline water on water quality in the Urmia area in northwest of Iran," *Arabian journal of geosciences*, vol. 5, pp. 565–570, 2012.
- [6] F. Li, Y. Zhang, Z. Fan, and K. Oh, "Accumulation of de-icing salts and its short-term effect on metal mobility in urban roadside soils," *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 94, no. 4, pp. 525–531, 2015.
- [7] M. Gholikhani, H. Roshani, S. Dessouky, and A. T. Papagiannakis, "A critical review of roadway energy harvesting technologies," *Appl. Energy*, vol. 261, no. 114388, p. 114388, 2020.
- [8] T. Ghalandari, N. Hasheminejad, W. Van den bergh, and C. Vuye, "A critical review on large-scale research prototypes and actual projects of hydronic asphalt pavement systems," *Renew. Energy*, vol. 177, pp. 1421–1437, 2021.
- [9] H. Wang, J. Zhao, and Z. Chen, "Experimental investigation of ice and snow melting process on pavement utilizing geothermal tail water," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 6, pp. 1538–1546, 2008.
- [10] C. Han and X. (bill) Yu, "Feasibility of geothermal heat exchanger pile-based bridge deck snow melting system: A simulation based analysis," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 214–224, 2017.
- [11] A. Balbay and M. Esen, "Temperature distributions in pavement and bridge slabs heated by using vertical ground-source heat pump systems," *Acta scientiarum technology*, vol. 35, pp. 677–685, 2013.
- [12] W. Zhao, Y. Zhang, L. Li, W. Su, B. Li, and Z. Fu, "Snow melting on the road surface driven by a geothermal system in the severely cold region of China," *Sustainable energy technologies and assessments*, vol. 40, 2020.
- [13] R. Mirzanamadi, C.-E. Hagentoft, and P. Johansson, "Coupling a Hydronic Heating Pavement to a Horizontal Ground Heat Exchanger for harvesting solar energy and heating road surfaces," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 447–463, 2020.
- [14] P. Pascual-Muñoz, D. Castro-Fresno, P. Serrano-Bravo, and A. Alonso-Estébanez, "Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors," *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 324–332, 2013.
- [15] P. Pan, S. Wu, Y. Xiao, and G. Liu, "A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 624–634, 2015.
- [16] W. J. Eugster, "Road and bridge heating using geothermal energy. Overview and examples," in *European geothermal congress*, 2007.
- [17] D. S. N. M. Nasir, B. R. Hughes, and J. K. Calautit, "A study of the impact of building geometry on the thermal performance of road pavement solar collectors," *Energy (Oxf.)*, vol. 93, pp. 2614–2630, 2015.
- [18] F. Ling and T. Zhang, "A numerical model for surface energy balance and thermal regime of the active layer and permafrost containing unfrozen water," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 1–15, 2004.
- [19] G. Mihalakakou, "On estimating soil surface temperature profiles," *Energy Build.*, vol. 34, no. 3, pp. 251–259, 2002.
- [20] D. J. Duffy, *Finite difference methods in financial engineering: A partial differential equation approach*, 1st ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2013.
- [21] T. J. Chung, *Computational Fluid Dynamics*, 2nd ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2014.