

Performance Analysis of a Hydronic Heating System for Frost Mitigation as a Sustainable Solution for Urban Infrastructure in Cold-Climate Regions: A Case Study of Tehran's B9 Bridge

Sina Motahari¹ , Ali Alavi Naeini^{2✉} 

1. Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: sinamotahari@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: ali.alavinaeini@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 10 August 2025
Received in revised form: 7 January 2026
Accepted: 12 January 2026
Available online: 17 September 2026

Keywords:
anti-icing pavement, hydronic heating system, natural hazards, solar energy, sustainable development

ABSTRACT

Objective: In cold regions, freezing conditions and snowfall are among the most significant factors disrupting the operation of urban infrastructure and transportation systems, and they can seriously affect traffic safety and the sustainable operation of road networks. In Iran, countermeasures against these phenomena are mainly based on conventional methods such as sand spreading and chemical de-icing, which, in addition to high operational and maintenance costs, have adverse environmental impacts. Accordingly, the present study was conducted to numerically analyze the thermal performance of a hydronic heating system for snow melting on the B9 Bridge, located on Artesh Expressway in Tehran. The bridge is currently equipped with a chemical de-icing spray system, and the primary objective of this study is to investigate the feasibility of replacing the existing system with hydronic surface heating technology, with an emphasis on improving energy efficiency, enhancing infrastructure sustainability, and reducing environmental impacts under cold climatic conditions.

Method: In this study, transient thermal simulation was performed using COMSOL Multiphysics to model the heat transfer process in a hypothetical hydronic heating system. The system consists of pipes embedded beneath the bridge pavement surface, through which water flows with an inlet-to-outlet temperature range of 43 to 40 °C. The numerical model considers heat transfer through the different pavement layers, including asphalt and insulating layers, along with the dynamic behavior of fluid flow within the pipes. Simulations were conducted for two weather scenarios with ambient temperatures of -5 and -10 °C. In the second scenario, snowfall with an intensity of 30 mm/h was also incorporated to evaluate the system's performance under critical conditions.

Results: The simulation results indicated that the hydronic heating system is capable of raising the asphalt surface temperature above the freezing point in less than 20 minutes at an ambient temperature of -10 °C. This capability enables effective melting of snowfall at an intensity of 30 mm/h and prevents freezing of the bridge surface. The energy required for one hour of full-system operation was estimated at approximately 851 kWh. Furthermore, the analysis showed that the installation of 200 fixed solar panels, each with a capacity of 700 W, could provide approximately 340 hours of annual system operation, demonstrating the high potential of using solar energy as a sustainable source to support this technology.

Conclusions: Based on the findings of this study, the implementation of hydronic heating systems on bridges and urban infrastructure in cold regions can provide an effective and sustainable solution for preventing surface freezing. Compared with conventional de-icing methods, this system offers greater operational stability, reduced dependence on chemical agents, and enhanced public safety. In addition, its potential integration with renewable energy sources can play an important role in reducing environmental impacts and contributing to the sustainable development of urban infrastructure.

Cite this article: Motahari, S., & Alavi Naeini, A. (2026). Performance Analysis of a Hydronic Heating System for Frost Mitigation as a Sustainable Solution for Urban Infrastructure in Cold-Climate Regions: A Case Study of Tehran's B9 Bridge. *Journal of Environmental Studies*, 52 (2), 171-194. <https://doi.org/10.22059/jes.2026.396846.1008614>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



<https://doi.org/10.22059/jes.2026.396846.1008614>

Introduction

Ice formation on bridges and road surfaces poses significant challenges in cold-climate urban areas, affecting transportation safety, infrastructure durability, and traffic continuity. Conventional anti-icing methods, such as salt and chloride-based chemicals, are widely used but have well-documented environmental and structural drawbacks, including corrosion of reinforced concrete, soil and water contamination, and increased maintenance costs (Fay & Shi, 2012; Szklarek et al., 2021). Hydronic surface heating systems have emerged as a sustainable alternative, transferring thermal energy directly to the pavement to prevent snow accumulation and ice formation. These systems offer high operational efficiency, reduced chemical usage, and potential integration with renewable energy sources (Zhao et al., 2020; Helsingin Energia, 2013).

Although hydronic heating systems have been successfully implemented in Europe, North America, and Japan, their application in Iran is limited. The present study investigates the thermal performance and feasibility of a subsurface hydronic heating system installed on the B9 Bridge along Tehran's Artesh Expressway. The objective is to assess whether this technology can replace conventional chemical-based anti-icing systems, improving energy efficiency, sustainability, and public safety.

Method

A numerical model was developed using COMSOL Multiphysics to simulate a hypothetical subsurface hydronic heating system embedded beneath the B9 Bridge pavement. The pavement structure included 5 cm of concrete and 3 cm of asphalt, with PEX-AL-PEX pipes placed at 10–15 cm spacing and 3 cm diameter. Two winter scenarios were analyzed: (1) ambient temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ without snowfall and (2) $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ with 30 mm/h snowfall. Boundary conditions incorporated inlet and outlet water temperatures of $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, wind speed of 2.5 m/s, and convective heat transfer at the pavement surface (Robin boundary condition). The initial pavement surface temperature was assumed to be $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Material properties were taken from standard references (Incropera & DeWitt, 2006; IES Ltd., 2021).

Heat transfer was modeled using Fourier's transient conduction equation with convective boundary conditions, and a two-dimensional finite element mesh ensured solution accuracy. Two hydraulic layouts were compared: a series configuration with high head loss and a parallel layout with multiple short loops. The parallel configuration was selected due to better thermal performance and lower pressure drop. The model also accounted for energy consumption and potential solar photovoltaic integration to support renewable operation.

Results

- Thermal performance:

For 10 cm pipe spacing, the surface temperature rose above $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ within approximately 15 minutes at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, demonstrating effective snow melting and ice prevention. Under $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ with 30 mm/h snowfall, surface temperature reached $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ within 1 hour, confirming adequate operational performance during moderate winter conditions. Wider pipe spacing (15 cm) delayed surface warming, indicating that early system activation and optimal spacing are crucial for effectiveness.

- Energy demand:

Average heat flux was $\sim 451\text{ W/m}^2$, and energy consumption for 1 hour of operation over the 1503 m^2 bridge surface was $\sim 851\text{ kWh}$. Integration of 200 fixed photovoltaic panels (700 W each) could provide

approximately 340 hours of system operation annually, highlighting the feasibility of combining hydronic heating with renewable energy.

- Hydraulic analysis:

The series pipe configuration was impractical due to excessive head loss (~166 m), while the parallel layout reduced head loss and improved operational stability. Calculations of volumetric flow rate, Reynolds number, and pressure drop confirmed turbulent but controllable flow in the parallel system, suitable for bridge-scale deployment.

Conclusions

The study demonstrates that hydronic surface heating is a technically and thermally feasible solution for frost mitigation in Tehran's cold-climate conditions. Compared to European applications, Tehran's relatively milder winter climate reduces energy demand, improving economic feasibility. Key design factors include pipe spacing and hydraulic layout, with closer spacing (10 cm) and parallel loop design enhancing thermal uniformity and reducing operational strain. Environmentally, the system offers substantial advantages over chemical de-icing methods. It avoids chloride-induced corrosion, soil contamination, and negative impacts on vegetation. When combined with renewable energy sources such as solar PV, it can further reduce carbon emissions and support low-carbon urban infrastructure goals.

Operationally, pre-heating prior to snowfall significantly lowers energy consumption, and system responsiveness ensures rapid pavement warming, critical for traffic safety. Despite higher initial investment compared to traditional methods, long-term savings in maintenance costs, reduction in chemical usage, and environmental benefits justify its adoption.

The study also highlights the practical challenges of system installation. The parallel configuration mitigates excessive head loss and simplifies maintenance, while optimal spacing ensures effective snow melting without unnecessary energy expenditure. Sensitivity analysis indicates that late activation or wider pipe spacing may reduce efficiency but does not entirely compromise system functionality.

Hydronic surface heating systems can reliably prevent ice formation on bridge decks in Tehran, ensuring safety and reducing reliance on chemical de-icers. Optimal pipe spacing of 10 cm and parallel loop configuration provide the best thermal performance and hydraulic stability. Pre-heating before snowfall is recommended to minimize energy consumption and maximize system responsiveness. Integration with renewable energy, particularly solar PV, enhances sustainability and reduces carbon footprint.

Additionally, the use of this system significantly reduces the environmental impacts compared to conventional salt-based methods, including protection of concrete structures, soil, and water resources.

The study provides a scalable roadmap for implementing sustainable bridge de-icing technology in cold-climate urban infrastructure, balancing energy efficiency, environmental responsibility, and operational feasibility.

Overall, the results confirm that hydronic heating represents a proactive, reliable, and environmentally responsible alternative to conventional anti-icing approaches, suitable for cold-climate regions in Iran and similar urban contexts worldwide.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author, upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

The authors hereby declare that they have used ChatGPT (GPT-5, OpenAI) for translation of this manuscript. All AI-generated or AI-edited content has been reviewed, verified, and approved by the author(s), and they take full responsibility for the final content of the manuscript.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



تحلیل عملکرد سیستم گرمایش هیدرونیک در مقابله با یخبندان به عنوان راهکاری پایدار برای زیرساخت‌های شهری در اقلیم سرد: مطالعه موردی پل B9 تهران

سینا مطهری^۱، علی علوی نائینی^{۲*}

۱. گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sinamotahari@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ali.alavinaeini@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: در مناطق سردسیر، یخبندان و بارش برف از مهمترین عوامل اختلال در عملکرد زیرساخت‌های شهری و سامانه‌های حمل‌ونقل به شمار می‌آیند و می‌توانند ایمنی ترافیکی و بهره‌برداری پایدار از شبکه معابر را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهند. در ایران، مقابله با این پدیده‌ها عمدتاً بر روش‌های سنتی نظیر شن‌پاشی و محلول‌پاشی شیمیایی استوار است که علاوه بر هزینه‌های اجرایی و نگهداری بالا، پیامدهای محیط‌زیستی نامطلوبی نیز به همراه دارند. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف تحلیل عددی عملکرد حرارتی یک سامانه گرمایش هیدرونیک برای ذوب برف در پل B9 واقع در بزرگراه ارتش تهران انجام شده است. این پل در وضعیت فعلی به سامانه پاشش شیمیایی ضدیخ مجهز است و هدف اصلی مطالعه، بررسی امکان‌سنجی جایگزینی سیستم موجود با فناوری گرمایش سطحی هیدرونیک، با تمرکز بر افزایش بهره‌وری انرژی، ارتقای پایداری زیرساخت‌ها و کاهش اثرات محیط‌زیستی در شرایط اقلیمی سرد می‌باشد.

روش پژوهش: در این تحقیق، شبیه‌سازی حرارتی گدرا با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics برای مدل‌سازی فرایند انتقال حرارت در یک سامانه فرضی گرمایش هیدرونیک انجام شده است. این سامانه شامل لوله‌هایی است که در زیر سطح روسازی پل تعبیه شده‌اند و آب با بازیه دمای ۴۰ الی ۴۳ درجه سانتی‌گراد در آنها جریان دارد. مدل عددی، انتقال حرارت در لایه‌های مختلف روسازی از جمله آسفالت و لایه‌های عایق را به‌همراه رفتار دینامیکی جریان سیال در لوله‌ها در نظر می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها برای دو سناریوی آب‌وهوایی با دماهای محیطی ۵- و ۱۰- درجه سانتی‌گراد انجام شده و در سناریوی دوم، بارش برف با شدت ۳۰ میلی‌متر در ساعت نیز لحاظ شده است تا عملکرد سیستم در شرایط بحرانی ارزیابی شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۶

کلیدواژه‌ها:

انرژی خورشیدی،

توسعه پایدار،

سوانح طبیعی،

سیستم گرمایش هیدرونیک،

مسیر ضدیخبندان.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سامانه گرمایش هیدرونیک قادر است در دمای محیطی ۱۰- درجه سانتی‌گراد، دمای سطح آسفالت را در کمتر از ۲۰ دقیقه به بالاتر از نقطه انجماد برساند. این ویژگی امکان ذوب مؤثر برف با شدت ۳۰ میلی‌متر در ساعت و جلوگیری از یخ‌زدگی سطح پل را فراهم می‌کند. میزان انرژی مورد نیاز برای یک ساعت عملکرد کامل سیستم حدود ۸۵۱ کیلووات‌ساعت برآورد شد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که با نصب ۲۰۰ پنل خورشیدی ثابت با ظرفیت ۷۰۰ وات، امکان تأمین حدود ۳۴۰ ساعت عملکرد سالانه سیستم وجود دارد که بیانگر پتانسیل بالای استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبعی پایدار برای پشتیبانی از این فناوری است.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج این پژوهش، اجرای سامانه‌های گرمایش هیدرونیک در پل‌ها و زیرساخت‌های شهری مناطق سردسیر می‌تواند راهکاری مؤثر و پایدار برای جلوگیری از یخ‌زدگی سطحی باشد. این سیستم در مقایسه با روش‌های سنتی ضدیخ، پایداری عملیاتی بالاتر، وابستگی کمتر به مواد شیمیایی و ایمنی عمومی بیشتری فراهم می‌کند. علاوه بر این، امکان تلفیق آن با منابع انرژی تجدیدپذیر، نقش مهمی در کاهش اثرات محیط‌زیستی و تحقق اهداف توسعه پایدار زیرساخت‌های شهری ایفا می‌نماید.

استناد: مطهری، سینا و علوی نائینی، علی (۱۴۰۵). تحلیل عملکرد سیستم گرمایش هیدرونیک در مقابله با یخبندان به عنوان راهکاری پایدار برای زیرساخت‌های شهری در اقلیم سرد: مطالعه موردی پل B9 تهران. *نشریه محیط‌شناسی*، ۵۲ (۲)، ۱۷۱-۱۹۴. <https://doi.org/10.22059/jes.2026.396846.1008614>



© نویسندگان

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

در مناطق سردسیر، یخبندان و بارش برف از عوامل اصلی کاهش ایمنی و کارایی زیرساخت‌های حمل‌ونقل به‌شمار می‌روند. انباشت یخ و برف بر سطح معابر، به‌ویژه در پل‌ها که از جریان هوا در زیر و بالا تأثیر می‌پذیرند، می‌تواند منجر به تصادفات، افزایش هزینه‌های نگهداری و اختلال در عبور و مرور گردد (Jin & McBroom, 2024).

روش‌های رایج مانند پاشش نمک^۱ و محلول‌های یخ‌زدا^۲، اگرچه در کوتاه‌مدت اثربخش هستند، اما در بلندمدت موجب آسیب‌های محیط‌زیستی و سازه‌ای قابل‌توجه می‌شوند. از جمله می‌توان به خوردگی اجزای فلزی، کاهش کیفیت خاک و پوشش گیاهی و آلودگی منابع آب زیرزمینی اشاره کرد (Fay & Shi, 2012). مطالعاتی همچون Szklarek و همکاران نشان داده‌اند که تأثیر محیط‌زیستی استفاده از مواد یخ‌زدا در راه‌های شهری می‌تواند ماندگار و پرهزینه باشد (Szklarek et al., 2021).

در واکنش به این چالش‌ها، سامانه‌های گرمایش سطحی^۳ به‌عنوان روشی فعال برای جلوگیری از تشکیل یخ توسعه یافته‌اند. این سامانه‌ها در دو دسته اصلی گرمایش الکتریکی و گرمایش هیدرونیکی قرار می‌گیرند. سیستم‌های هیدرونیکی، به‌ویژه در پروژه‌های وسیع مانند پل‌ها، به دلیل بازده انرژی بالا و امکان بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی یا زمین‌گرمایی، گزینه‌ای پایدار و مقرون‌به‌صرفه شناخته شده‌اند (Loubani, 2025).

تجارب موفق جهانی در این زمینه شامل پروژه هیرو^۴ در سوئد با استفاده از ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در خاک (Nordell, 2005)، استفاده از گرمای زائد نیروگاه‌ها در میشیگان آمریکا (Graves & Reavis, 2015)، و اجرای سامانه‌های لوله‌کشی حرارتی در خیابان‌های هلسینکی است (Helsingin Energia, 2013). مطالعات عددی مانند پژوهش ژائو و همکاران نیز نشان داده‌اند که سیستم‌های هیدرونیکی می‌توانند به‌طور مؤثر، دمای سطح روسازی را در محدوده ایمن نگه‌دارند و مصرف انرژی را کاهش دهند (Zhao et al., 2020).

با این حال، در ایران تاکنون هیچ سامانه گرمایش سطحی فعال در پل‌ها پیاده‌سازی نشده و مطالعات عددی در این زمینه نیز بسیار محدود است. اکثر روش‌های مورد استفاده همچنان مبتنی بر پاشش نمک یا سیستم‌های مکانیکی واکنشی هستند. از این‌رو، تحلیل فنی و محیط‌زیستی امکان پیاده‌سازی سیستم هیدرونیکی در شرایط اقلیمی خاص کشور، ضرورتی روزافزون دارد.

در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد حرارتی و انرژی یک سیستم هیدرونیکی فرضی در پل بتنی پیش‌ساخته B9 تهران انجام شده است. تحلیل عددی در بستر نرم‌افزار کامسول^۵ و به‌صورت گذرا، با لحاظ ویژگی‌های لایه‌های روسازی، شرایط محیطی واقعی و داده‌های هواشناسی انجام شده است.

اگرچه مطالعات متعددی در حوزه سامانه‌های گرمایش سطحی انجام شده‌اند، اما اغلب این پژوهش‌ها در اقلیم‌های سرد کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی بوده‌اند و به شرایط اقلیمی، فنی و اقتصادی ایران کمتر توجه شده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر اقلیم شهر تهران، عملکرد یک سامانه گرمایش هیدرونیکی را به‌صورت عددی مدل‌سازی کرده و امکان استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین توان سامانه را نیز بررسی می‌نماید. این نوآوری می‌تواند به بومی‌سازی راهکارهای پایدار در زیرساخت‌های شهری کشور کمک کند.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

طی دهه‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه بهره‌گیری از سیستم‌های گرمایش زیر سطحی برای مقابله با مشکلات ناشی از یخبندان و بارش برف در زیرساخت‌های حمل‌ونقل انجام شده است (Szklarek et al., 2021; Zhao et al., 2020). در این راستا، دو رویکرد اصلی شامل استفاده از سیستم‌های الکتریکی و سیستم‌های هیدرونیکی مورد توجه محققان قرار گرفته است. سیستم‌های الکتریکی عمدتاً در مقیاس‌های کوچک مانند رمپ‌ها و پارکینگ‌ها استفاده شده‌اند، در حالی که سیستم‌های هیدرونیکی برای معابر

1. NaCl
2. CaCl₂
3. Surface Heating Systems
4. HERO
5. COMSOL

وسیع تر و پل های بین شهری مناسب هستند. با توجه به افزایش نیاز به راهکارهای پایدار در مدیریت برف و یخ زدگی، پژوهشگران مختلف روش های متنوعی را بررسی کرده اند. مطالعاتی مانند Zhao et al. (2020) نشان داده اند که سیستم های گرمایش هیدرونیك در مناطق سرد اروپا، مصرف نمك و اثرات محیط زیستی مخرب را به طور قابل توجهی کاهش داده اند. (Adl-Zarrabi et al. (2023 نیز با مدل سازی دوبعدی، عملکرد حرارتی این سامانه ها و اثرات مثبت آنها بر ایمنی ترافیک را بررسی کرده اند. با این حال، تحقیقات کمی به شرایط اقلیمی ایران و محدودیت منابع انرژی تجدیدپذیر پرداخته اند؛ این خلأ علمی زمینه ساز پژوهش حاضر شده است.

مطالعات قبلی نشان داده اند که سامانه های هیدرونیك در حفظ دمای سطح ایمن مؤثرند. به عنوان مثال، Mirzanamadi et al. (2020) در شمال اروپا، نقش مصالح و کنترل دمای سیال را در عملکرد سیستم بررسی کرده اند. در ایران، روش های رایج مقابله با یخ زدگی معابر همچنان بر پاشش نمك، شن و محلول های ضد یخ مبتنی اند که هر چند ساده و کوتاه مدت مؤثر هستند، اما پیامدهای محیط زیستی و فنی قابل توجهی دارند. مطالعات متعددی نشان داده اند که این روش ها موجب کاهش دوام روسازی، آسیب به پوشش گیاهی و آلودگی منابع آب زیرزمینی می شوند. نعمت نوروزی و همکاران (۱۴۰۳) تأکید کرده اند که وجود نمك فرایند خرابی آسفالت را تسریع می کند و (آزادی سمرغاه و همکاران (۱۴۰۳) اثرات مخرب آن بر گیاهان، کیفیت خاک و منابع آبی را مستند کرده اند.

با وجود این چالش ها، یکی از اقدامات نوآورانه داخلی، سامانه ضد یخ زدایی پل B9 در اتوبان ارتش تهران است. این پروژه رویکرد پیشگیرانه ای اتخاذ کرده و به جای مقابله با یخبندان پس از وقوع، از تشکیل آن جلوگیری می کند. در این پل، لوله کشی هایی در حاشیه روسازی تعبیه شده اند که در زمان بارش برف، محلولی خاص را به صورت خودکار روی سطح پاشش می کنند. هرچند این سامانه بر اساس پاشش عمل می کند، اما از نظر طراحی و منطق عملکرد، نزدیک به سیستم های فعال مدیریت یخ زدگی است. ویژگی هایی مانند کنترل خودکار، بهره گیری از شرایط اقلیمی واقعی و نصب زیرسطحی، آن را به نمونه ای مناسب برای توسعه و شبیه سازی عددی عملکرد سیستم های گرمایش هیدرونیك در اقلیم تهران تبدیل کرده است.



شکل ۱. مسیر لوله کشی و نازل محلول ضد یخ پل B9 (مأخذ: فرج وند (۱۴۰۲))

در سیستم های گرمایش زیرسطحی، برخلاف روش های شیمیایی، تنها تبادل حرارت با سطح روسازی انجام می شود، بدون آن که مواد شیمیایی وارد محیط شوند. به همین دلیل، این روش نه تنها زیست سازگارتر است، بلکه از شوک حرارتی و آسیب ناگهانی به آسفالت نیز جلوگیری می کند.

با وجود پیشرفت های گسترده در طراحی و اجرای سیستم های گرمایش سطحی در کشورهای سردسیر، هنوز در ایران مطالعات میدانی یا عددی کافی در این حوزه، به ویژه در سازه هایی مانند پل ها، انجام نشده است. اقدامات انجام شده در کشور عمدتاً محدود به روش های سنتی بوده که اگرچه در کوتاه مدت مؤثرند، اما در بلندمدت منجر به آسیب به زیرساخت ها، فضای سبز و منابع آبی می شوند. با توجه به این مسائل، بررسی سیستم های جایگزین مانند گرمایش هیدرونیك که از انرژی های تجدیدپذیر بهره می گیرند، از منظر پایداری شهری حائز اهمیت است. مطالعات Zhao et al. (2020) نیز با مدل سازی انرژی و تحلیل محیط زیستی سیستم های گرمایش جاده ای، بر لزوم گذار به این فناوری ها به ویژه در اقلیم های سرد تأکید دارند.

جدول ۱. نمونه‌هایی از کاربرد سیستم‌های گرمایش هیدرونیك در جهان

نام جاده/منطقه	کشور	نوع سیستم هیدرونیك و توضیحات
مسیرهای شیب‌دار در اینگولشتات	آلمان	سیستم هیدرونیك با لوله‌های حاوی مخلوط آب و اتانول برای جلوگیری از یخ‌زدگی. (Ahmed et al., 2023)
پروژه HERO در اوسترشوند	سوئد	سیستم هیدرونیك با ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی برای ذوب برف در زمستان (Nordell & Sköldbberg, 2005)
جاده Route ۲۳۰ در هوکایدو	ژاپن	استفاده از پنل‌های گرمایشی با انرژی خورشیدی و پمپ‌های حرارتی ژئوترمال. (Islam et al., 2006)
پروژه Power Road در فرانسه	فرانسه	سیستم تبادل حرارتی در جاده برای ذخیره و استفاده از انرژی خورشیدی (Biondi et al., 2026)
پروژه Thermo Road در هورسنز	دانمارک	ترکیب مدیریت آب باران با گرمایش و سرمایه‌گذاری منطقه‌ای از طریق انرژی ژئوترمال (Poulsen et al., 2024)
پل‌های W۳۵ در مینه‌سوتا	ایالات متحده	سیستم‌های ضد یخ‌زدگی با استفاده از اسپری‌های ضد یخ برای جلوگیری از تشکیل یخ. (Johnson, 2001)

– اثرات محیط‌زیستی استفاده از نمک و مواد شیمیایی ضد یخ

استفاده از نمک و محلول‌های یخ‌زدا مانند کلرید کلسیم^۱ یا کلرید منیزیم^۲ برای یخ‌زدایی معابر، اگرچه رایج و ارزان است، اما اثرات محیط‌زیستی قابل توجهی دارد (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۳؛ Szklarek et al., 2021):

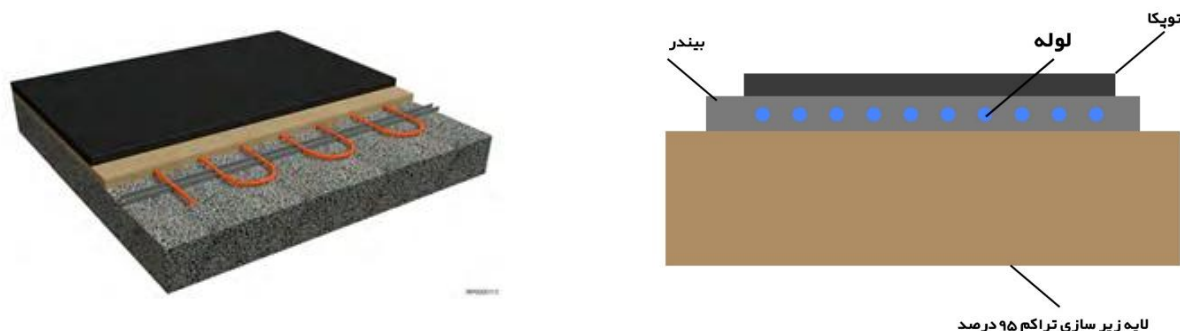
- تسریع خوردگی زیرساخت‌ها: این مواد سبب زنگ‌زدگی در سطوح فلزی پل‌ها، گاردریل‌ها و تجهیزات ترافیکی می‌شوند.
 - آسیب به پوشش گیاهی و خاک: نفوذ یون‌های کلرید باعث کاهش کیفیت خاک و آسیب به ریشه گیاهان حاشیه معابر می‌شود.
 - آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی: با شسته شدن نمک‌ها به رودخانه‌ها یا سفره‌های آب زیرزمینی، کیفیت آب کاهش می‌یابد.
 - افزایش انتشار کربن دی‌اکسید^۳ غیرمستقیم: به دلیل حمل و نقل مکرر، نگهداری، و استفاده از ماشین‌آلات سنگین.
- در مقابل، سیستم‌های گرمایش هیدرونیك، به‌ویژه در صورت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند خورشیدی یا زمین گرمایی)، می‌تواند اثرات محیط‌زیستی منفی را به حداقل برساند (Zhao et al., 2020; Adl-Zarrabi et al., 2023):
- حذف نیاز به نمک و مواد شیمیایی: در نتیجه کاهش خوردگی، آلودگی و فرسایش محیط‌زیستی.
 - کاهش مصرف سوخت فسیلی: در صورت استفاده از منابع پاک، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به شدت کاهش می‌یابد.
 - افزایش طول عمر روسازی و تجهیزات: عدم استفاده از عوامل خوردنده، به دوام مصالح کمک می‌کند.
- از سوی دیگر، در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، پژوهش‌های متعددی بر روی سیستم‌های هیدرونیك انجام شده است؛ مانند استفاده از انرژی زائد نیروگاه‌ها، انرژی خورشیدی، یا ژئوترمال در گرمایش زیرسطحی خیابان‌ها و پل‌ها (Nakamura et al., 2018). اما اغلب این مطالعات در زمینه‌های اقلیمی، مصالح، و زیرساخت‌های متفاوت با شرایط ایران انجام شده‌اند. به‌ویژه، هیچ مطالعه‌ای به‌صورت عددی و اختصاصی به تحلیل عملکرد سیستم گرمایش هیدرونیك در پل‌های بتنی شهری در اقلیم خاص تهران (با دمای حدی پایین و بارش برف متوسط) نپرداخته است. افزون بر این، در زمینه تطبیق سیستم‌های گرمایش هیدرونیك با سیستم‌های انرژی پاک و تجدیدپذیر، مانند پنل‌های خورشیدی، کمبود شدید داده و تحلیل وجود دارد. در شرایطی که ضرورت استفاده از منابع پایدار انرژی در کشور افزایش یافته، بررسی امکان تأمین انرژی این سیستم‌ها از طریق خورشید یا دیگر منابع داخلی، حلقه مفقوده پژوهش‌های قبلی محسوب می‌شود. بنابراین، با در نظر گرفتن موقعیت اقلیمی تهران، که با دمای زیر صفر در زمستان و بارش‌های برف محدود ولی خطرناک همراه است، استفاده از سامانه‌های هیدرونیك می‌تواند راهکاری مناسب برای افزایش ایمنی پل‌های شهری باشد. به‌ویژه در زیرساخت‌هایی مانند پل B9 که اجرای فناوری‌های نو امکان‌پذیر بوده، تحلیل دقیق عملکرد حرارتی این سامانه‌ها می‌تواند به تدوین دستورالعمل‌های طراحی بومی کمک کند. پژوهش حاضر با هدف پرکردن این خلأ، به تحلیل عددی و انرژی‌محور یک سیستم هیدرونیك فرضی در یک پل بتنی پیش‌ساخته (پل B9 تهران) می‌پردازد. این تحلیل نه تنها رفتار حرارتی لایه‌های روسازی را در شرایط واقعی اقلیمی شبیه‌سازی می‌کند، بلکه سناریوهای تأمین انرژی سیستم از منابع پایدار را نیز مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

1. CaCl₂
2. MgCl₂
3. CO₂

– بررسی سیستم‌های گرمایش زیرین

سیستم هیدرونیک

در این سیستم لوله‌های مقاوم در برابر فشار در زیر مسیر نصب و سیال در آن با استفاده از پمپ جریان پیدا می‌کند. این سیال در سیستم حرارتی تعبیه شده، گرم می‌شود و در مسیر جریان پیدا می‌کند. این سیال در انتهای مسیر خود مجدداً وارد سیستم حرارتی می‌گردد تا به دمای خود باز گردد (Liu et al., 2025).



شکل ۳. مقطع عرضی از نحوه لوله‌گذاری سیستم هیدرونیک در محیط پارکینگ و... (ترسیم نگارنده بر اساس مطالعات پژوهشی)

شکل ۲. طرح شماتیک سیستم گرمایشی هیدرونیک در روسازی آسفالتی (ترسیم نگارنده بر اساس مطالعات پژوهشی)

سیستم گرمایش الکتریکی

در این سیستم در طول مسیر کابل‌های حرارتی یا همان المنت‌های حرارتی در زیر لایه روسازی نصب می‌شود (شکل ۴)، و با جریان برق می‌توان دمای سطح آسفالت را کنترل نمود.



شکل ۴. نمونه اجرای شبکه لوله‌های سیستم گرمایش هیدرونیک در زیر روسازی (منبع فناوری: Mirzananamadi et al., 2019)

هر چند سیستم‌های الکتریکی از نظر کنترل، عملکرد دقیق‌تر و بهینه‌تری نسبت به سیستم‌های هیدرونیک دارند، اما در مقیاس پروژه‌های بزرگ، میزان مصرف انرژی آنها به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و کارایی کلی کاهش می‌یابد. از این‌رو، در این پژوهش با توجه به ابعاد پروژه و ملاحظات بهره‌وری انرژی، تحلیل و طراحی بر مبنای سیستم هیدرونیک انجام گرفته است (Levenberg & Adam, 2021).

– معرفی پل B9

یکی از به روزترین سیستم‌های اجرا شده در کشور برای مقابله با یخبندان پل B9 اتوبان ارتش می‌باشد. این پل در اتوبان ارتش واقع

در شمال شرقی شهر تهران احداث شده است. عملکرد آن به گونه‌ای است که با استفاده از سنسورهای نصب شده در هنگام نیاز شروع به پاشش محلول «استات کلسیم منیزیم» در طول مسیر می‌نماید تا از نشست برف و یخ‌زدگی بر روی مسیر جلوگیری نمایند. طول مسیر این پل ۱۶۷ متر و عرض آن ۹ متر می‌باشد. این پل با استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتنی نصب شده است. این قطعات به ارتفاع و طول ۳ متر و عرض ۹ متر ساخته می‌شوند (شکل ۵). مجری این پروژه موسسه شهید رجایی و کارفرما طرح شهرداری تهران بوده است. موسسه شهید رجایی یکی از متخصصین در تولید قطعات پیش‌تنیده بتنی پل است و سابقه اجرای پل شهید صدر را نیز در کارنامه خود دارد. قطعات بتنی پیش‌ساخته شده آنها با استفاده از کابل‌های طره‌ای به هم متصل و با کشیدگی این کابل‌ها محکم می‌شوند. پس از نصب عرشه پل، درزهای انقطاع بین لایه‌ها پر شده و سپس آسفالت پلیمری روی پل کار می‌شود. چند دلیل باعث استفاده از آسفالت پلیمری بر عرشه پل می‌شود که از مهمترین آنها می‌توان به حفظ انسجام روسازی بر اساس لرزش‌های پل اشاره کرد. برقراری اتصال کافی میان آسفالت و بتن در پلی که دارای ارتعاش و لرزش است و در شرایط عبور ماشین‌های سبک و سنگین بر روی آن مسیر، کاری سخت می‌باشد. آسفالت معمولی در این شرایط از چسبندگی کافی برخوردار نیست و از لایه بتنی جدا می‌شود. اما در این پل‌ها با استفاده از نوعی آسفالت پلیمری توانستند تا این مشکل را مرتفع کنند. ضخامت آسفالت مورد استفاده در این نوع پل‌ها ۳ تا ۵ سانت می‌باشد.



شکل ۵. مقطع عرضی قطعات پیش‌ساخته پل (شرکت پایاب زمزم)

مدل‌سازی سیستم هیدرونیك در پل B9 تهران

با توجه به بررسی‌های انجام شده در متن و در نظر گرفتن ویژگی‌های پروژه پل B9 تهران، در این بخش از پژوهش، یک سیستم هیدرونیك فرضی برای این پل مدل‌سازی می‌شود تا رفتار حرارتی لایه‌های روسازی در شرایط اقلیمی واقعی تحلیل گردد. برای نصب سیستم هیدرونیك بر روی پل، نیاز به طراحی نقشه اجرایی لوله‌گذاری‌ها و بررسی نکات اجرایی می‌باشید تا طرح قابلیت اجرا داشته باشد.

— انتخاب لوله سیستم هیدرونیك

انتخاب نوع لوله هیدرونیك یکی از نکات آغازین در طراحی می‌باشد. لوله‌های مختلفی مانند *Copper* *PEX* *PERT* و ... در سیستم‌های هیدرونیك استفاده می‌شود.

قطر خارجی لوله‌ها در سیستم هیدرونیك حدود ۳ سانت می‌باشد. با توجه به ضخامت ۳ سانتیمتری آسفالت، نصب این لوله در این روکش آسفالتی غیرممکن می‌باشد. برای حل مشکل می‌توان از دو راهکار استفاده کرد: یکی محاسبه و ساخت لایه بیندر جهت دفن لوله

و دوم محاسبه و ساخت یک لایه ۵ سانتی کاور بتنی با توجه به پیچیده بودن شرایط اجرایی نصب لوله‌ها زیر آسفالت، در طراحی این مدل‌سازی از سیستم کاور بتنی استفاده شده است. همچنین سیستم بتنی به دلیل اجرا نشدن در دمای بالا برخلاف آسفالت نصب سیستم را نیز راحت‌تر می‌کند. به صورت کلی زمانی که بنا بر نصب سیستم هیدرونیك در روسازی پل باشد بار ناشی از کاور ۵ سانتی بتنی، در محاسبات اولیه وارد و طراحی قطعات پیش‌ساخته اعمال می‌شود. با توجه به ضریب انبساط حرارتی بتن، لوله‌های مسی و آهنی انتخاب مناسب‌تری جهت دفن در بتن باشند چرا که ضریب انبساط حرارتی بتن که در حدود ۱۰ میکرو بر درجه سانتی‌گراد است نزدیک به ۱۲ و ۱۷ میکرو بر درجه سانتی‌گراد لوله‌های آهنی و مسی است. اما نقطه ضعف این لوله‌ها مقاومت به خوردگی کم آنها می‌باشد. همچنین از منظر اجرایی به دلیل انعطاف کم آنها، اجرا سخت و سرعت اجرا نیز کم می‌شود. با توجه به این نکات لوله‌های PEX-AL-PEX در این تحقیق انتخاب شده است. مقاومت در برابر خوردگی و رطوبت، ضریب انبساط حرارتی نزدیک به بتن از دلایل این انتخاب است.

جدول ۲. مقایسه لوله‌های قابل نصب در سیستم هیدرونیك

نوع لوله	مقاومت لهیدگی / مکانیکی	مقاومت در برابر خوردگی	انعطاف‌پذیری	ضریب انبساط حرارتی (C°/۱)
PEX	پایین - نیاز به محافظت در بتن	خوب	عالی	200×10^{-6}
PEX-AL-PEX	متوسط - دفن در بتن توصیه می‌شود	عالی	خوب	20×10^{-6}
PERT	پایین - آسیب‌پذیر بدون پوشش	خوب	عالی	180×10^{-6}
Copper	بالا - قابل تحمل بار مستقیم	متوسط	کم	17×10^{-6}
Steel	خیلی بالا - مناسب بارهای سنگین	ضعیف	خیلی کم	12×10^{-6}

– انتخاب عایق حرارتی

برای جلوگیری از انتقال حرارت به سمت پایین، زیر لوله‌ها یک لایه عایق نصب می‌شود و برای جلوگیری از جابه‌جایی لوله‌ها هنگام بتن‌ریزی، از سیستم مهاری استفاده می‌شود. گزینه مناسب اجرای این پروژه، مش‌بندی کامپوزیتی است که سبک و عایق بوده و امکان محکم کردن لوله‌ها با بست یا مفتول مشابه خاموت ساختمانی را فراهم می‌کند. همچنین، عایق‌بندی در طرفین پل انجام می‌شود تا تبادل حرارتی از این جهات کاهش یابد. با این تدابیر، مسیر از سه طرف عایق‌بندی شده و انتقال حرارت عمدتاً از سمت سطح انجام می‌گیرد.

– شبیه‌سازی حرارتی سیستم هیدرونیك

حال نیاز به بررسی عملکردی این سیستم می‌باشد تا در صورت تامین نیازهای طرح، اقدام به طراحی دقیق آن صورت گیرد. ابتدا در این پژوهش فرض شده که سیستم خاموش بوده است و تازه جریان آب گرم در لوله شروع شده در این صورت تحلیل انتقال حرارت گذرا (Transient Heat Transfer) بهره می‌بریم. همچنین با توجه به مشخصات سیستم از معادله «جسم با ضخامت متناهی» (Finite Slab) استفاده می‌کنیم معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت گذرا (Incropera & DeWitt, 2006).

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \alpha = \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$T(x,t)$: دما در مکان و زمان؛ $\alpha = \frac{k}{\rho c}$: ضریب نفوذ حرارتی (Thermal Diffusivity)؛ k : ضریب هدایت حرارتی [W/m·K]؛ ρ : چگالی ماده [kg/m³]؛ c : ظرفیت گرمایی ویژه [J/kg·K]

داده‌های مورد استفاده در تحلیل

- در این مدل حرارتی، تنها لایه‌های مؤثر در انتقال حرارت سطحی عرشه شامل ۵ سانتی‌متر بتن و ۳ سانتی‌متر آسفالت مدل‌سازی

شدند؛ از این رو ضخامت ناحیه مورد تحلیل حرارتی برابر با ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

- $T(x,0) = -10^{\circ}\text{C}$ (فرض شده که بر اساس داده‌های سردترین داده‌های دمایی تهران در ۱۰ سال اخیر شهر تهران انتخاب شده است).
- دمای لوله ۴۰ درجه سانتی‌گراد (فرض بر اساس میانگین معمول سیستم‌های هیدرونیک می‌باشد بین ۲۰ تا ۵۰ درجه)
- برای محاسبه α از داده‌های مقالات گذاشته استفاده گردیده است (Dempsey & Spitler, 1984; IES Ltd., 2021).

جدول ۳. مشخصات فیزیکی مصالح (Dempsey & Spitler, 1984; IES Ltd., 2021)

نوع ماده	ضریب هدایت حرارتی (k) (W/m·K)	چگالی (ρ) (kg/m ³)	ظرفیت گرمایی ویژه (c) (J/kg·K)	ضریب نفوذ حرارتی (α) [m ² /s]
بتن	۱/۴	۲۴۰۰	۸۸۰	6/63E-07
آسفالت	۰/۷۵	۲۳۰۰	۹۲۰	3/54E-07

مرز پایین لایه‌ها در تماس با سیستم لوله‌کشی هیدرونیک قرار دارد که دمای آن ثابت و برابر با ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. این دما، دمای خروجی آب در انتهای مسیر می‌باشد. همچنین عایق‌بندی در حاشیه‌ها را در مسیر طولی نیز لحاظ شد. در مرز بالایی (سطح آسفالت)، سطح در تماس مستقیم با هوای سرد محیطی قرار دارد و در نتیجه اتلاف حرارت از طریق جابه‌جایی به هوا رخ می‌دهد. به منظور مدل‌سازی این اتلاف، از شرط مرزی نوع سوم (Robin boundary condition) استفاده شده است که شار حرارتی سطح را متناسب با اختلاف دمای بین سطح و هوا تعریف می‌کند. (Incropera & DeWitt, 2006):

$$(T_{\text{سطح}} - T_{\text{هوا}}) \cdot h = - \left. \frac{T \partial k}{x \partial x} \right|_{\text{سطح}} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

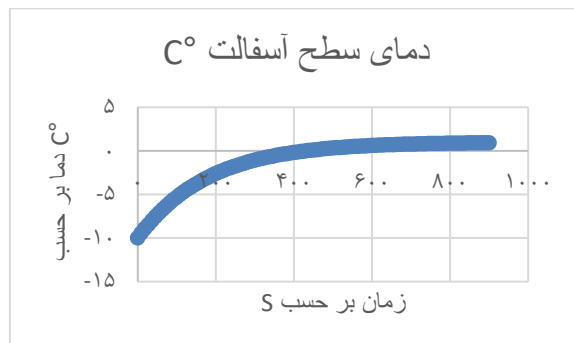
k : ضریب هدایت حرارتی لایه سطحی ($W/m \cdot K$); T : دما; h : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W/m^2 \cdot K$)
برای برآورد مقدار h از رابطه تجربی مک‌آدامز استفاده شد که برای جریان هوای آزاد روی سطوح افقی در معرض جریان هوای آزاد مناسب است:

$$\sqrt{v}10 + v - 10.45 = h \quad \text{(رابطه ۳)}$$

که در این رابطه v نماینده سرعت باد می‌باشد. با استفاده از داده‌های هواشناسی تهران این سرعت را ۲/۵ متر بر ثانیه انتخاب شد. با این داده برای h عدد $23/75 W/m^2 \cdot K$ به دست می‌آید. لذا مدل Finite Slab به همراه شرط مرزی روبن در مرز بالایی، چارچوب اصلی تحلیل عددی فرایند گرمایش سطح را تشکیل می‌دهد. استفاده از این ترکیب مدل‌سازی، امکان شبیه‌سازی دقیق دمای گذرا و تعیین زمان مورد نیاز برای رسیدن سطح به دمای یخ‌زدایی را فراهم می‌سازد. معادله انتقال حرارت به صورت گذرا در قالب یک بعدی و با شرط مرزی روبن حل عددی شد. در این حل، خواص حرارتی لایه‌ها مطابق جدول تجربی شامل ضریب هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه آسفالت و بتن اعمال گردید و از روش تفاضل محدود صریح با گام‌های زمانی پایدار استفاده شد. با اجرای شبیه‌سازی در بازه‌های زمانی متوالی، نمودار تغییرات دمای سطحی در طول زمان ترسیم گردید و آستانه دمای ۱ درجه سانتی‌گراد، به عنوان مرز ذوب یخ در نظر گرفته شد. در این مدل‌سازی، شرایط مرزی و اولیه به طور کامل و مطابق با منابع معتبر مانند Incropera & DeWitt تعریف شده‌اند. شرط اولیه دمای ۱۰- درجه و برای شرایط مرزی در مرز پایین با دمای ثابت ۴۰+ درجه سانتی‌گراد مدل شده، در حالی که مرز بالایی با شرط مرزی نوع سوم (جابه‌جایی به هوا) در نظر گرفته شده است. لذا چارچوب معادله Finite Slab با شرایط مرزی کامل به درستی اعمال شده است.

بر اساس شکل ۶ و شرایط نصب سیستم هیدرونیک (هوای ۱۰-°C، دمای لوله ۴۰°C، سرعت باد ۲/۵ متر بر ثانیه)، فعال شدن

سیستم باعث می شود سطح آسفالت ظرف ۴۴۰ ثانیه (۷/۵ دقیقه) به دمای بالای 0°C و ظرف حدود ۹۰۰ ثانیه (۱۵ دقیقه) به 1°C برسد. این تحلیل به صورت یک بعدی انجام شده و تنها دمای آسفالت بالای لوله بررسی شده است.



شکل ۶. نمودار تغییرات دما سطح آسفالت بر حسب زمان (s)

استفاده از نرم افزار *COMSOL Multiphysics* در این پژوهش، به دلیل قابلیت آن در شبیه سازی دقیق فرایندهای انتقال حرارت و امکان مدل سازی جزئیات هندسی و شرایط مرزی صورت گرفته است. اعتبار و قابلیت اطمینان این نرم افزار در مطالعات مختلف مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته است. برای نمونه، (Gerlich et al., 2013) عملکرد *COMSOL Multiphysics* را در شبیه سازی انتقال حرارت با استفاده از حل های تحلیلی، نتایج آزمون های استاندارد *IEA* و داده های اندازه گیری شده ارزیابی کردند و نشان دادند که با استفاده از مش بسیار ریز، خطای عددی مدل می تواند به کمتر از یک درصد کاهش یابد. همچنین، (Howard et al., 2019) قابلیت *COMSOL* را در شبیه سازی انتقال حرارت در کانال های مستطیلی باریک، با استفاده از روش های صحت سنجی تحلیلی، روش حل ساخته شده (*MMS*) و داده های آزمایش های انجام شده در *NASA* بررسی کردند و توانایی مدل های *CFD* در *COMSOL* برای پیش بینی انتقال حرارت در این هندسه را ارزیابی نمودند. در این پژوهش نیز، به منظور کاهش خطای گسسته سازی و افزایش دقت حل عددی، شبکه محاسباتی با امان های مناسب و بر اساس مطالعه استقلال شبکه (*Mesh Independence*) تنظیم شده است.

بررسی استقلال نتایج عددی از شبکه محاسباتی و تفکیک زمانی

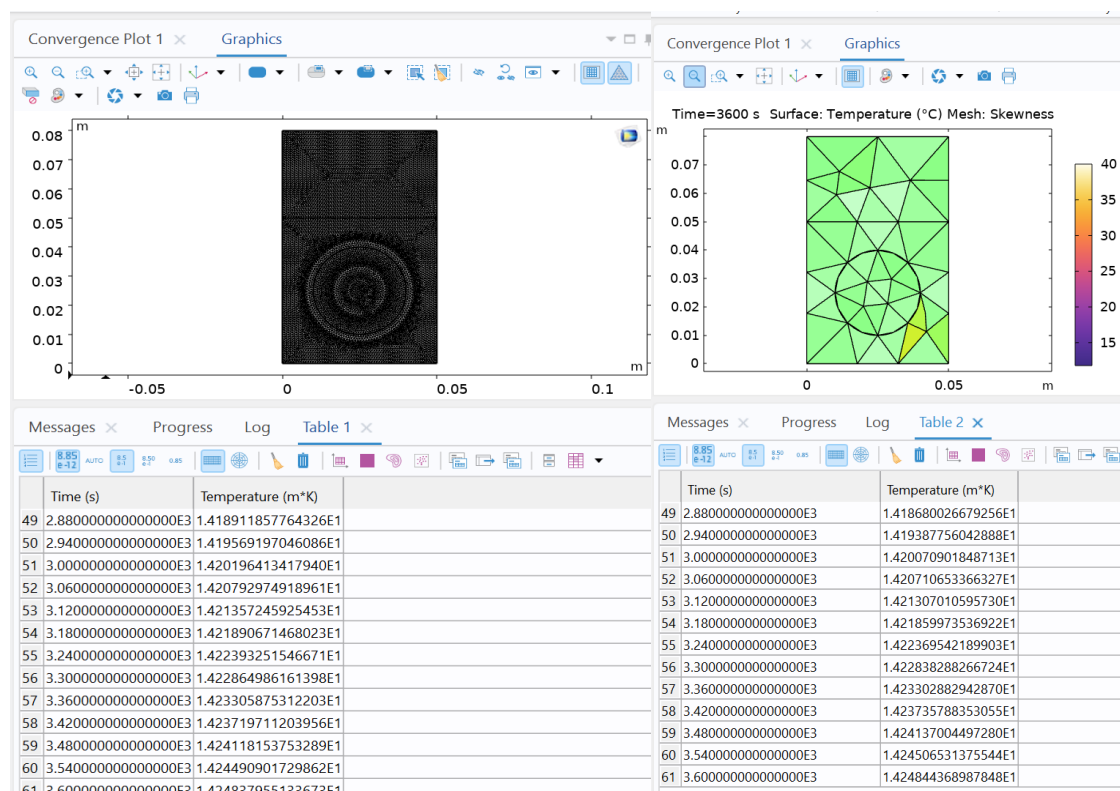
در روش های عددی مبتنی بر امان محدود، دقت نتایج به پارامترهای گسسته سازی شامل اندازه شبکه محاسباتی و تفکیک زمانی وابسته است. بنابراین، پیش از انجام تحلیل های اصلی، به منظور اطمینان از صحت و پایایی نتایج، مطالعات استقلال حل عددی نسبت به ابعاد مش و گام زمانی انجام شد. هدف از این بررسی ها، تعیین سطح مناسبی از گسسته سازی بود که ضمن حفظ دقت نتایج، از افزایش غیرضروری هزینه محاسباتی جلوگیری کند.

بررسی استقلال از شبکه محاسباتی^۱

به منظور بررسی تأثیر اندازه امان ها بر پاسخ حرارتی مدل، تحلیل حساسیت شبکه محاسباتی انجام شد. در مرحله نخست، شبکه محاسباتی بر اساس تنظیمات پیشنهادی نرم افزار *COMSOL Multiphysics* ایجاد گردید. سپس به منظور ارزیابی استقلال نتایج از شبکه، دو حالت حدی شامل شبکه بسیار درشت^۲ و شبکه بسیار ریز^۳ ایجاد و نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه شد. شکل ۷ شبکه های محاسباتی مورد استفاده در دو حالت مش بسیار درشت و بسیار ریز را نشان می دهد.

1. Mesh Independence
2. Coarse Mesh
3. Fine Mesh

مقایسه نتایج ارائه شده در شکل ۷ نشان داد که اختلاف میانگین دمای سطحی بین دو حالت حدی شبکه تنها حدود ۰/۰۲۶ درصد است. این مقدار اختلاف بسیار کوچک نشان می‌دهد که افزایش بیشتر تعداد المان‌ها در سائز این مقطع و در تحلیل دوبعدی تأثیر قابل توجهی بر پاسخ حرارتی مدل ایجاد نمی‌کند و نتایج در محدوده شبکه‌های بررسی شده مستقل از اندازه مش هستند. با توجه به این که مش با تنظیمات *Normal Mesh* نرم‌افزار از نظر تراکم بین دو حالت بررسی شده قرار دارد، این شبکه به عنوان شبکه نهایی تحلیل انتخاب شد. این انتخاب سبب ایجاد تعادل مناسب بین دقت عددی و هزینه محاسباتی شده و تمامی شبیه‌سازی‌های بعدی با این شبکه انجام گرفت.



شکل ۷. مقایسه دمای سطح حاصل از شبکه‌های محاسباتی با اندازه‌های مختلف در زمان یکسان در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

بررسی استقلال از تفکیک زمانی^۱

از آنجا که مدل حاضر یک تحلیل انتقال حرارت گذرا است، علاوه بر شبکه مکانی، تأثیر تفکیک زمانی بر نتایج نیز مورد بررسی قرار گرفت. در حل‌های وابسته به زمان، انتخاب گام زمانی مناسب اهمیت زیادی دارد، زیرا گام زمانی بزرگ ممکن است موجب کاهش دقت و گام زمانی بسیار کوچک موجب افزایش هزینه محاسباتی بدون بهبود محسوس نتایج شود. برای بررسی حساسیت زمانی، بازه شبیه‌سازی برابر با $t=3600$ s در نظر گرفته شد و این بازه در سه سطح مختلف شامل ۱۵، ۳۰ و ۶۰ تقسیم زمانی گسسته‌سازی گردید. اندازه گام زمانی متناظر با هر حالت به ترتیب برابر بود با:

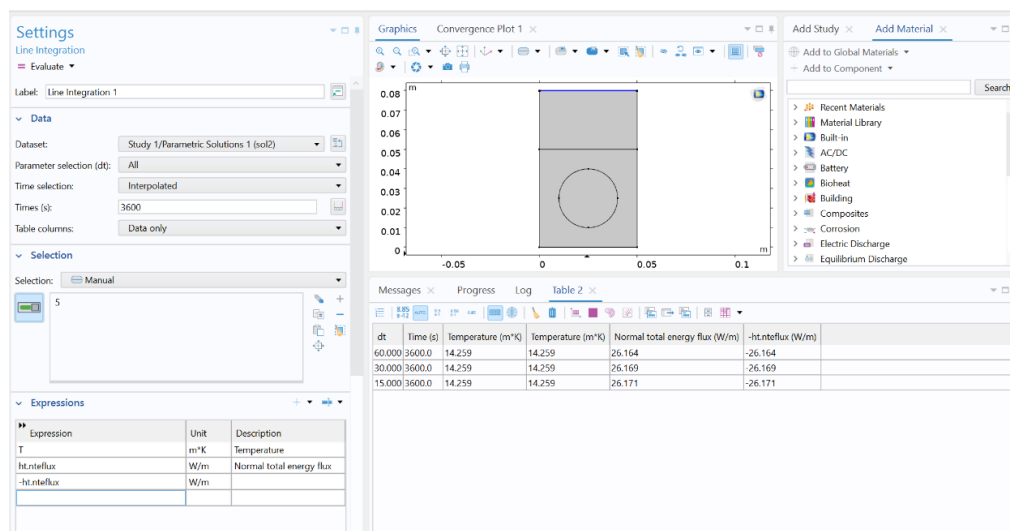
$$15: \Delta t = 240 \text{ s} \text{ تقسیم زمانی}$$

$$30: \Delta t = 120 \text{ s} \text{ تقسیم زمانی}$$

$$60: \Delta t = 60 \text{ s} \text{ تقسیم زمانی}$$

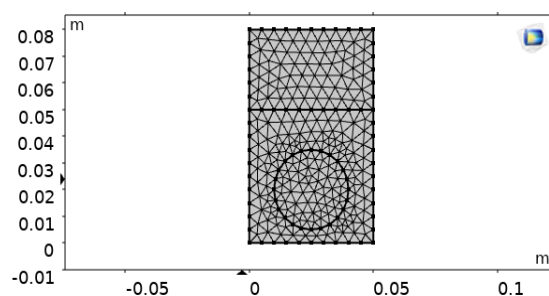
1. Time-step Independence

پارامترهای دمای سطح و شار حرارتی نرمال در انتهای زمان شبیه‌سازی برای هر سه حالت استخراج و مقایسه شدند. شکل ۸ نتایج بررسی استقلال زمانی انجام‌شده در نرم‌افزار COMSOL را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، تغییر تفکیک زمانی تأثیر محسوسی بر توزیع دمای سطح ایجاد نکرد و مقادیر دمایی حاصل از سه حالت تقریباً یکسان بودند. همچنین مقدار کمیت هدف (QoI) در زمان نهایی شبیه‌سازی نشان داد که اختلاف بین ریزترین و درشت‌ترین تفکیک زمانی تنها حدود ۰/۰۲۷ درصد است. مقدار عدم قطعیت ناشی از گسسته‌سازی زمانی نیز با استفاده از تحلیل همگرایی زمانی محاسبه شد و مقدار آن حدود ۰/۰۰۶ درصد به‌دست آمد. این مقدار ناچیز بیانگر آن است که کاهش بیشتر اندازه گام زمانی تغییر قابل توجهی در نتایج ایجاد نمی‌کند.



شکل ۸. مقایسه دمای سطح و شار حرارتی نرمال حاصل از گام‌های زمانی مختلف در زمان $t = 3600$ ثانیه

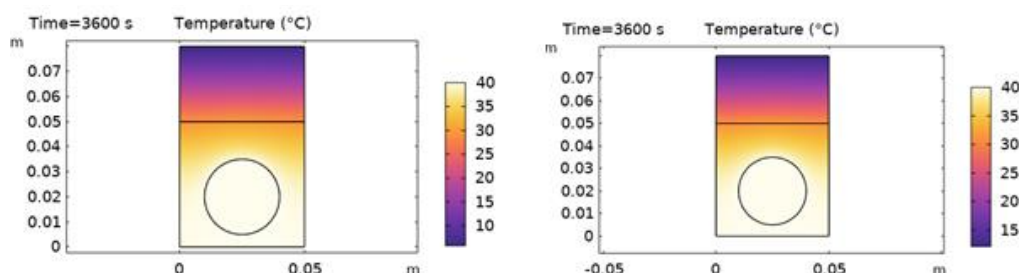
بر این اساس، استفاده از ۶۰ تقسیم زمانی در بازه ۳۶۰۰ ثانیه (معادل $\Delta t = 60s$) به‌عنوان تنظیم نهایی حل انتخاب شد و تمامی تحلیل‌های اصلی با این تفکیک زمانی انجام گرفت.



شکل ۹. شبیه‌سازی دوبعدی سیستم با جزییات ۵ سانت بتن، ۳ سانت آسفالت و لوله با قطر ۳ سانتی‌متر

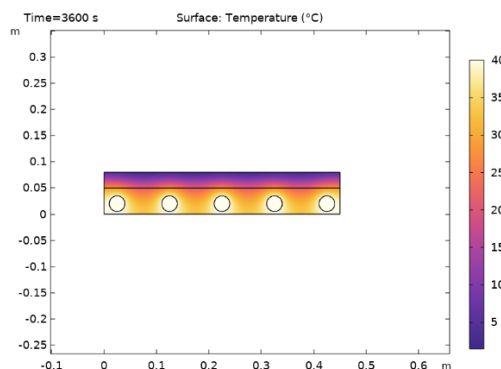
با شرایط دمای 10°C - و باد $2/5$ متر بر ثانیه، شبیه‌سازی ۲ بعدی نشان می‌دهد که پس از ۳۶۰۰ ثانیه، سطح کل به دمای ۱۲ تا 15°C رسیده و تقریباً یکنواخت گرم شده است (شکل ۱۰). ریزسازی مش‌ها و بررسی گام‌های زمانی مختلف اختلاف دمایی ناچیز (در حد صدم درجه) نشان داد که دقت تحلیل کافی است. برای ارزیابی کارآمدی سیستم در شرایط واقعی، دمای 5°C - و بارش برف ۳۰ میلی‌متر بر ساعت در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی دمای سطح بالای 6°C را نشان داد، بنابراین سیستم قادر به یخ‌زدایی عملیاتی سطح است (شکل ۱۱). این شبیه‌سازی‌ها راستی‌آزمایی محاسبات انتقال حرارت گذرا را تأیید کردند. برای بررسی فاصله‌گذاری لوله‌ها، مسیر ۵۰ سانتی‌متری شبیه‌سازی شد و فاصله ۱۰ سانتی‌متری لوله‌ها به‌عنوان تحلیل اولیه انتخاب شد؛ در سیستم‌های هیدرونیك، فاصله معمول لوله‌ها بین ۱۰

تا ۳۰ سانتی‌متر است.



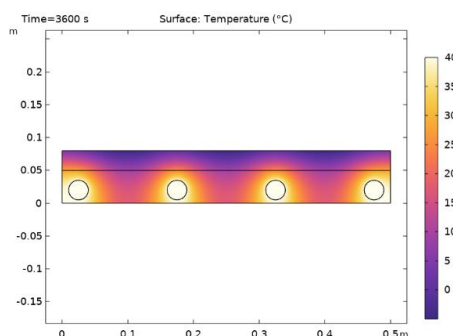
شکل ۱۱. نتیجه شبیه سازی دو بعدی سیستم دمای ۵- درجه سانتی گراد بارش برف ۳۰ میلی‌متر در ساعت

شکل ۱۰. نتیجه شبیه سازی دو بعدی سیستم در دمای ۱۰- درجه سانتی گراد به بالا را نشان می‌دهد



شکل ۱۲. نتیجه شبیه‌سازی طولی سیستم با فاصله‌گذاری ۱۰ سانتی‌متر در دمای ۵- درجه و بارش 30 mm/h برف

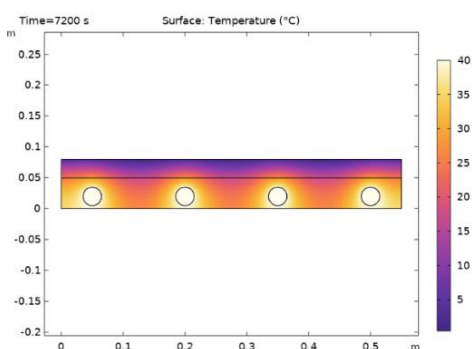
شکل ۱۲ نتایج تحلیل به‌صورت فاصله‌گذاری ۱۰ سانتی لوله‌ها به‌صورت مرکز به مرکز بعد از یک ساعت را نشان می‌دهد که دمای سطح آسفالت به $0/5$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این ارزیابی با دمای ۵- درجه سانتی‌گراد و ۳۰ میلی‌متر بارش برف در ساعت می‌باشد. با توجه به عملکرد فاصله ۱۰ سانتی حال فاصله ۱۵ سانتی ارزیابی می‌گردد.



شکل ۱۳. نتیجه شبیه‌سازی طولی سیستم با فاصله‌گذاری ۱۵ سانتی‌متر در دمای ۵- درجه و بارش 30 mm/h برف

در شکل ۱۳ نشان داده شده با فاصله‌گذاری ۱۵ سانتی‌متری مرکز به مرکز لوله‌ها بعد از یک ساعت دمای سطح آسفالت به ۴- درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این ارزیابی با دمای ۵- درجه سانتی‌گراد و ۳۰ میلی‌متر بارش برف در ساعت می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که با افزایش فاصله کارایی سیستم کاهش می‌یابد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت فاصله‌گذاری ۱۰

سانتی لوله از یکدیگر در ترکیب ۵ سانت بتن و ۳ سانت آسفالت عملکرد مناسب این سیستم در شرایط بارشی منطقه ۱ شهر تهران (محل احداث پل B9) را در صورت غافلگیری دارد. طبق فرضیات تحلیلی ذکر شده در ابتدا، روشن شدن سیستم به هنگام شروع بارش بود. برای مثال در تحلیل شکل ۱۳ در صورتی که لوله‌ها در فاصله ۱۵ سانتی متری نصب شده باشند و بارش شروع شود پس از گذشت ۱ ساعت همچنان دمای سطح آسفالت در زیر صفر درجه سانتی گراد قرار دارد اما این دمای آستانه نمی‌باشد. لذا عملکرد سیستم در ۲ ساعت نیز ارزیابی شد.



شکل ۱۴. نتیجه شبیه‌سازی طولی سیستم با فاصله‌گذاری ۱۵ سانتی متر بعد از ۲ ساعت

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که پس از ۲ ساعت دمای تمام سطح، بالای ۱ درجه سانتی گراد قرار دارند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که افزایش فاصله بین لوله‌ها زمان مقابله با بارش را طولانی می‌کند، اما در صورت روشن کردن سیستم، حداقل یک ساعت قبل از شروع بارش، عملکرد فاصله ۱۵ سانتی متری معادل فاصله ۱۰ سانتی متری خواهد بود. دلیل این موضوع انتقال حرارت از لوله‌ها به بتن و آسفالت است؛ در زمان پیش گرم شدن، انرژی صرف گرم شدن لایه‌های اطراف لوله می‌شود و سپس انرژی باقیمانده برای ذوب برف و مقابله با سرمای هوا آزاد می‌گردد. برای طراحی نهایی و شبیه‌سازی سه بعدی سیستم، نیاز به اطلاعات شار حرارتی، اختلاف دمای ورودی و خروجی، دبی و افت هد مسیر است. دبی با اختلاف دما و شار انتقالی رابطه مستقیم دارد. تحلیل دوبعدی COMSOL نشان داد که دمای خروجی مبنای محاسبات است (حداقل 4°C) و با فرض افت دمای ۳ درجه، دمای ورودی 43°C به دست آمد. میانگین شار حرارتی از تحلیل دوبعدی برابر ۴۴۵ وات بر مترمربع محاسبه شد که بر اساس آن دبی مورد نیاز جریان تعیین می‌شود.



شکل ۱۵. شماتیک نصب لوله هیدرونیک بر روی لایه بتنی پل (Adl-Zarrabi et al., 2023)

در سیستم‌های کوچک اروپایی به لوله‌گذاری عرضی (شکل ۱۵) در طول مسیر اشاره شده با ترکیب آن با فاصله ۱۰ سانتی متری در پژوهش حاضر طول لوله‌گذاری معادل ۱۵۰۳۰ متر می‌شود. برای محاسبه دبی جرمی آب (m) در لوله، از معادله انتقال حرارت استفاده می‌شود:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{رابطه ۴})$$

Q : نرخ انتقال حرارت (وات)؛ m : دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)؛ C_p : ظرفیت گرمایی ویژه آب ($4216 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)؛ ΔT : اختلاف دمای آب

ورودی و خروجی ($^{\circ}\text{C}$)

برای محاسبه Q باید شار حرارتی مستخرج در تحلیل ۲ بعدی را در مساحت کلی سطح ضرب نمود برای این منظور به محاسبه مساحت سطح می‌پردازیم که برابر ۱۵۰۳ متر مربع می‌باشد. با توجه به شار ۴۴۵ وات بر مترمربع نرخ انتقال حرارتی برابر ۶۶۸۸۳۵ وات داریم. با جاگذاری داده‌های موجود در معادله انتقال حرارت دبی جرمی سیستم معادل 16 kg/s به‌دست می‌آید. با توجه به چگالی آب در دمای ۴۵ درجه که برابر معادل 992 kg/m^3 می‌باشد می‌توان دبی حجمی را محاسبه نمود. بر این اساس دبی حجمی $16/3\text{ lit/s}$ به‌دست می‌آید. با استفاده از معادله «دبی = سرعت $\times$ سطح مقطع» می‌توان سرعت را به‌صورت تقریبی معادل $22/8$ متر بر ثانیه به‌دست آورد. برای تشخیص این که این سرعت در لوله با عرض ۳ سانت امکان‌پذیر است می‌توان از مبانی هیدرولیکی مانند محاسبه رژیم جریان کمک گرفت. برای نیل به این امر از معادله زیر عدد رینولدز محاسبه می‌گردد تا رژیم جریان مشخص گردد:

$$Re = \frac{992 \times 22.8 \times 0.03}{0.0006} \approx 1,130,883 \quad (\text{رابطه ۵})$$

عدد به‌دست آمده به شدت از سطح ۴۰۰۰ برای این عدد بیشتر است و نشان‌دهنده جریان کاملاً متلاطم است. جریان متلاطم با این شدت باعث افزایش اصطکاک و افت انرژی می‌شود و همچنین ارتعاشات و سر و صدای اضافی در سیستم ایجاد می‌کند. همین‌طور با محاسبه افت هد و افت فشار در این سیستم می‌توان بررسی نمود که این سیستم از نظر اجرایی منطقی می‌باشد یا خیر، بدین‌منظور با استفاده از رابطه داریسی- ویسباخ می‌توان این ۲ پارامتر هیدرولیکی را نیز محاسبه نمود.

$$\frac{V^2}{2gd} f = \frac{fh}{L} \quad (\text{رابطه ۶}) \text{ معادله افت هد بر مبنای واحد طولی}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \rho g \frac{fh}{L} \quad (\text{رابطه ۷}) \text{ معادله افت فشار بر مبنای واحد طولی}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (\text{رابطه ۸}) \text{ معادله سوامی- جین برای محاسبه ضریب اصطکاک}$$

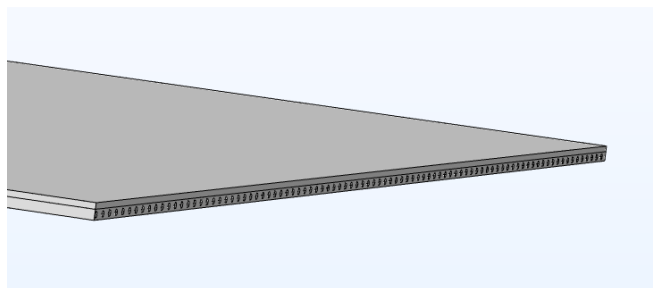
داده‌های سیستم سری:

$$\rho = 992\text{ kg/m}^3, g=9.81\text{ m/s}^2, D=0.03\text{ m}, \varepsilon=1.5\mu\text{m}, Re=1,130,883, V=22/8\text{ m/s}$$

با جاگذاری داده‌های، ضریب اصطکاک سوامی-جین برابر ۰/۰۱۲۵۲ و افت هد معادل ۱۱/۰۷ متر بر متر محاسبه شد. این افت هد به معنای انرژی هیدرولیکی از دست رفته در مسیر جریان به دلیل اصطکاک و تلاطم است. برای مسیر ۱۵ کیلومتری، افت هد نهایی معادل ستون آبی به ارتفاع ۱۶۶ کیلومتر به‌دست آمد که غیرعملی است و هیچ پمپی قادر به تامین چنین توان بالایی نیست. افت فشار نهایی نیز حدود ۱۰۷۷۰۰ پاسکال محاسبه شد که نشان‌دهنده غیرقابل اجرا بودن این چیدمان است.

در سیستم سری، علاوه‌بر عدم توان پمپ، مشکلات اجرایی شامل دشواری نصب و خم‌کاری لوله‌ها و همچنین قطع عملکرد کل سیستم در صورت آسیب دیدن یک بخش، وجود دارد. بنابراین سیستم سری غیرقابل اجراست و به همین دلیل بررسی سیستم موازی پیشنهاد شد، به‌گونه‌ای که لوله‌ها طول مسیر را پوشش دهند و فاصله‌گذاری عرضی صورت گیرد تا مشکلات اجرایی و عملکردی کاهش یابد.

با تغییر چیدمان لوله‌ها محاسبات کلی تغییری نمی‌کنند و طول کلی لوله‌ها همان ۱۵۰۳۰ متر لوله و نرخ انتقال حرارتی برابر ۶۶۸۸۳۵ وات قبل می‌باشد. تنها تغییر در دبی جریان است چرا که دبی کل بر تعداد لوله‌ها تقسیم می‌شود بر این اساس می‌توان سرعت لوله‌ها را با ΔT های مختلف محاسبه نمود:



شکل ۱۶. شماتیک مدل سازی ۳ بعدی راه با لوله گذاری های طولی و فاصله ۱۰ سانتی لوله ها در کامسول

جدول ۴. محاسبات بر اساس ΔT های مختلف

ΔT	دبی جرمی [kg/s]	دبی حجمی [m^3/s]	دبی حجمی [L/s]	v [m/s]
۰	∞	∞	∞	∞
۱	۱۵۶/۰۵۱	۰/۱۵۷۳۱	۱۵۷/۳۱	۲/۴۷۳
۲	۷۸/۰۲۶	۰/۰۷۸۶۵۵	۷۸/۶۵۵	۱/۲۳۶
۳	۵۲/۰۱۷	۰/۰۵۲۴۳۷	۵۲/۴۳۷	۰/۸۲۴
۴	۳۹/۰۱۳	۰/۰۳۹۳۲۷	۳۹/۳۲۷	۰/۶۱۸
۱۰	۱۵/۶۰۵	۰/۰۱۵۵۷۳۱	۱۵/۷۳۱	۰/۲۴۷

در مراجع گوناگون مانند استاندارد صنعتی امریکا^۱ و استاندارد مهندسی ساختمان بریتانیا^۲ برای لوله هایی با قطر ۳ سانت حداقل سرعت را 0.5 m/s و بازه 0.6 تا 1.2 متر بر ثانیه را معرفی نمودند. با توجه به این استانداردها اختلاف دما ۳ درجه سانتی گراد مبنای محاسباتی آتی قرار گرفت. با این سرعت عدد رینولدز 41600 ، افت هد کلی $4/21$ متر و افت فشار 0.41 bar در 90 لوله را خواهیم داشت. نتایج نهایی برای این سامانه با لوله گذاری موازی، قطر ۳ سانتی متر، فاصله ۱۰ سانتی متر و شار حرارتی 492 W/m^2 ، با سرعت جریان 0.824 m/s و اختلاف دمای طراحی 3°C ، امکان تأمین دمای خروجی 40°C را در مسیر 167 متری با افت هد $4/21$ متر فراهم می کند (ASHRAE, 2020; CIBSE, 2016).

– هزینه های اجرا سیستم هیدرونیک

به جهت بررسی هزینه های اجرایی با طراحی ۱۰ و ۱۵ سانتی متری جدول زیر بر اساس قیمت های داخلی در سال ۱۴۰۴ تدوین گردیده است. (Armalit, 2025; GKNKALA, 1404; Shenzhen Sole Technology Co., Ltd., 2025).

جدول ۵. هزینه مورد انتظار جهت نصب در دو فاصله

فاصله بین لوله ها ۱۵ سانتی متر	فاصله بین لوله ها ۱۰ سانتی متر	مشخصه
۱۰۰/۱۷	۱۵۰/۳۰	متر از لوله (متر)
۱۶/۲۰۰	۲۴/۵۰۰	هزینه لوله (دلار)
۵۰۰	۷۵۰	هزینه عایق (دلار)
۱۵۰/۳	۱۵۰/۳	مساحت مش (مترمربع)
۱/۵۰۰	۱/۵۰۰	هزینه مش (دلار)
۱۸/۲۰۰	۲۶/۷۵۰	هزینه کل (دلار)

2. ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment

3. CIBSE Guide B1 (UK)

در این پژوهش قصد ارائه یک راهکار پایدار برای طراحی بومی این مسیر را داریم. طراحی ۱۵ سانتی می‌تواند هزینه اولیه را در اجرا کاهش دهد اما مصرف انرژی را افزایش می‌دهد. زیرا سیستم بسته به شرایط آب‌وهوایی نیاز به روشن بودن در ساعات قبل از بارش را دارد. با توجه به این نکته فاصله‌گذاری ۱۰ سانتی‌متری برای پژوهش انتخاب شد. مدل عددی آماده شده در این فصل، مبنای تحلیل حرارتی و انرژی‌محور در فصل‌های بعدی قرار خواهد گرفت تا میزان انرژی موردنیاز برای حفظ دمای ایمن روسازی در شرایط زمستانی تعیین گردد.

– تحلیل انرژی مصرفی سیستم هیدرونیک

با هدف ارزیابی میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز برای عملکرد سیستم هیدرونیک نصب‌شده در سطح یک پل شهری، یک تحلیل عددی تحت شرایط واقع‌گرایانه انجام گرفت. مشخصات هندسی پل مورد بررسی به صورت ۹ متر عرض و ۱۶۷ متر طول بود که معادل ۱۵۰۳ مترمربع سطح مؤثر گرمایش است.

جدول ۶. مشخصات تحلیل انرژی

پارامتر	مقدار	ضخامت بتن	۵ سانتی‌متر
دمای محیط	-۵ درجه سانتی‌گراد	فاصله‌گذاری لوله‌ها	۱۰ سانتی‌متر
نرخ بارش برف	۳۰ میلی‌متر در ساعت	زمان تحلیل	۱ ساعت (۳۶۰۰ ثانیه)
دمای ورودی آب لوله‌ها	۴۳ درجه سانتی‌گراد	بازده سیستم گرمایش	۸۰ درصد (بر مبنای سیستم‌ها موجود در اروپا)
دمای خروجی آب لوله‌ها	۴۰ درجه سانتی‌گراد	ضخامت بتن	۵ سانتی‌متر
ضخامت آسفالت	۳ سانتی‌متر	فاصله‌گذاری لوله‌ها	۱۰ سانتی‌متر

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی گذرا در نرم‌افزار *COMSOL Multiphysics*، شار حرارتی متوسط منتقل‌شده از لوله به سازه برابر با حدود ۴۵۱ وات بر مترمربع برآورد شد. این مقدار توان حرارتی به منظور جلوگیری از یخ‌زدگی و ذوب برف با شدت متوسط، متناسب با استانداردهای سیستم‌های ضدیخ‌زدایی راه‌ها می‌باشد. با در نظر گرفتن سطح کلی پل، توان حرارتی کل سیستم به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{thermal} = q'' \times A = 451 \text{ W/m}^2 \times 1503 \text{ m}^2 = 677,853 \text{ W} \quad (\text{رابطه ۹})$$

مصرف انرژی الکتریکی جهت گرمایش معادل این توان در مدت ۱ ساعت (با فرض بازده ۸۰ درصد برای کل سیستم) برابر است با:

$$E_{elec} = (Q_{thermal} \times t) / \eta = (677853 \times 3600) / 0.8 = 3.050 \times 10^9 \text{ J} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

هر $1 \text{ kWh} = 3/6 \times 10^6 \text{ J}$ پس در کلف مصرف انرژی حرارتی سیستم معادل $847/3 \text{ kWh}$ به‌دست می‌آید. برای محاسبه مصرف

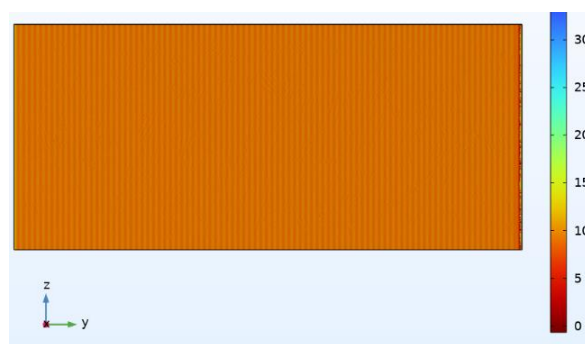
پمپ نیز داریم:

$$P_{elec} = \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

ρ : چگالی، g : شتاب گرانشی، Q : حجم عبوری کل سیستم که معادل $188/77 \text{ m}^3/\text{h}$ ، H : افت هد کل مسیر که برابر $4/21$ ، η : بازده سیستم.

مصرف انرژی سیستم هیدرونیک پل در شرایط بحرانی (بارش برف ۳۰ میلی‌متر بر ساعت و دمای -۵ درجه سانتی‌گراد) معادل ۸۵۱ کیلووات ساعت برای یک ساعت عملکرد محاسبه شده است. این مقدار شامل افت هد فرضی ۵ متر و بازده ۰/۷۵ درصد پمپ می‌شود و نمایانگر حداکثر مصرف در سخت‌ترین شرایط کاری است. در شرایط معمولی، با کاهش بارش و افزایش دما، مصرف انرژی کاهش

می‌یابد. برای تامین این انرژی با استفاده از انرژی پاک، می‌توان از پنل‌های خورشیدی ۷۰۰ وات استفاده کرد که برای تامین انرژی یک ساعت سیستم، نیاز به ۱۲۱۵ پنل است. با استفاده از باتری و ذخیره‌سازی انرژی، نصب ۲۰۰ پنل به مدت یک سال (با میانگین ۵ ساعت نور روز در فصول سال و ۶ ساعت در تابستان) می‌تواند ۲۸۹/۸۰۰ کیلووات ساعت انرژی ذخیره کند که معادل ۳۴۱ ساعت عملکرد بحرانی پل است. فضای مورد نیاز برای نصب این پنل‌ها با در نظر گرفتن فاصله‌گذاری حدود ۶۵۰ متر مربع (۶/۵ × ۱۰۰ متر) است و هزینه تامین این تعداد پنل در سال ۱۴۰۴ حدود ۲۴،۰۰۰ دلار برآورد می‌شود (Shenzhen Sole Technology Co., Ltd., 2025).



شکل ۱۷. شماتیک عملکرد مدل ۳ بعدی با دما ۱۰- با لوله‌گذاری طولی و فاصله ۱۰ سانتی لوله‌ها در کامسول

در شکل ۱۷ به صورت ۳ بعدی شبیه‌سازی ۴ متر انتهایی مسیر با شرایط فیزیکی ذکر شده و در شرایط دمایی ۱۰- درجه با وزش باد ۲/۵ متر بر ثانیه صورت گرفته است. مش‌بندی المان‌های سه بعدی نیز به صورت *ULTRA FINE* و به شدت ریزدانه صورت گرفت تا در حد صدم درجه دقت افزایش داشته باشد. جدول نهایی شار و دمای سطح طبق جدول ۷ نگارش گردیده است.

جدول ۷. جدول نهایی شار و دمای سطح در بازه زمانی مشخص

زمان S	میانگین درجه سطح °C	میانگین شار حرارتی سطح W/M ²	زمان S	میانگین درجه سطح °C	میانگین شار حرارتی سطح W/M ²
۰	-۱۰	۶/۰۹E-۰۵	۱۸۰۰	۱/۹۸۷۳	۲۸۴/۹۳
۶۰	-۹/۸۵۹۹	۵/۶۵۲۹	۲۱۰۰	۳/۷۳۲۳	۳۲۶
۳۰۰	-۹/۶۷۹۵	۶/۲۶۸۱	۲۴۰۰	۵/۱۷۹۲	۳۶۰/۰۸
۶۰۰	-۷/۸۶۴۹	۵۴/۲۹۵	۲۷۰۰	۶/۳۶۶۲	۳۸۸/۱۳
۹۰۰	-۵/۱۵۸۲	۱۲۱/۷۸	۳۰۰۰	۷/۳۳۲۷	۴۱۱/۰۶
۱۲۰۰	-۲/۴۷۴۱	۱۸۲/۰۱	۳۳۰۰	۸/۱۱۵۹	۴۳۰/۲۶
۱۵۰۰	-۰/۰۷۸۶۱۸	۲۳۶/۲۳	۳۶۰۰	۸/۷۴۶۶	۴۴۵/۲۲

نتیجه‌گیری

این پژوهش عملکرد حرارتی یک سامانه گرمایش هیدرونیک برای ذوب برف و جلوگیری از یخ‌زدگی سطح پل بتنی پیش‌ساخته را بررسی کرده است. مدل‌سازی عددی دوبعدی گذرا با نرم‌افزار *COMSOL* و با در نظر گرفتن ویژگی‌های حرارتی مصالح، دمای محیط، شرایط مرزی و مشخصات لوله‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که سیستم قادر است در کمتر از ۳۰ دقیقه دمای سطح را از منفی ۱۰ درجه به حدود ۱ درجه سانتی‌گراد برساند. توان گرمایی لازم برای شرایط بارش ۳۰ میلی‌متر برف در ساعت و دمای منفی ۵ درجه، حدود ۸۵۱ کیلووات برآورد شد و تحلیل امکان‌سنجی استفاده از انرژی خورشیدی نشان داد که این توان با حدود ۲۰۰ پنل ۷۰۰ وات در فضایی ۶۵۰ مترمربع برای ۳۴۱ ساعت قابل تأمین است. شبیه‌سازی در شرایط سخت‌گیرانه شامل دمای اولیه ۱۰- درجه سانتی‌گراد با باران و سپس دمای ۵- درجه سانتی‌گراد با بارش برف انجام شد و سیستم در زمان آغاز بارش خاموش فرض شد تا عملکرد آن در مواجهه با شرایط

غافلگیرانه ارزیابی گردد. تحلیل‌ها نشان داد که سامانه می‌تواند به سرعت دمای سطح را به محدوده ایمن برساند و عملکرد مؤثری داشته باشد. نوآوری اصلی پژوهش در ترکیب تحلیل عددی، مصرف انرژی و سناریوی استفاده از انرژی خورشیدی در شرایط اقلیمی ایران است و می‌تواند پایه‌ای برای تدوین دستورالعمل‌های بومی برای مقابله با یخبندان در زیرساخت‌های شهری باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

سینا مطهری: مطالعه، تهیه پیش‌نویس و ویرایش مقاله، جمع‌آوری داده‌ها، انجام محاسبات، مدل‌سازی در نرم‌افزار، تحلیل و تفسیر اطلاعات، علی علوی نائینی: استاد پژوهش، طراحی و نظارت بر مراحل پژوهش.

تعارض منافع

بر اساس اظهار نویسندگان، این مقاله هیچ تعارض منافی ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بدین‌وسیله اعلام می‌دارند که از ابزار هوش مصنوعی ChatGPT (GPT-5, OpenAI) برای ترجمه این مقاله استفاده کرده‌اند. تمام محتوای تولید یا ویرایش‌شده توسط هوش مصنوعی توسط نویسندگان به‌دقت بررسی، راستی‌آزمایی و تأیید شده و مسئولیت نهایی تمام مطالب مقاله صرفاً بر عهده نویسندگان است.

منابع

- آزادی سمرغاوه، احمد؛ محمودی‌نیا، میثم؛ قریشی، سید علیرضا؛ سلطانی، محمد، و سادات کبیری، فرشته (۱۴۰۳). تأثیر یخزدایی معابر با نمک بر گیاهان و فضای سبز شهری؛ چالش‌ها، راهکارها و مواد جایگزین، هشتمین کنگره سالانه بین‌المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط‌زیست و گردشگری ایران، <https://civilica.com/doc/2194624/>
- نوروزی، نعمت؛ امین، رضا، و خدائی، علی (۱۴۰۳). ارزیابی اثرات مخرب وجود نمک روی روسازی آسفالتی و مروری بر راهکارهای نوینی جلوگیری از ایجاد یخ و یخ‌زدایی بر روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها. نشریه عمران و پروژه، ۶(۶)، ۱۹۵۸۹۹. <https://doi.org/10.22034/cpj.2024.456031.1286>
- فروشگاه اینترنتی GKN کالا. (۱۴۰۴). لوله پنج‌لایه PEX-AL-PEX برند <https://gknkala.ir> MPJ.
- فرج‌وند، س. (۱۴۰۲، ۱۰ دی). اینجا کارگاه؛ پل مجهز به سیستم یخ‌زدایی خودکار [گزارش تصویری]. *آژانس عکس تهران*، مرکز ارتباطات و امور بین‌الملل شهرداری تهران. <https://www.tehranpicture.ir>

References

- Adl-Zarrabi, B., Gehlin, S., Van den Bergh, W., Cetin, A., & Staudacher, L. (2023). Ground source de-icing and snow melting systems for infrastructure. *Transportation Research Procedia*, 69, 558–565. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.633>
- Adl-Zarrabi, B., Mirzanamadi, R., & Johnsson, J. (2016). Hydronic pavement heating for sustainable ice-free roads. *Transportation Research Procedia*, 14, 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.336>
- Ahmed, A., Conti, F., Schießl-Widera, M., & Goldbrunner, M. (2023). CFD-based sensitivity-analysis and performance investigation of a hydronic road-heating system. *Energies*, 16(5), 2173. <https://doi.org/10.3390/en16052173>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2020). *ASHRAE handbook: HVAC systems and equipment*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>
- Armalit. (2025). Composite mesh Armalit_BASE. https://armalitas.com/en/product-category/composite-reinforcing-mesh-armalit_base/
- Azadi Samarghaveh, A., Mahmoudi Nia, M., Qureshi, S. A., Soltani, M., & Kabiri, F. S. (2024). The impact of road de-icing with salt on urban plants and green spaces: Challenges, solutions, and alternative materials. *Proceedings of the 8th Annual International Congress on Agricultural Development, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran*. <https://civilica.com/doc/2194624/>
- Biondi, A., Buscemi, A., Bonomolo, M., Guarino, S., & Di Liberto, M. (2026). Study of a road thermal collector prototype: Mathematical model, numerical simulations and experimental validation. *Energy Conversion and Management: X*, 30, 101736. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101736>
- Chartered Institution of Building Services Engineers. (2019). *CIBSE guide B1: Heating*. CIBSE. <https://www.cibse.org/knowledge-research/guides/guide-b1-heating>
- Dempsey, B. J., & Spitler, J. D. (1984). Thermal properties of asphalt concrete. *Transportation Research Record*, 968, 1–9. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1984/968/968-005.pdf>
- Farajvand, S. (2023, December 31). *Here is the workshop: A bridge equipped with an automatic de-icing system* [Photo report]. Tehran Picture Agency, Tehran Municipality. <https://www.tehranpicture.ir/> [In Persian]
- Fay, L., & Shi, X. (2012). Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: State of the knowledge. *Transportation Research Board*. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-1064-6>
- Gerlich, V., Sulovská, K., & Zálesák, M. (2013). COMSOL Multiphysics validation as simulation software for heat transfer calculation in buildings: Building simulation software validation. *Measurement*, 46(6), 2003–2012. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.02.020>
- Graves, R. L., & Reavis, P. L. (2015). *Use of power plant waste heat for pavement heating in Michigan (Technical Report)*. Michigan Department of Transportation. <https://www.michigan.gov/mdot>
- Helsingin Energia. (2013). *Decentralized district heating and cooling: Summary*. District Energy Awards. districtenergyaward.org
- Howard, T. K., Jain, P., & Popov, E. (2019). Verification and validation of COMSOL for heat transfer in thin rectangular channels using NACA test results. In *Proceedings of the 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH 2019)* (pp. 3598–3611). American Nuclear Society. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1560466>
- IES Ltd. (2021). *IES VE Material Database – Integrated Environmental Solutions*. iesve.com
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2006). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). Wiley. <https://hyominsite.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition.pdf>
- Islam, M. S., Fukuhara, T., Watanabe, H., & Nakamura, A. (2006). Horizontal U-tube road heating system using tunnel ground heat. *Journal of Snow Engineering of Japan*, 22(3), 229–234. <https://doi.org/10.4106/jsse.22.229>
- Jin, M., & McBroom, D. G. (2024). Investigating road ice formation mechanisms using road weather information system (RWIS) observations. *Climate*, 12(5), 63. <https://doi.org/10.3390/cli12050063>
- Johnson, C. (2001). I-35W and Mississippi River Bridge anti-icing project operational evaluation report (Report No. 2001-22). Minnesota Department of Transportation. <https://hdl.handle.net/20.500.14153/mndot.2437>
- Liu, J., Xu, K., Chen, Z., Peng, W., & Wei, L. (2025). Optimization and analysis of electrical heating ice-melting asphalt pavement models. *Energies*, 18(9), 2207. <https://doi.org/10.3390/en18092207>
- Loubani, R., Defer, D., Alhaj-Hasan, O., & Chamoin, J. (2025). Optimization of hydronic heating system in a commercial building: Application of predictive control with limited data. *Energies*, 18(9), 2260. <https://doi.org/10.3390/en18092260>
- Jinan Zhengtang Insulation Decoration Material Co., Ltd. (n.d.). *PU foam composite thermal insulation sandwich panel*. Made-in-China.com. <https://insulated-panels.en.made-in-china.com/product/aSGQiIpwVRrP/China-PU-Foam-Composite-Thermal-Insulation-Sandwich-Panel.html>

- Mirzanimadi, R., Hagentoft, C. E., & Johansson, P. (2020). Coupling a hydronic heating pavement to a horizontal ground heat exchanger for harvesting solar energy and heating road surfaces. *Renewable Energy*, 147, 447–463. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.107>
- Nawroozi, N., Amin, R., & Khodaii, A. (2024). Evaluating the Destructive Effects of Salt on Asphalt Pavement and Reviewing Modern Solutions for Preventing Ice Formation and De-icing on Road and Airport Pavements. (e195899). *Civil and Project Journal*, 6(6), e195899. <https://doi.org/10.22034/cpj.2024.456031.1286> [in Persian]
- Nordell, B., & Sköldbberg, H. (2005). HERO – Heating Roads with Solar Energy Stored in the Ground. *International Energy Agency – Energy Conservation through Energy Storage (IEA ECES) Annex 10 / Task 38 Report*. Luleå University of Technology, Sweden. <https://iea-ec.es.org>
- Poulsen, S. E., Nielsen, K. B., & Tordrup, K. W. (2024). The Thermoroad—Full-scale demonstration of geothermal 5th generation district heating and cooling combined with sustainable urban drainage. *EGU General Assembly 2024*, EGU24-15138. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-15138>
- Shenzhen Sole Technology Co., Ltd. (2025). 700 watt monocrystalline solar panel with 132 cells solar cell for home system large power solar panel 700W paneles solares. Made-in-China.com. [Made-in-China product page](#)
- Szklarek, S., Górecka, A., & Wojtal-Frankiewicz, A. (2021). The effects of road salt on freshwater ecosystems and solutions for mitigating chloride pollution: A review. *Science of The Total Environment*, 771, 150289. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150289>
- Zhao, W., Zhang, Y., Li, L., Su, W., Li, B., & Fu, Z. (2020). Snow melting on the road surface driven by a geothermal system in the severely cold region of China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100781>
- GKNKALA Online Store. (1404). MPJ brand PEX-AL-PEX five-layer pipe. <https://gknkala.ir/>