



Experimental and Theoretical Investigation of Flow Rate Effect on Dynamic and Efficiency of Asphalt Solar Collector in Real Operating Condition

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Farzan H. ^{*1} PhD,
Jaafarian S.M.¹ PhD,
Ameri M.² PhD

How to cite this article

Farzan H, Jaafarian S.M, Ameri M. Experimental and Theoretical Investigation of Flow Rate Effect on Dynamic and Efficiency of Asphalt Solar Collector in Real Operating Condition. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1271-1282.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Higher Educational Complex of Bam, Bam, Iran

²Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Higher Educational Complex of Bam, Bam, Iran
Phone: +98 (34) 44215868
Fax: +98 (34) 44215868
hadi.farzan@bam.ac.ir

Article History

Received: June 02, 2019

Accepted: November 29, 2019

ePublished: May 09, 2020

ABSTRACT

The asphalt pavements are exposed to daily solar radiation; hence the asphalt pavements provide the remarkable potential to heat a working fluid such as water. Simple structure and ease of fabrication of asphalt solar collectors (ASCs) promise applicability and low-cost operation of this class of thermal collectors. The current experimental and theoretical investigation evaluates the performance, efficiency and dynamic of ASCs in real operating condition at Bam County, Kerman. In this research, to investigate the performance of ASCs, a 1.2m² prototype was fabricated and its dynamics was monitored under 6 hours a day in two different flow rates of water. The results illustrate that increasing the flow rate of water to collector by 2 times improves the collector efficiency by 25%, while the difference in the inlet and outlet water temperatures decreases. Furthermore, by utilizing the experimental data, a theoretical approach was utilized to predict the performance of ASC in the other flow rates of water. The developed analytic approach has good consistency with the obtained experimental test. The analytic approach provides an effective method to estimate the performance of ASCs with appropriate accuracy, when the experimental results are unavailable.

Keywords Asphalt Collector; Flow Rate; Thermal Efficiency; Solar Energy

CITATION LINKS

[1] Energy, exergy, economic, environmental (4E) analyses of a solar organic Rankine cycle to produce combined heat and ... [2] Fabrication and thermal modeling of unglazed transpired solar air heater collectors with metallic (steel) and non-metallic absorber ... [3] Direct steam generation solar power plant in the two pressures ... [4] Performance evaluation of the senergy polycarbonate and asphalt carbon nanotube solar water heating collectors for building ... [5] A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow ... [6] Concrete solar collectors for façade integration: An experimental and numerical ... [7] Study of ice and snow melting process on conductive asphalt solar ... [8] Effectiveness of pavement-solar energy system-An experimental ... [9] A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test ... [10] A CFD analysis of several design parameters of a road pavement solar collector ... [11] Influence of urban form on the performance of road pavement solar collector system: Symmetrical and asymmetrical ... [12] A novel strategy of inducing solar absorption and accelerating heat release for cooling asphalt ... [13] Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban ... [14] Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale ... [15] Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar ... [16] How to transform an asphalt concrete pavement into a solar ... [17] Performance of a pavement solar energy collector: Model development ... [18] 3D numerical modelling and experimental validation of an asphalt solar ... [19] Experimental validation of 2D hydrothermal modelling of porous pavement for ... [20] Investigation of heat-collecting properties of asphalt pavement as solar collector by a three-dimensional ... [21] Numerical investigation of harvesting solar energy and anti-icing road surfaces using a hydronic heating pavement and borehole thermal energy ... [22] A study of the impact of building geometry on the thermal performance of road pavement solar ... [23] Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications-A comprehensive ... [24] Modeling snow melting on heated pavement ... [25] Capturing solar energy from asphalt ... [26] Evaluation of the potential of harvesting heat energy from asphalt ... [27] Introduction to heat ... [28] Solar energy ... [29] Describing uncertainty in single-sample

مطالعه تجربی و تحلیلی اثر دبی جریان بر رفتار دینامیکی و راندمان کلکتور آسفالت در شرایط عملیاتی واقعی

هادی فرزنان* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران

سیدمحمد جعفریان PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران

مهران عامری PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

دمای آسفالت در اثر تابش خورشید افزایش می‌یابد و در طول روز اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین دمای هوای محیط پیرامون و دمای آسفالت شکل می‌گیرد و این اختلاف دما پتانسیل مناسبی برای گرم کردن سیال عامل مانند آب فراهم می‌کند. کلکتورهای آسفالت در کنار ساختار بسیار ساده، امکان استفاده از این پتانسیل را فراهم کرده‌اند. مطالعه تجربی و تحلیلی حاضر پاسخ دینامیکی و راندمان کلکتور آسفالت را در شرایط عملیاتی در شهرستان بم، کرمان مورد مطالعه قرار داده است. در مطالعه حاضر با طراحی و ساخت یک کلکتور آسفالت با مساحت $1/2 \text{ m}^2$ و پایش پارامترهای موثر مانند شدت تابش و درجه حرارت ورودی و خروجی از کلکتور به مدت ۶ ساعت از روز عملکرد این دسته از کلکتورها بررسی شده است. مطالعه اخیر نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان ورودی به کلکتور به میزان دو برابر، راندمان کلکتور به مقدار متوسط ۲۵٪ افزایش می‌یابد در حالی که اختلاف دماهای ورودی و خروجی رو به کاهش می‌گذارد. از طرفی با بهره‌گیری از نتایج تجربی در رویکرد تحلیلی راندمان حرارتی برای سایر دبی‌ها در محدوده رژیم جریان آرام پیش‌بینی شده است. نتایج به دست آمده از رویکرد تحلیلی با دقت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. استفاده از روش تحلیلی راهکاری مناسب برای تخمین کارایی کلکتور در مواقعی که نتایج تجربی در دسترس نیست، در اختیار می‌گذارد.

کلیدواژه‌ها: کلکتور آسفالت، دبی جریان، راندمان حرارتی، انرژی خورشیدی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۸

*نویسنده مسئول: hadi.farzan@bam.ac.ir

۱- مقدمه

انرژی خورشید به عنوان فراوان‌ترین منبع انرژی تجدید پذیر، سهم قابل توجهی در بهره‌برداری و توسعه فناوری‌های نوین برای استخراج منابع انرژی تجدید پذیر در سراسر جهان داشته است. جهت استحصال انرژی خورشیدی رویکردهای متنوعی در دهه‌های پیشین ارایه شده است، که بهره‌برداری از کلکتورهای خورشیدی از مطمئن‌ترین این روش‌ها است [۱-۳]. رشد تکنولوژی سبب شکل گرفتن ایده استفاده از سازه‌های موجود برای جذب و انتقال انرژی به عنوان یک کلکتور شده است. این رویکرد هزینه اولیه ساخت و بهره‌برداری از انرژی خورشید را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد.

بهره‌برداری از سطوح آسفالت یا بتون برای جذب انرژی در مرکز این بررسی‌ها بوده است [۴-۶]. کلکتور آسفالت از سطوح آسفالت به همراه لوله‌های فلزی یا غیرفلزی دفن شده در عمق آسفالت تشکیل شده است. گردش آب در میان آسفالت با دمای بالا سبب انتقال انرژی جذب شده توسط آسفالت به آب و افزایش دمای آب می‌شود. این انتقال انرژی سبب کاهش دمای سطح و عمق آسفالت می‌شود که این کاهش دما به نوبه خود به‌ویژه در فصول گرم سال عمر آسفالت را افزایش خواهد داد [۷]. کلکتورهای خورشیدی آسفالت ابتدا با هدف یخ‌زدایی از سطح آسفالت پیشنهاد شدند. به علت اینکه راه‌کارهای مکانیکی قدیمی رایج برای یخ‌زدایی در فصول سرد سبب تخریب سطح آسفالت و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات مکانیکی می‌شوند [۵، ۷، ۸].

با توجه به ساختار ساده و کارآمد کلکتورهای آسفالت، مطالعات گسترده‌ای بر روی این دسته از کلکتورها صورت گرفته است. مطالعات انجام گرفته را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول به مطالعه اثر کاهش دمای آسفالت بر عمر آن، کاهش تنش‌های حرارتی و تقلیل اثر جزیره گرمایی شهری در محیط‌های شهری با استفاده از کلکتور آسفالت می‌پردازد [۹-۱۲]. این دسته از مطالعات بر راه‌کارهای موجود برای بهبود انتقال حرارت، توزیع بهتر دما و جلوگیری از انباشت حرارت در لایه‌های میانی آسفالت به واسطه گردش سیال عامل در شبکه لوله دفنی توجه دارند. در حالی که، هدف دسته دوم مطالعه راندمان کلکتورهای آسفالت و اثر پارامترهای تاثیرگذار مانند قطر، طول و جنس لوله بر روی راندمان کلکتورها است. از مطالعات دسته اول می‌توان به تحقیق پن و همکاران [۵] اشاره کرد. این محققان اثر استفاده از کلکتور آسفالت جهت جلوگیری از انباشت حرارت در آسفالت و تقلیل اثر جزیره گرمایی را بررسی کرده‌اند. نصیر و همکاران در یک شبیه‌سازی عددی اثر پارامترهای متعدد طراحی مانند لوله و دبی جریان را بر روی کلکتورهای آسفالت در محیط‌های شهری و روستایی مطالعه کردند [۱۰]. چیارلی و همکاران نحوه چینش و ترکیب‌بندی لوله‌ها در کلکتورهای آسفالت هوایی را مطالعه نمودند [۱۳]. در دسته دوم پژوهش‌ها که بیشتر مورد توجه مطالعه حاضر است می‌توان از تحقیق شاپینگ و همکاران نام برد [۱۴]. آنها با مطالعه یک کلکتور آسفالت در مقیاس کوچک در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده اثر دبی جریان و دمای اولیه سیال عامل را بر پاسخ حرارتی نمونه آزمایشگاهی کلکتور آسفالت بررسی کردند. پاسکال/مونوز و همکاران [۱۵] استفاده از لایه با نفوذپذیری بالا را به جای استفاده از شبکه لوله دفنی برای سیال عامل را پیشنهاد دادند. در پژوهشی دیگر استفاده از هوای گرم خروجی از کلکتور آسفالت برای راه‌اندازی یک توربین خورشیدی پیشنهاد شده است [۱۶]. توسعه یک مدل عددی کارآمد یکی از راه‌کارهای ارزان برای مطالعه و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر راندمان و پاسخ حرارتی کلکتورهای آسفالت است. در این راستا مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی برای شبیه‌سازی کلکتور آسفالت پیشنهاد شده است [۱۷].

مناسبی پیش بینی گردد. با بهره‌گیری از رویکرد تحلیلی در کنار داده‌های تجربی رفتار کلکتور در سایر دبی‌های حجمی با دقت مناسبی پیش بینی شده است.

۲- روش‌ها

۲-۱ روش مطالعه تجربی

بستر آزمایش در مطالعه حاضر از یک قاب چوبی با ابعاد داخلی $3m \times 0.4m \times 0.2m$ ساخته شده است. قاب چوبی به دلیل ضریب پایین انتقال حرارت مانع انتقال حرارت آسفالت گرم با محیط سرد بیرون است. آسفالت سرد مورد استفاده در ساخت کلکتور ماده‌ای ترکیبی است که از مخلوط سنگدانه با حداکثر اندازه 10 میلی‌متر با قیر $MC-3000$ ساخته می‌شود. آسفالت سردی که در ساخت بستر آزمایش استفاده شده است از همان نوعی است که به‌صورت متداول برای ساخت و تعمیر سطوح شهری استفاده می‌شود. برای ساخت شبکه لوله از لوله‌های گالوانیزه به قطر داخلی 15 میلی‌متر استفاده شده است که در دو گذر به طول کلی $12m$ به انتقال آب در درون آسفالت می‌پردازد. فاصله هر ردیف لوله از ردیف کناری (فاصله مرکز لوله تا مرکز لوله مجاور) 11 سانتی‌متر است. شبکه لوله در عمق 4 سانتی‌متر از سطح خارجی آسفالت دفن شده است. تعیین عمق بهینه برای دفن شبکه لوله براساس مطالعات [14, 17, 25, 26] صورت پذیرفته است. مشخصات هندسی کلکتور آسفالت طراحی و ساخته شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) مشخصات هندسی کلکتور آسفالت مورد مطالعه

مشخصه	اندازه
طول کلکتور	3 متر
عرض کلکتور	0.4 متر
مساحت کلکتور	1.2 مترمربع
تعداد گذر	2
طول هر گذر	6 متر
عمق دفن لوله	4 سانتی‌متر
جنس لوله	گالوانیزه
قطر لوله	15 میلی‌متر
فاصله عرضی هر ردیف لوله	11 سانتی‌متر

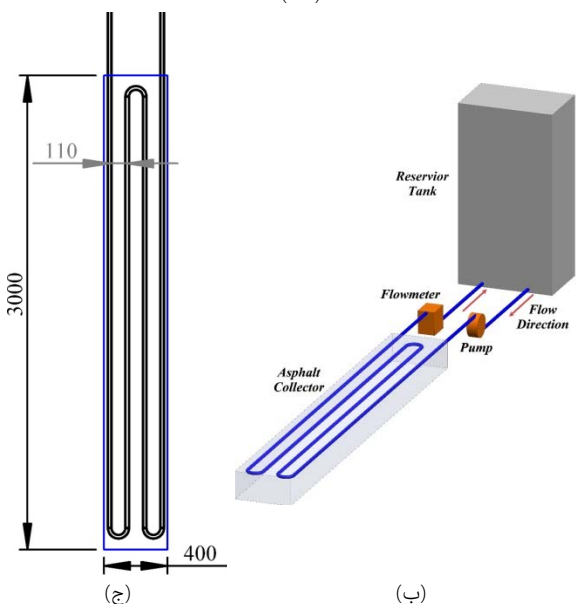
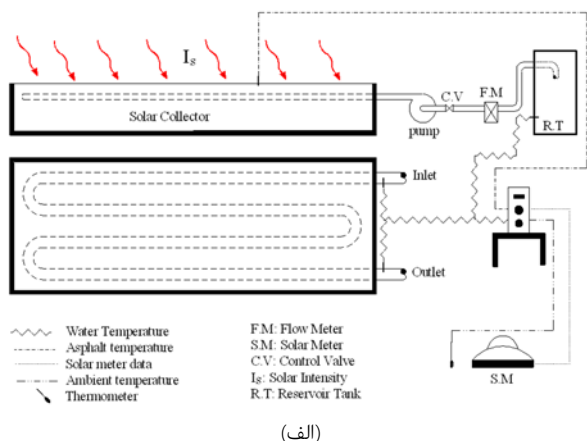
سیال عامل جهت گردش در شبکه لوله و انتقال انرژی، آب است. گردش آب از طریق پمپ سیرکولاسیون (Circulation) به قدرت $5HP$ میسر می‌شود. آب به وسیله پمپ از کف مخزن ذخیره 100 لیتر به داخل شبکه لوله ارسال می‌شود و جریان ایجاد شده در شبکه لوله بعد از طی مسیر در دو گذر لوله مجدداً از بالای مخزن ذخیره به آن وارد می‌شود. مکان در نظر گرفته شده برای ساخت و نصب بستر آزمایش به نحوی در نظر گرفته شده است که در تمام مدت روز سایه بر روی کلکتور ایجاد نگردد و کارکرد کلکتور تحت تاثیر سایه قرار نگیرد. شکل ۱، طرح‌واره کلکتور آسفالت مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

[21]. در پژوهشی دیگر با استفاده از شبیه‌سازی عددی، اثر ساختمان‌های مجاور بر راندمان و بازدهی حرارتی کلکتورهای آسفالت در محیط‌های شهری بررسی شده است [22]. ونگ و همکاران [23] تکنولوژی‌های موجود و کاربری هر یک از آنها برای استحصال انرژی از کلکتورهای آسفالت را به دقت دسته‌بندی کردند.

اکثر تحقیقات قبلی بر روی کلکتورهای آسفالت به وسیله مدلسازی عددی و توسعه مدل ریاضی برای بررسی اثر پارامترهای موثر بر رفتار حرارتی و بازده این دسته از کلکتورهای خورشیدی متمرکز بوده است [17-19, 21, 24]. در حالی که پژوهش‌های تجربی در شرایط ویژه و کنترل شده آزمایشگاهی انجام پذیرفته است [4, 14, 16]. در مطالعه‌ای که توسط آونسو-استبانز و همکاران [18] صورت گرفته است، اثر دبی جریان بر راندمان کلکتور آسفالت مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه عددی و تجربی که در شرایط آزمایشگاهی با شار حرارتی ثابت و شرایط محیطی کنترل شده انجام پذیرفته شده است، اثر دبی جریان بر رفتار و کارایی کلکتور آسفالت بررسی شده است. در این مطالعه نشان داده شده است با افزایش دبی جریان، اختلاف درجه حرارت جریان در ورودی و خروجی کاهش و راندمان کلکتور افزایش می‌یابد. در اغلب تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی کلکتورهای آسفالت لامپ‌های فروسرخ با تابش یکنواخت برای مدلسازی تابش خورشید استفاده شده است و آزمایش در شرایط عملیاتی واقعی با شدت تابش متغیر انجام نشده است. از دیگر پارامترهای موثر در مدت آزمایش، دمای هوای پیرامون است که راندمان کلکتور را به میزان زیادی تحت تاثیر قرار می‌دهد. این فاکتور در شرایط عملیاتی واقعی به‌طور پیوسته در طول روز تغییر می‌کند در حالی که در مطالعات تجربی پیشین به واسطه انجام آزمایش در شرایط کنترل شده، دمای محیط پیرامون مقداری ثابت نگه داشته شده است. علاوه بر مورد ذکر شده، کلکتورهای آسفالت بررسی شده دارای مقیاس بسیار کوچکی هستند و آزمایش در بازه‌های زمانی کوتاهی صورت گرفته است.

در مطالعه حاضر، رفتار حرارتی کلکتور آسفالت در شرایط عملیاتی واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام پژوهش حاضر یک کلکتور آسفالت با ابعاد $3m \times 0.4m$ در مدت زمان 6 ساعت از روز در شرایط عملیاتی واقعی بررسی شده است و اثر دبی جریان بر دما و بازده حرارتی کلکتور آسفالت مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه تجربی، اثر دو دبی متفاوت سیال عامل بر رفتار حرارتی کلکتور بررسی شده است. در نهایت راندمان کلکتور برای دبی‌های مختلف در طول مدت آزمایش مقایسه شده است. از دیگر نوآوری‌های موجود در این مطالعه تعیین راه‌کاری برای پیش بینی راندمان کلکتور آسفالت در سایر دبی‌های حجمی است. از آنجا که تعیین راندمان کلکتور در گستره وسیعی از دبی‌های حجمی به روش تجربی امکان پذیر نیست، رویکرد تحلیلی راه‌کاری در اختیار می‌گذارد که عملکرد کلکتور در سایر دبی‌های حجمی با دقت

آزمایش با استفاده از تنظیم شیر متصل به پمپ به نحوی تعیین می‌گردد که دبی مورد نظر در طی مدت انجام آزمایش ثابت باشد.



شکل ۱ الف طرح‌واره دوبعدی، ب سه‌بعدی بستر آزمایش مورد مطالعه، ج ابعاد کلکتور آسفالت

جدول ۲) جدول شماره، نوع و متغیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر مورد استفاده در بستر آزمایش

شماره حسگر	نوع حسگر	متغیر اندازه‌گیری شده
حسگر ۱	مقاومت حرارتی متغیر با ضریب حرارتی منفی	دمای آب ورودی به کلکتور
حسگر ۲	مقاومت حرارتی متغیر با ضریب حرارتی منفی	دمای آب خروجی از کلکتور
حسگر ۳	مقاومت حرارتی متغیر با ضریب حرارتی منفی	دمای آب مخزن ذخیره آب
حسگر ۴	مقاومت حرارتی متغیر با ضریب حرارتی منفی	دمای سطح آسفالت
حسگر ۵	مقاومت حرارتی متغیر با ضریب حرارتی منفی	دمای عمق آسفالت در محل دفن شبکه لوله
حسگر ۶	مقاومت حرارتی متغیر با ضریب حرارتی منفی	دمای هوای پیرامون
حسگر ۷	کیپ‌اندزونن CMP3	شدت تابش آفتاب

برای بررسی راندمان و عملکرد کلکتور آسفالت حسگرهای متعددی در نقاط مختلف بستر آزمایش نصب شده است. برای اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات دما، از ۶ حسگر دما به‌ترتیب برای اندازه‌گیری دمای آب ورودی به کلکتور، دمای آب خروجی از کلکتور، دمای آب مخزن ذخیره، دمای هوای محیط، دمای سطح آسفالت و دمای عمق دفن شبکه لوله در آسفالت استفاده شده است. حسگرهای دما از نوع مقاومت حرارتی متغیر با ضریب حرارتی منفی هستند. حسگرهای مقاومت حرارتی از لحاظ عملکرد به دو دسته مقاومت حرارتی با ضریب حرارتی منفی و مثبت تقسیم‌بندی می‌شوند. در نوع حسگر مقاومت حرارتی با ضریب حرارتی منفی، مقدار مقاومت الکتریکی با افزایش درجه حرارت عملکرد کاهش می‌یابد. پاسخ منفی بزرگ یک حسگر مقاومت حرارتی به این معنا است که حتی یک تغییر کوچک دمایی می‌تواند تغییرات بزرگی در مقاومت الکتریکی آن ایجاد کند. این ویژگی سبب می‌شود، این حسگرها به گزینه مناسبی برای اندازه‌گیری درجه حرارت تبدیل شوند. یک مشخصه مهم حسگرهای مقاومت حرارتی، مقدار ثابت B_{T_1/T_2} است. این ثابت نشان دهنده شیب منحنی مقاومت برحسب دما در یک محدوده دمایی خاص بین دو نقطه، T_1 و T_2 ، را توصیف می‌کند. رابطه (۱)، ارتباط B_{T_1/T_2} ، محدوده دمایی و تغییرات مقاومت الکتریکی را بیان می‌کند:

$$B_{T_1/T_2} = \frac{T_2 \times T_1}{T_2 - T_1} \times \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱) دما، T ، برحسب کلوین و مقاومت حرارتی، R ، برحسب اهم است. مقدار B_{T_1/T_2} یک حسگر مقاومت حرارتی از اطلاعات شرکت سازنده آن حسگر استخراج می‌شود. مقدار ثابت B_{T_1/T_2} برای حسگر دمایی مورد استفاده در مطالعه حاضر براساس اطلاعات شرکت اپکوس (EPCOS) برابر ۴۳۰۰ است.

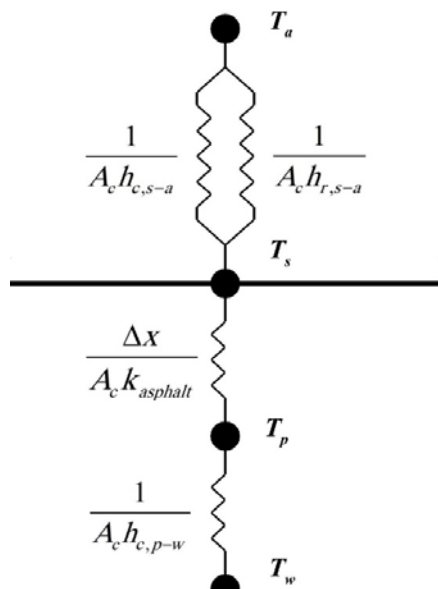
از دیگر پارامترهای حیاتی برای تعیین راندمان و عملکرد کلکتور آسفالت، میزان تابش فرودی بر روی سطح آسفالت است. برای اندازه‌گیری میزان تابش فرودی از حسگر تابش‌سنج (Pyranometer) CMP3 محصول شرکت کیپ‌اندزونن (Kipp&Zonen) استفاده شده است. دبی سیال عامل در بستر آزمایش به وسیله یک کنتور خانگی آب با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ لیتر بر ساعت اندازه‌گیری می‌شود. تمامی حسگرها به دستگاه ثبت‌کننده داده‌ها (Data Acquisition) متصل شده‌اند و تمامی داده‌های برداشت شده در حین آزمایش از طریق کابل رابط برای ثبت و ذخیره به کامپیوتر منتقل می‌شوند. زمان در نظر گرفته شده برای داده‌برداری از پارامترهای مورد بررسی در آزمایش اثنایه است. در جدول ۲ مشخصات و شماره حسگرهای مورد استفاده در بستر آزمایش آورده شده است.

آزمایش کلکتور آسفالت در شرایط محیطی شهرستان بم به مدت ۱۲۰ روز برای دبی‌های ۶ لیتر بر ساعت و ۱۲ لیتر بر ساعت انجام پذیرفته است. جریان آب برای بررسی عملکرد کلکتور برای مدت ۶ ساعت به‌طور پیوسته از ۹:۳۰ صبح الی ۳:۳۰ بعدازظهر به‌ازای یک دبی مشخص در روز برقرار است. میزان دبی جریان در ابتدای

بخش کوچکی از انرژی تابشی فرودی به سطح بعد از برخورد به سطح کلکتور بازتاب می‌شود در حالی که به علت ضریب جذب بالای آسفالت بخش بزرگی از تابش فرودی جذب سطح می‌گردد. انرژی جذب شده سبب افزایش دمای آسفالت می‌شود و سطح گرم شده آسفالت با استفاده از مکانیزم جابجایی با محیط پیرامون تبادل انرژی انجام می‌دهد. بخش باقی‌مانده از انرژی جذب شده از راه هدایت به شبکه لوله دفن شده در عمق آسفالت می‌رسد و گرمای جذب شده را به شبکه لوله و سیال عامل در حال حرکت در آن منتقل می‌کند. رابطه ۲ موازنه انرژی برای سطح کلکتور آسفالت را بیان می‌کند.

$$q_{rad,solar} = q_{rad,thermal} + q_{conv} + q_{cond} \quad (2)$$

شار تابشی ساطع شده از سطح کلکتور، $q_{rad,thermal}$ ، به نوبه خود شامل دو مولفه است. این دو مولفه عبارت است از شار حرارتی ناشی از بازتاب حرارت فرودی به سطح و شار حرارتی ناشی از توان گسیل سطح. برای ایجاد درک بهتر از اثرگذاری هر یک از مکانیزم‌های انتقال حرارت در آنالیز حرارتی کلکتور آسفالت نیاز است که تقریبی از مقاومت حرارتی معادل هر یک از آنها محاسبه شود. شکل ۴ مدار معادل حرارتی برای کلکتور را نشان می‌دهد. مدار معادل گرمایی جریان حرارت در آسفالت شامل مقاومت هدایت حرارتی آسفالت و مقاومت جابجایی جریان آب در لوله است. خواص حرارتی اجزای سازنده کلکتور آسفالت در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴) مدار معادل حرارتی کلکتور آسفالت

جدول ۳) خواص حرارتی اجزای سازنده کلکتور آسفالت

آب	لوله	آسفالت	اجزای کلکتور آسفالت
۰/۶۱۴	۱۶/۲	۱	$k(W/m.K)$
۴۱۸۷	۵۰۰	۱۴۸۵	$c_p(J/kg.K)$
۹۹۹	۸۴۰۰	۲۴۵۰	$\rho(kg/m^3)$
-	-	۰/۹۵	ϵ

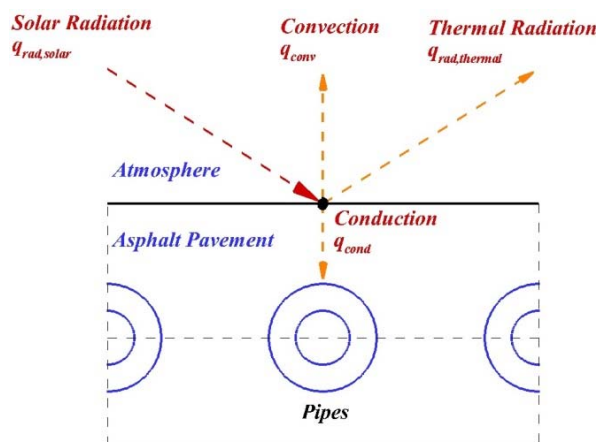


شکل ۲) اجزای کلکتور آسفالت طراحی و ساخته شده

۲-۲- روش مطالعه تحلیلی

از آنجا که طراحی و اجرای روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی و مطالعه اثر یک پارامتر امری زمان‌گیر و پرهزینه است، استفاده از روش تحلیلی پیشنهاد می‌گردد. در مطالعه تجربی حاضر، هدف ارزیابی عملکرد، راندمان و پاسخ حرارتی کلکتور است. از آنجا که در روند ارزیابی اثر دبی‌های مختلف، امکان بررسی شمار محدودی از دبی‌ها وجود دارد، مطالعه تحلیلی امکان گسترده‌ای برای مطالعه اثر دبی و پیش‌بینی راندمان کلکتور در سایر دبی‌های حجمی در اختیار می‌گذارد.

برای آنالیز کلکتور آسفالت با رویکرد تحلیلی در ابتدا نیاز به ایجاد یک مدل حرارتی از کلکتور آسفالت است. برای ایجاد مدل مد نظر توزیع درجه حرارت در لایه‌های افقی به صورت یکنواخت فرض شده است، بنابراین انتقال حرارت به شکل یک بعدی در راستای عمودی (ارتفاع کلکتور) انجام می‌گیرد. شکل ۳ طرح‌واره موازنه انرژی بر روی سطح بالایی کلکتور آسفالت را نشان می‌دهد.



شکل ۳) طرح‌واره موازنه انرژی تابشی فرودی به سطح کلکتور آسفالت مورد بررسی

می‌توان با استفاده از مقادیر U_L و F_R و از رابطه ۷ به‌دست آورد [28]:

$$Q_u = A_c F_R [G\alpha - U_L (T_i - T_a)] \quad (۷)$$

در رابطه ۷، A_c و Q_u به‌ترتیب مقدار سطح کلکتور و انرژی مفید جذب شده است. در حالی که T_i دمای سیال ورودی به کلکتور است. راندمان کلکتور از دیگر پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد کلکتور است. راندمان کلکتور آسفالت به‌صورت انرژی مفید جذب شده به انرژی ورودی به سطح کلکتور تعریف می‌گردد. راندمان حرارتی کلکتور به وسیله رابطه ۸ محاسبه می‌شود [28]:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} = F_R \alpha - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G} \right) \quad (۸)$$

رابطه ۸ نشان دهنده یک خط با عرض از مبدا $F_R \alpha$ و شیب $F_R U_L$ است. تابع راندمان به‌دست‌آمده را می‌توان برحسب تغییرات متغیر $\left(\frac{T_i - T_a}{G} \right)$ رسم کرد. در واقع عبارت $\left(\frac{T_i - T_a}{G} \right)$ ، منعکس‌کننده میزان اتلاف حرارتی از سطح جاذب کلکتور است.

در روش تحلیلی ارایه شده در این مطالعه هدف ایجاد راه‌کاری برای تخمین ضریب برداشت حرارت و مقدار مفید حرارت جذب شده برای سایر دبی‌ها است. بنابراین برای نیل به این هدف بایستی مقدار ضریب برداشت حرارت را به مقدار دبی ورودی به کلکتور ارتباط داد. کالوگریو ارتباط بین ضریب برداشت حرارت و دبی جرمی ورودی به کلکتور را به شکل رابطه ۹ پیشنهاد داد [28]:

$$r = \frac{F_R U_L |_{use}}{F_R U_L |_{test}} = \frac{\frac{\dot{m} c_p}{A_c F U_L} [1 - \exp(-\frac{A_c F U_L}{\dot{m} c_p})] |_{use}}{\frac{\dot{m} c_p}{A_c F U_L} [1 - \exp(-\frac{A_c F U_L}{\dot{m} c_p})] |_{test}} \quad (۹-الف)$$

با ساده‌سازی معادله (۹-الف)، رابطه ضریب برداشت حرارت و دبی جرمی ورودی به کلکتور به شکل معادله (۹-ب) بیان می‌گردد.

$$r = \frac{\dot{m} [1 - \exp(-\frac{A_c F U_L}{\dot{m} c_p})] |_{use}}{\dot{m} [1 - \exp(-\frac{A_c F U_L}{\dot{m} c_p})] |_{test}} \quad (۹-ب)$$

در رابطه (۹-ب)، $\dot{F}$ ضریب کارایی کلکتور است و به‌صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود [28]:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_0}} \quad (۱۰)$$

در رابطه ۱۰، $\frac{1}{U_0}$ نشان دهنده مقاومت مقابل جریان حرارت از سیال عامل به هوا است. مقاومت حرارتی معادل از سیال عامل به هوا را می‌توان به شکل رابطه ۱۱ بیان کرد:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{\frac{1}{U_L} + \frac{\Delta x}{k_{asphalt}} + \frac{A_c}{A_{pipe} h_{c,water}}} \quad (۱۱)$$

در رابطه ۱۱، $k_{asphalt}$ ، $h_{c,water}$ و A_{pipe} به‌ترتیب ضریب هدایت حرارتی آسفالت، ضریب انتقال حرارت جابجایی آب و سطح تماس لوله و آب است. Δx عمق دفن لوله در کلکتور آسفالت است. با استفاده از خواص حرارتی ارایه شده در جدول ۳، هر یک از مقادیر U_L ، U_0 و $\dot{F}$ با روش تحلیلی محاسبه می‌شود. با رویکرد تحلیلی، مقدار U_L برابر $11/37 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ به‌دست می‌آید.

وسایل اندازه‌گیری، روش انجام آزمایش، عوامل محیطی و تصادفی، کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری، اندازه‌گیری، انتقال و ثبت اطلاعات به‌دست‌آمده از حسگرها سبب ایجاد خطا و عدم

به‌دلیل ضریب بالای هدایت حرارتی لوله و جدار نازک لوله، از مقاومت حرارتی لوله در مقایسه با دیگر مقاومت‌ها صرف‌نظر شده است. جدول ۴ تقریبی از هر یک مقاومت‌های موثر نشان داده شده در شکل ۴ ارایه داده است.

جدول ۴) کمیت مقاومت‌های حرارتی

مقاومت	مقدار عددی مقاومت ($\frac{m^2}{W}$)
$\frac{1}{A_c h_{c,s-a}}$	۰/۱۳۰۳
$\frac{1}{A_c h_{r,s-a}}$	۰/۱۶۷۳
$\frac{\Delta x}{A_c K_{asphalt}}$	۰/۰۳۳۳
$\frac{1}{A_p h_{c,p-w}}$	۰/۰۱۱۸

همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، مقدار مقاومت حرارتی هدایت در آسفالت دارای مقدار بزرگتری نسبت به مقاومت جابجایی است. از این رو مکانیزم کنترل‌کننده جریان انتقال حرارت درون کلکتور آسفالت، مکانیزم انتقال حرارت هدایت است. به‌علت مقدار پایین ضریب هدایت حرارتی آسفالت، جریان حرارت درون آسفالت با این مقاومت بالا روبرو است. از طرفی، مقدار مقاومت حرارتی جابجایی و تابش دارای مقادیر بزرگی هستند.

با بازنویسی معادله ۲، می‌توان موازنه انرژی بر روی سطح بالایی کلکتور را به شکل رابطه ۳ بیان کرد.

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=0} = \alpha G + U_L (T_a - T) \quad (۳)$$

در رابطه ۳، U_L ضریب انتقال حرارت کلی سطح، G شدت تابش ورودی و α ضریب جذب سطح آسفالت است. دمای محیط پیرامون با T_a نشان داده شده است. مقدار ضریب انتقال حرارت کلی سطح از رابطه ۴ به‌دست می‌آید.

$$U_L = h_r + h_c \quad (۴)$$

ضریب انتقال حرارت معادل برای تابش و جابجایی با محیط به‌ترتیب با نماد h_r و h_c نشان داده شده است. مقدار ضریب معادل انتقال حرارت تابش، h_r ، از رابطه ۵ محاسبه می‌شود [27].

$$h_r = \sigma \varepsilon (T_a^2 + T^2) (T_a + T) \quad (۵)$$

برای محاسبه مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی، h_c ، از رابطه ۶ که توسط چرچیل ارایه شده است، استفاده می‌شود [27]:

$$h_c = \frac{2l}{k_a} \left\{ \frac{0.3387 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{1 + \left(\frac{0.468}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}}} \right\} \quad (۶)$$

با جایگذاری مقادیر به‌دست‌آمده از روابط ۵ و ۶ در رابطه ۴، مقدار U_L به‌دست می‌آید. مقدار انرژی مفید منتقل شده به سیال عامل را می‌توان با استفاده از مقدار محاسبه شده U_L و ضریب برداشت حرارت، F_R ، به‌دست آورد. ضریب برداشت حرارت، F_R ، نسبت افزایش واقعی انرژی مفید سیال عامل به افزایش انرژی سیال عامل با فرض اینکه سطح جاذب کلکتور در دمای محلی سیال است، تعریف می‌شود. بنابراین افزایش انرژی واقعی سیال عامل را

و میزان شدت تابش فرودی نماینده میزان انرژی ورودی به کلکتور است. حاصل تقسیم انرژی جذب شده به انرژی فرودی به سطح کلکتور نشان دهنده راندمان و عملکرد کلکتور است. از سوی دیگر از آنجا که ارزیابی راندمان کلکتور برای گستره وسیعی از دبی‌های جریان به صورت تجربی امکان پذیر نیست در این مطالعه یک الگوی بر پایه آزمایش‌های تجربی و روابط تحلیلی برای ارزیابی عملکرد کلکتور در سایر دبی‌ها در محدوده رژیم جریان آرام ارائه شده است.

جهت ارزیابی پاسخ حرارتی کلکتور آسفالت و تحلیل راندمان این دسته از کلکتورهای حرارتی نیاز است نمودارهای دماهای آب ورودی و خروجی از کلکتور، شار حرارتی ورودی و شرایط محیطی محل آزمایش در طول مدت آزمون به صورت پیوسته پایش گردد. نمودارهای ۱ و ۲ به ترتیب تغییرات پیوسته پارامترهای ثبت شده توسط حسگرها در طول مدت آزمایش به مدت ۶ ساعت از ۹:۳۰ صبح الی ۳:۳۰ بعدظهر برای دبی‌های ۰/۱ لیتر بر ساعت و ۱۲ لیتر بر ساعت را نشان می‌دهند. با توجه به مقادیر دبی‌های مورد آزمایش، جریان در طول لوله‌ها دارای رژیم آرام است. کلکتور آسفالت در هر دو دبی مطالعه شده دارای رفتار دینامیکی مشابهی است. در قسمت (الف) نمودارهای ۱ و ۲ متغیرهای محیطی محل آزمایش از قبیل شدت تابش فرودی و دمای هوای پیرامون نشان داده شده است. همان طور که در نمودارهای ۱- الف و ۲- الف نمایش داده شده است منحنی شدت تابش فرودی مطابق الگوی حرکت خورشید در آسمان است، در حالی که دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی در مطالعات قبلی شار حرارتی ثابتی در طول آزمایش و در مدت زمان محدودی بر روی کلکتور ایجاد کرده است. فرض پروفیل شار حرارتی ثابت رویکرد مناسبی برای تقریب شار حرارتی فرودی به سطح کلکتور نیست و این روند توانایی ارزیابی رفتار دینامیکی کلکتور را در شرایط واقعی در طول روز را که تغییرات شار حرارتی بسیار قابل ملاحظه است، ندارد.

قسمت (ب) نمودارهای ۱ و ۲ تغییرات پیوسته متغیرهای موثر بر عملکرد کلکتور آسفالت را نمایش می‌دهد. در هنگام شروع آزمایش، به علت تابش حرارتی از کلکتور به محیط در طول شب دمای آب ورودی به کلکتور و دمای عمق دفن آسفالت از دمای هوای بیرون کمتر است. از طرفی به علت مقدار کم تابش فرودی، دمای خروجی از کلکتور نسبت به دمای ورودی تغییرات قابل توجهی ندارد و در نتیجه اختلاف درجه حرارت آب در ورود و خروج ناچیز است. با افزایش تابش فرودی در طول روز دمای عمق آسفالت به تدریج افزایش می‌یابد. دمای عمق آسفالت از آنجا حایز اهمیت است که معیار حداکثر پتانسیل موجود برای ازدیاد درجه حرارت آب است. به عبارت دیگر درجه حرارت محلی آب حداکثر می‌تواند با درجه حرارت عمق آسفالت هم‌دما شود. با افزایش دمای عمق آسفالت و انتقال حرارت از آسفالت گرم به شبکه لوله، دمای آب در خروجی از کلکتور افزایش می‌یابد. دمای سطح آسفالت به علت تماس دائمی با هوای بیرون و تبادل حرارت

قطعیت در داده‌های آزمایشگاهی می‌شوند. از عوامل موثر در ایجاد خطا در مطالعه حاضر می‌توان به مقاومت الکتریکی سیم و قطعات الکتریکی و الکترونیکی در تجهیزات مورد استفاده و عوامل ناخواسته مانند نویز الکتریکی اشاره کرد. در این مطالعه، برای اندازه‌گیری دماهای موثر بر عملکرد کلکتور و عوامل محیطی از حسگرهایی با دقت مناسب استفاده شده است. از آنجا که برای محاسبه راندمان حرارتی کلکتور و مقدار انرژی حرارتی بازیافتی از مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شده است، این مقادیر محاسبه شده دارای درصدی از عدم قطعیت هستند. برای محاسبه مقادیر عدم قطعیت از رابطه ۱۲ استفاده شده است [29].

$$w_R = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} w_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

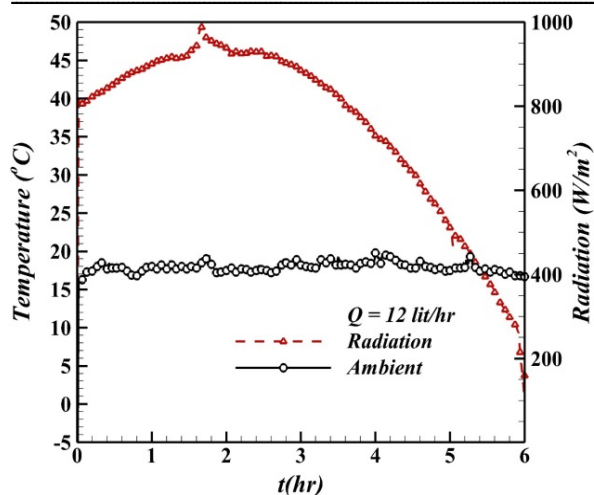
در رابطه ۱۲، Y کمیت غیرمستقل مورد مطالعه است. در حالی که، w_R و w_{x_i} به ترتیب عدم قطعیت برای کمیت Y و کمیت مستقل x_i هستند. مقادیر متوسط برای شدت تابش، G ، و اختلاف درجه حرارت، $(T_i - T_a)$ ، به ترتیب برابر 450 W/m^2 و 8°C و سانتیگراد به دست آمده است. مقادیر دقت وسایل اندازه‌گیری و عدم قطعیت عوامل موثر در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵) دقت و عدم قطعیت در عوامل موثر آزمایش تجربی

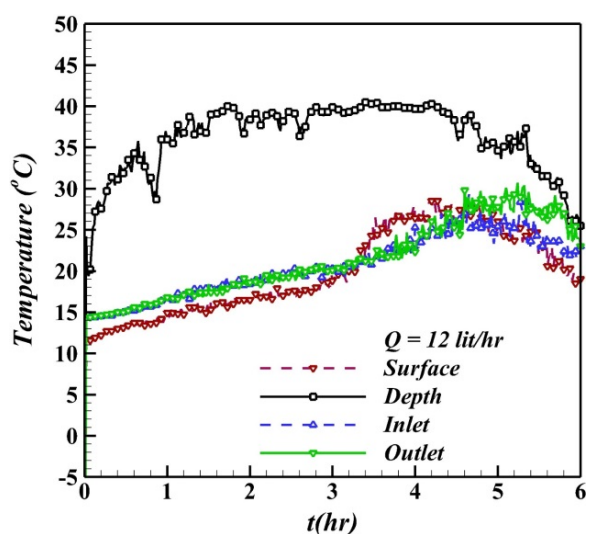
متغیر اندازه‌گیری شده	دقت اندازه‌گیری	درصد عدم قطعیت
دمای آب ورودی به کلکتور	$0/1^\circ\text{C}$	$0/5$
دمای آب خروجی از کلکتور	$0/1^\circ\text{C}$	$0/5$
دمای آب مخزن ذخیره آب	$0/1^\circ\text{C}$	$0/5$
دمای سطح آسفالت	$0/1^\circ\text{C}$	$0/5$
دمای عمق آسفالت در محل دفن شبکه لوله	$0/1^\circ\text{C}$	$0/5$
دمای هوای پیرامون	$0/1^\circ\text{C}$	$0/5$
شدت تابش آفتاب	10 W/m^2	۳
دبی سنج جریان	$0/01 \text{ lit/hr}$	۵
انرژی مفید جذب شده	-	$6/8$
راندمان	-	$7/1$

۴- بحث و نتایج

در مطالعه حاضر هدف اصلی بررسی تجربی و تحلیلی عملکرد کلکتور آسفالت در شرایط عملیاتی واقعی است. این در حالی است که مطالعات تجربی و آزمایشگاهی پیشین بیشتر در شرایط محیطی کنترل شده صورت گرفته‌اند و شبیه‌ساز خورشیدی با شار حرارتی ثابت برای مطالعه رفتار دینامیکی کلکتور به کار گرفته شده است. در شرایط واقعی بسیاری از پارامترها مانند تغییرات جوی محیط پیرامون اثری قابل توجه بر عملکرد واقعی کلکتور آسفالت دارند. عملکرد و راندمان کلکتور آسفالت مورد بررسی با پایش پارامترهای تاثیرگذار دمای محیط پیرامون، دمای آب ورودی، دمای آب خروجی، دبی جریان آب و میزان شدت تابش فرودی به سطح آسفالت ارزیابی می‌شود. اختلاف درجه حرارت آب ورودی و خروجی از کلکتور که معادل انرژی مفید جذب شده توسط کلکتور



(الف)

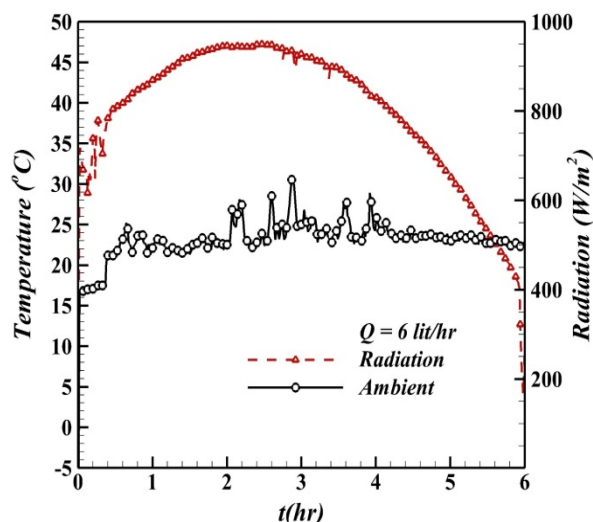


(ب)

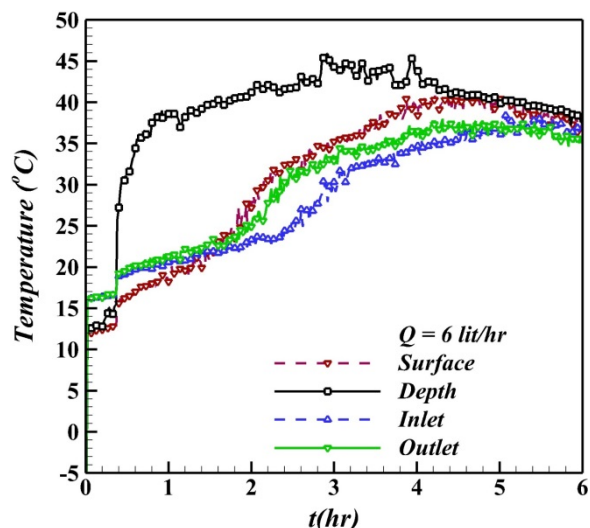
نمودار ۲) تغییرات ثبت شده؛ الف متغیرهای محیطی، ب متغیرهای موثر کلکتور برای دبی حجمی ۱۲ لیتر بر ساعت

رفتار حرارتی آسفالت از دیگر موارد حایز اهمیت در مطالعه حاضر است. همان طور که در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است رفتار حرارتی آسفالت در هماهنگی با روند شدت تابش فرودی به سطح آسفالت است. با افزایش شدت تابش فرودی به سطح آسفالت، دمای سطح و عمق آسفالت یک روند افزایشی را آغاز می‌کنند. به دلیل ضریب اندک هدایت حرارتی آسفالت، این روند افزایشی با شیبی کندتر از شیب شدت تابش فرودی ادامه پیدا می‌کند و دمای آسفالت به آرامی زیاد می‌شود تا در نهایت به یک مقدار بیشینه می‌رسد. با کاهش شدت تابش فرودی، روند افزایشی دمای سطح و عمق آسفالت متوقف می‌شود و دمای سطح و عمق به دلیل تبادل حرارت با محیط پیرامون و کاهش

جابجایی و تابشی با محیط، به دمای هوای پیرامون نزدیک است. چنین رفتار حرارتی مشابهی برای منحنی‌های دما و تابش برای هر دو دبی مطالعه شده وجود دارد. ذکر این نکته نیز دارای اهمیت است که با افزایش دبی جریان ورودی به کلکتور، تبادل گرمایی بیشتری از آسفالت به سیال عامل صورت می‌گیرد. این امر موجب می‌گردد عمق آسفالت دمای کمتری را در دبی ۱۲ لیتر بر ساعت به نسبت دبی ۶ لیتر بر ساعت تجربه کند. دمای کمتر در عمق و سطح آسفالت به ویژه در فصول گرم سال مانع ترک خوردگی و سبب افزایش طول عمر آسفالت می‌شود.

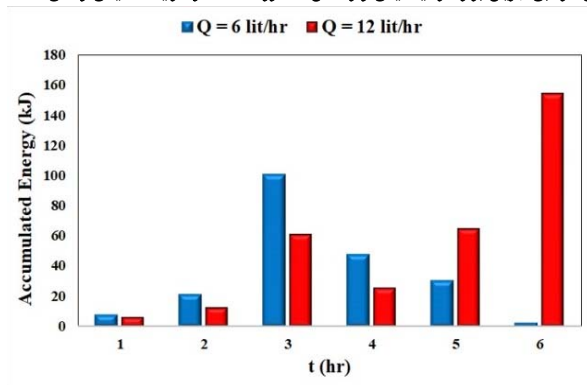


(الف)



(ب)

نمودار ۱) تغییرات ثبت شده؛ الف متغیرهای محیطی، ب متغیرهای موثر کلکتور برای دبی حجمی ۶ لیتر بر ساعت



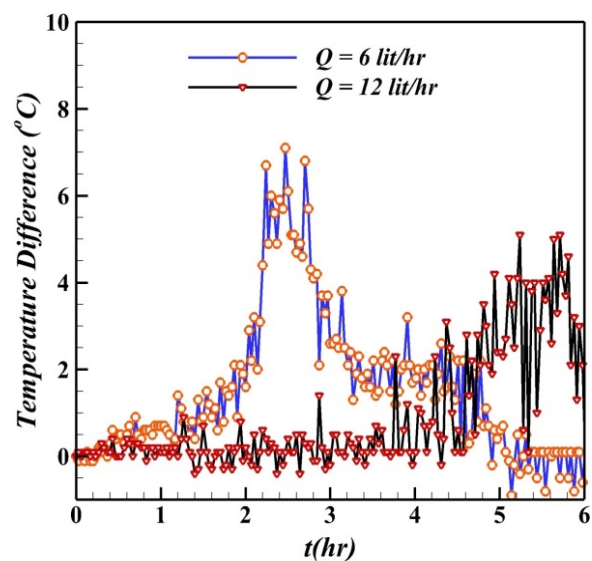
نمودار ۴) انرژی مفید جذب شده توسط سیال عامل به شکل تجمعی برای هر ساعت

راندمان کلکتور از دیگر پارامترهای اساسی برای ارزیابی عملکرد کلکتور است. در محاسبه راندمان حرارتی، مقادیر دماهای ورودی و خروجی بر روند تغییرات راندمان کلکتور بسیار موثر هستند. تمام دماهای موثر در هر لحظه از آزمایش به وسیله حسگرهای متصل شده به کلکتور برداشت می‌شوند و دستگاه ثبت‌کننده داده‌ها، این داده‌ها را ثبت و ضبط می‌کند. نمودار ۵ راندمان کلکتور آسفالت را برای دو دبی حجمی ۱۲ لیتر بر ساعت و ۱۲ لیتر بر ساعت بر حسب $\frac{\Delta T}{G}$ نشان می‌دهد. در نمودار راندمان کلکتور، ΔT اختلاف درجه حرارت ورودی به کلکتور، T_i ، و درجه حرارت محیط پیرامون، T_a ، است. همان طور که در نمودار ۵ نشان داده شده است با افزایش دبی راندمان افزایش می‌یابد. افزایش راندمان با افزایش دبی از آنجا ناشی می‌شود که مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش سرعت در لوله‌ها بهبود می‌یابد که این نکته به نوبه خود سبب بهبود روند انتقال حرارت در شبکه لوله و افزایش راندمان کلی می‌گردد. این رفتار حرارتی کلکتور آسفالت یعنی افزایش راندمان کاهش ΔT بنا به افزایش دبی جریان، توسط مطالعات پیشین نیز تایید شده است [10, 14, 17, 18]. اگر چه برای مدلسازی و بررسی رفتار حرارتی کلکتور آسفالت در این مطالعات، از مدل‌های آزمایشگاهی کوچک [14, 17, 18] یا مدلسازی عددی [10] در شرایط آزمایشگاهی استفاده شده است. اما در تمامی این مطالعات رفتار حرارتی یکسانی از کلکتور آسفالت در قبال افزایش دبی جریان مشاهده شده است. نکته دیگری که در نمودار راندمان حایز اهمیت است کاهش راندمان کلکتور با افزایش اختلاف درجه حرارت آب ورودی به کلکتور با محیط پیرامون است. این مساله از آنجا ناشی می‌شود که با افزایش اختلاف درجه حرارت، ΔT ، اتلاف حرارتی از کلکتور زیاد می‌شود که این مورد موجب کاهش راندمان کلکتور می‌گردد. با افزایش دبی جریان قدر مطلق شیب نمودار راندمان افزایش می‌یابد و راندمان کلکتور با tendی بیشتری کاهش می‌یابد. اگرچه با افزایش دبی جریان، کلکتور راندمان بالاتری را تجربه می‌کند و نمودار راندمان دارای عرض از مبدا بالاتری است. در این بخش از مقاله هدف ارزیابی و پیش‌بینی راندمان کلکتور در دیگر دبی‌های

شدت انرژی ورودی کاهش می‌یابد.

اختلاف دمای آب در ورودی و خروجی معیار سنجش عملکرد کلکتور آسفالت و نشان دهنده بزرگی مقدار انرژی جذب شده به وسیله شبکه لوله دفن شده در عمق آسفالت است. با افزایش اختلاف دما در شرایط یکسان تابش فرودی، راندمان کلکتور افزایش می‌یابد. نمودار ۳ نشان دهنده اختلاف بین درجه حرارت آب در ورودی و خروجی از کلکتور برای دبی‌های حجمی ۱۲ لیتر بر ساعت و ۱۲ لیتر بر ساعت است. همان طور که در نمودار ۳ نشان داده شده است، در ساعات ابتدایی آزمایش به دلیل تابش فرودی کم، اختلاف دمای محسوس در ورودی و خروجی از کلکتور شکل نمی‌گیرد. اما، با افزایش شدت تابش فرودی و ازدیاد دما در عمق آسفالت این اختلاف درجه حرارت رو به فزونی می‌گذارد به نحوی که در ساعاتی از آزمایش به بیش از ۶ درجه سانتیگراد برای دبی ۱۲ لیتر بر ساعت و ۴ درجه سانتیگراد برای دبی ۱۲ لیتر بر ساعت می‌رسد.

با افزایش دبی جریان، آب مدت زمان کمتری در کلکتور می‌ماند و مدت زمان تبادل حرارت آب و آسفالت کاهش می‌یابد. این مساله سبب می‌شود اختلاف درجه حرارت در ورودی و خروجی از کلکتور کاهش یابد. از طرفی با افزایش سرعت آب ضریب انتقال حرارت جابجایی در شبکه لوله افزایش می‌یابد و سبب بهبود انتقال حرارت در لوله می‌گردد. برای درک بهتر اثر افزایش دبی جریان بر بهبود انتقال حرارت، میزان حرارت جذب شده توسط سیال عامل آب به صورت تجمعی در هر ساعت از آزمایش در نمودار ۴ رسم شده است. حرارت تجمعی مبادله شده با سیال عامل برای دبی‌های ۱۲ لیتر بر ساعت و ۱۲ لیتر بر ساعت به ترتیب $20.8/5k$ و $32.3/1k$ است. این افزایش تبادل حرارت تجمعی نشان از بهبود روند انتقال حرارت با افزایش دبی جریان است.



نمودار ۳) تغییرات لحظه‌ای دمای ورودی و خروجی به کلکتور آسفالت

۵- نتیجه گیری

کلکتورهای آسفالت از دفن لوله در عمق آسفالت ساخته می‌شوند و به راحتی در هر مکانی امکان نصب و راه‌اندازی دارند. تحقیقات قبلی بر روی این دسته از کلکتورها بیشتر بر روی مطالعه عددی و ارزیابی پارامترهای موثر بر طراحی آنها بحث کرده‌اند، در حالی که بررسی‌های تجربی نیز در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده انجام گرفته است. در مطالعه تجربی و تحلیلی جاری ارزیابی عملکرد کلکتور آسفالت در شرایط عملیاتی واقعی انجام گرفته است و اثر دبی‌های متفاوت بر راندمان کلکتور آسفالت بررسی شده است. از طرفی با بهره‌گیری از رویکرد تحلیلی راندمان کلکتور آسفالت در سایر دبی‌ها پیش‌بینی شده است. این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان در شبکه لوله دفن شده راندمان کلکتور افزایش می‌یابد، در حالی که اختلاف دما در ورود و خروج از کلکتور با افزایش دبی کاهش می‌یابد. در مطالعه تجربی حاضر نشان داده شده است که با افزایش دبی حجمی به میزان دو برابر، راندمان کلکتور تا نزدیک ۲۵٪ افزایش می‌یابد، در حالی که راندمان با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. با توجه به محدودیت‌های عملی روش‌های تجربی از قبیل هزینه و زمان بالا، در این مطالعه یک رویکرد تحلیلی برای بررسی راندمان کلکتور آسفالت در سایر دبی‌های حجمی ارایه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از رویکرد تحلیلی با دقت مناسبی با مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی مطابقت دارد که این امر نشان دهنده کارایی روش تحلیلی ارایه شده است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

۶- پی‌نوشت

علام

A_c	مساحت کلکتور (m^2)
A_p	مساحت جانبی لوله (m^2)
B	ثابت مقاومت حرارتی
c_p	گرمای ویژه ($J/kg.K$)
$\dot{F}$	ضریب کارایی کلکتور
F_R	ضریب برداشت حرارت
G	شدت تابش فرودی (W/m^2)
h_c	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2.K$)
h_r	ضریب انتقال حرارت تابشی ($W/m^2.K$)
k	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
l	طول مشخصه کلکتور (m)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
Pr	عدد پرانتل

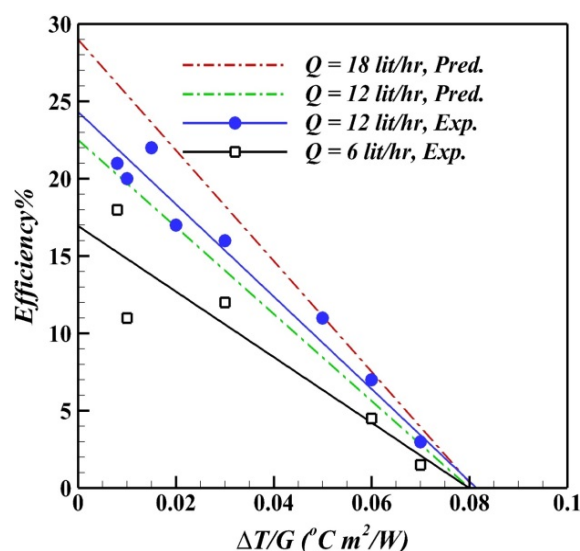
حجمی با ترکیب رویکردهای تجربی و تحلیلی است. برای این منظور و با هدف اعتبارسنجی این رویکرد، ابتدا با استفاده از نتایج آزمایش برای دبی ۶ لیتر بر ساعت مقدار راندمان برای دبی ۱۲ لیتر بر ساعت پیش‌بینی می‌شود. در ادامه، نتایج حاصل از پیش‌بینی برای دبی ۱۲ لیتر بر ساعت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. این رویکرد راه‌کاری برای پیش‌بینی راندمان کلکتور در سایر دبی‌های جریان پیشنهاد می‌دهد. نمودار ۵ نمودارهای راندمان به‌دست‌آمده از مقادیر تجربی را برای دو دبی حجمی در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. با استفاده از روش برازش منحنی، منحنی خطی که دارای بیشترین شباهت به داده‌های تجربی است برای دبی‌های حجمی رسم شده است. حاصل برازش منحنی برای دبی ۶ لیتر بر ساعت با رابطه ۱۳ بیان شده است:

$$\eta = 17 - 212.5 \left(\frac{T_i - T_a}{G} \right) \quad (13)$$

با مقایسه روابط ۸ و ۱۳، مقادیر F_R و U_L به ترتیب ۱۷/۸۹۴ و ۱۱/۸۷۵ به‌دست می‌آیند. با توجه به دو برابر شدن دبی حجمی جریان و فرض ثابت بودن مقادیر F و U_L مقدار r از رابطه ۹- الف برابر ۱/۳۲ محاسبه می‌شود. در این حالت مقدار راندمان برای دبی حجمی ۱۲ لیتر بر ساعت به شکل رابطه ۱۴ پیش‌بینی می‌شود:

$$\eta = 22.44 - 280.5 \left(\frac{T_i - T_a}{G} \right) \quad (14)$$

همان طور که در نمودار ۵ نشان داده شده است، نمودار پیش‌بینی شده از روابط تحلیلی با دقت مناسبی با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش هم‌خوانی دارد و حداکثر اختلاف بین دو منحنی تحلیلی و تجربی از مقدار ۱۰٪ تجاوز نمی‌کند. اگرچه همین مقدار خطای ایجاد شده نیز ناشی از ثابت فرض کردن مقدار $\dot{F}$ برای دو دبی جریان است. همان طور که در نمودار ۵ دیده می‌شود، همین روند را می‌توان برای دبی حجمی ۸ لیتر بر ساعت و سایر دبی‌های حجمی جهت پیش‌بینی رفتار حرارتی و راندمان کلکتور آسفالت در نظر گرفت.



نمودار ۵) راندمان کلکتور آسفالت

- 7- Chen M, Wu S, Wang H, Zhang J. Study of ice and snow melting process on conductive asphalt solar collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011;95(12):3241-3250.
- 8- Zhou Z, Wang X, Zhang X, Chen G, Zuo J, Pullen S. Effectiveness of pavement-solar energy system-An experimental study. *Applied Energy*. 2015;138:1-10.
- 9- Du Y, Chen J, Han Z, Liu W. A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. *Construction and Building Materials*. 2018;168:893-905.
- 10- Nasir DS, Hughes BR, Calautit JK. A CFD analysis of several design parameters of a road pavement solar collector (RPSC) for urban application. *Applied Energy*. 2017;186(3):436-449.
- 11- Nasir DS, Hughes BR, Calautit JK. Influence of urban form on the performance of road pavement solar collector system: Symmetrical and asymmetrical heights. *Energy Conversion and Management*. 2017;149:904-917.
- 12- Yinfei D, Zheng H, Jiaqi C, Weizheng L. A novel strategy of inducing solar absorption and accelerating heat release for cooling asphalt pavement. *Solar Energy*. 2018;159:125-133.
- 13- Chiarelli A, Al-Mohammedawi A, Dawson A, Garcia A. Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017;112:242-251.
- 14- Shaopeng W, Mingyu C, Jizhe Z. Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(10):1582-1587.
- 15- Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D, Serrano-Bravo P, Alonso-Estébanez A. Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors. *Applied energy*. 2013;111:324-332.
- 16- García A, Partl MN. How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine. *Applied Energy*. 2014;119:431-437.
- 17- Guldentops G, Nejad AM, Vuye C, Rahbar N. Performance of a pavement solar energy collector: Model development and validation. *Applied Energy*. 2016;163:180-189.
- 18- Alonso-Estebanez A, Pascual-Munoz P, Sampedro-García JL, Castro-Fresno D. 3D numerical modelling and experimental validation of an asphalt solar collector. *Applied Thermal Engineering*. 2017;126:678-688.
- 19- Asfour S, Bernardin F, Toussaint E. Experimental validation of 2D hydrothermal modelling of porous pavement for heating and solar energy retrieving applications. *Road Materials and Pavement Design*. 2018;1-17.
- 20- Li B, Wu S, Xiao Y, Pan P. Investigation of heat-collecting properties of asphalt pavement as solar collector by a three-dimensional unsteady model. *Materials Research Innovations*. 2015;19(Sup1):S1-172-S1-176.
- 21- Mirzananadi R, Hagentoft CE, Johansson P. Numerical investigation of harvesting solar energy and anti-icing road surfaces using a hydronic heating pavement and borehole thermal energy storage. *Energies*. 2018;11(12):3443.
- 22- Nasir DS, Hughes BR, Calautit JK. A study of the impact of building geometry on the thermal performance of road pavement solar collectors. *Energy*.

انرژی (J)	q
انرژی مفید جذب شده توسط سیال عامل (J)	Q_u
عدد رینولدز	Re
دما (K)	T
ضریب انتقال حرارت کلی بین سیال عامل و هوا	U_0
(W/m^2K)	
ضریب انتقال حرارت کلی سطح (W/m^2K)	U_L
عدم قطعیت	w
کمیت مستقل	x
عمق دفن لوله (m)	Δx
کمیت غیرمستقل	Y
علایم یونانی	
ضریب صدور	ε
راندمان	η
ثابت استفان-بولتزمن	σ
زیرنویس‌ها	
هوا	a
هدایت	$cond$
جابجایی	$conv$
ورودی	i
خروجی	o
لوله	p
تابشی	rad
خورشیدی	$solar$
حرارتی	$thermal$
آب	w

منابع

- 1- Ariyanfar L, Yari M, Abdi Aghdam E. Energy, exergy, economic, environmental (4E) analyses of a solar organic Rankine cycle to produce combined heat and power. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(10):229-240. [Persian]
- 2- Afzali F, Amiri H, Nakhaei V, Ameri M. Fabrication and thermal modeling of unglazed transpired solar air heater collectors with metallic (steel) and non-metallic absorber plates. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(9):339-350. [Persian]
- 3- Khajepour S, Ameri M. Direct steam generation solar power plant in the two pressures cycle. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(1):11-19. [Persian]
- 4- Pugsley A, Zacharopoulos A, Smyth M, Mondol J. Performance evaluation of the senergy polycarbonate and asphalt carbon nanotube solar water heating collectors for building integration. *Renewable Energy*. 2017;137:2-9.
- 5- Pan P, Wu S, Xiao Y, Liu G. A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;48:624-634.
- 6- O'Hegarty R, Kinnane O, McCormack SJ. Concrete solar collectors for façade integration: An experimental and numerical investigation. *Applied Energy*. 2017;206:1040-1061.

- 26- Mallick R, Carelli J, Albano L, Bhowmick S, Veeraragavan A. Evaluation of the potential of harvesting heat energy from asphalt pavements. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2011;4(2):164-171.
- 27- Bergman TL, Incropera FP, Lavine AS, DeWitt DP. *Introduction to heat transfer*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2011.
- 28- Kalogirou SA. *Solar energy engineering*. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier; 2013.
- 29- Kline S, McClintock FA. Describing uncertainty in single-sample experiments. *Mech Engineering*. 1953;75(1):3-8.
- 2015;93:2614-2630.
- 23- Wang H, Jasim A, Chen X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications-A comprehensive review. *Applied energy*. 2018;212:1083-1094.
- 24- Liu X, Rees SJ, Spitler JD. Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part I: Model development. *Applied Thermal Engineering*. 2007;27(5-6):1115-24.
- 25- Mallick RB, Chen B-L, Bhowmick S, Hulen M. Capturing solar energy from asphalt pavements. *International symposium on asphalt pavements and environment [Report]*. Zurich, Switzerland: International Society for Asphalt Pavements; 2008.