

## آنالیز عددی سیستم ذوب برف زمین گرمایی یک پل نمونه

سهیل پرخيال (استاديار)  
دانشگاه آزاد اسلامي واحد كرج  
اميد عسگري (دانشجوي كارشناسي ارشد)  
دانشكده‌ي مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي شريف  
محمدرضا شيرزادي (دانشجوي كارشناسي ارشد)  
دانشكده‌ي مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي

سیستم ذوب برف زمین گرمایی متشکل از لوله‌هایی است که به صورت شبکه‌یی در معابر و نقاط حادثه‌خیز جاده‌ها و پل‌ها جاسازی شده‌اند. در این شبکه سیالی را توسط یک پمپ گرمازا با انرژی زمین گرمایی گرم و به داخل لوله‌ها می‌فرستند تا برف‌ها را ذوب کند. هدف این نوشتار یافتن روش‌های عملی برای کاهش ساعت کار پمپ گرمازا و صرفه جویی در مصرف انرژی است. این نوشتار شامل شبیه‌سازی دوبعدی یک پل نمونه با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی حاکم بر شهر تهران است که به صورت پارامتریکی است و پارامترهای ورودی مختلفی از جمله خواص فیزیکی و شرایط جغرافیایی را شامل می‌شود. یکی از خصوصیات این شبیه‌سازی در نظر گرفتن جنس‌های متفاوت برای لایه‌های تشکیل دهنده‌ی پل است.

### فهرست علائم

$T_f$ : دمای محیط ( $k$ )	$c_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه ( $j/kg^\circ k$ )
$U_{pipe}$ : ضریب کلی انتقال حرارت لوله ( $W/m^2 k$ )	$D_{AB}$ : ضریب پخش ( $m^2/s$ )
$V$ : حجم ناحیه‌ی مورد نظر ( $m^3$ )	$h_c$ : ضریب انتقال حرارت جابه‌جائی ( $W/m^2 k$ )
$\theta$ : زاویه‌ی برخورد اشعه‌ی خورشید	$h_r$ : ضریب انتقال حرارت تابشی ( $W/m^2 k$ )
$\varepsilon$ : ضریب صدور	$h_d$ : ضریب انتقال جرم ( $kg/m^2 s$ )
$\alpha$ : ضریب پخش حرارت ( $m^2/s$ )	$h_{fg}$ : گرمای نهان تبخیر ( $J/kg$ )
$\rho$ : چگالی ( $kg/m^3$ )	$I$ : تابش کل خورشیدی ( $W/m^2$ )
$\omega$ : رطوبت نسبی	$I_b$ : تابش مستقیم ( $W/m^2$ )
$\sigma$ : ضریب استنفان بولتزمان ( $W/m^2 k^4$ )	$I_d$ : تابش غیرمستقیم ( $W/m^2$ )
$\Delta t$ : فاصله‌ی زمانی ( $s$ )	$k$ : ضریب هدایت حرارتی ( $W/m^\circ k$ )
$m, n$ : مختصات مکانی	$k_a$ : ضریب هدایت حرارتی آسفالت ( $W/m^\circ k$ )
	$l$ : فاصله‌ی بین گره‌ها ( $m$ )

### مقدمه

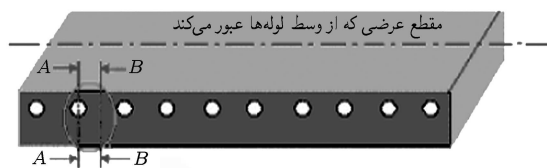
زدودن یا ذوب کردن برف و یخ انباشته بر باند فرودگاه‌ها، بزرگراه‌ها و پل‌ها در زمستان یکی از موضوعات اساسی در طرح افزایش ایمنی راه‌ها و نقل و انتقالات است. ساده‌ترین راه برای این کار استفاده از مواد شیمیایی (نمک) و دستگاه‌های برف‌روب مکانیکی است. نمک (کلرید سدیم) با آب و یخ ترکیب شده و دمای ذوب آن را کاهش می‌دهد. البته در مواردی که دمای سطح از  $-9^\circ$  درجه سانتی‌گراد کم‌تر باشد استفاده از نمک بی‌فایده خواهد بود. اولین ضرر استفاده از نمک واکنش خوردگی نمک با فولادهای تقویت‌کننده‌ی پل و حتی سازه‌های فولادی پل (در درازمدت) است. از طرف دیگر، استفاده از مواد شیمیایی نظیر نمک،

$Le$ : عدد لوئیس
$\dot{m}''_{snow}$ : دبی جرمی ریزش برف بر واحد سطح ( $kg/m^2 s$ )
$\dot{m}''_w$ : دبی جرمی تبخیر آب بر واحد سطح ( $kg/m^2 s$ )
$Nu$ : عدد نوسلت
$Pr$ : عدد پرانتل
$Re$ : عدد رینولدز
$Ra$ : عدد رایلی
$T_f$ : دمای سیال داخل لوله ( $k$ )
$T_{air}$ : دمای هوا ( $k$ )

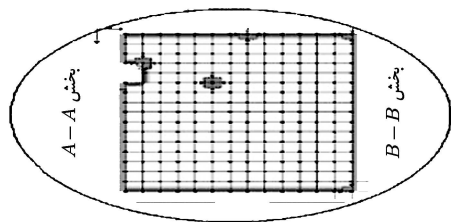
لوله اندکی افت می‌کند یک مقطع عرضی در وسط لوله‌ها می‌زنیم در نتیجه با توجه به تقارن موجود، سطوح بی‌دررو (آدیاباتیک) در طرفین قطعه‌ی متقارن قرار می‌گیرند. قطعه‌ی در نظر گرفته شده را مطابق شکل ۲ شبکه‌بندی، و گره‌های حاصل را مطابق شکل ۳ شماره‌گذاری می‌کنیم. در این شبیه‌سازی فاصله‌ی بین گره‌ها را برابر شعاع لوله‌ها فرض می‌کنیم. فرایندهای انتقال حرارت حاکم بر این نمونه (شکل ۴) عبارت‌اند از:

۱. تابش خورشیدی<sup>۱</sup> در بالای سطح؛
۲. شار گرمای جابه‌جایی<sup>۲</sup> در بالا و پایین سطح؛
۳. تابش حرارتی<sup>۳</sup> در بالا و پایین سطح؛
۴. تبخیر<sup>۴</sup> در بالای سطح؛
۵. شار گرمای محسوس<sup>۵</sup> روی سطح؛
۶. شار گرمای نهان<sup>۶</sup> ناشی از ذوب شدن برف روی سطح؛
۷. شار گرمای جابه‌جایی در لوله‌ها؛
۸. هدایت حرارتی<sup>۷</sup> در قطعه.

ممکن است سطح بالای قطعه از جنس آسفالت باشد، و ما باید علاوه بر ضخامت آسفالت، چگالی ( $\rho$ )، ظرفیت گرمایی ( $Cp$ )، ضریب صدور ( $\epsilon$ )، ضریب هدایت حرارتی ( $k$ ) و ضریب پخش آن را ( $\alpha$ ) به‌عنوان ورودی وارد برنامه کنیم. یکی از مزیت‌های اصلی این شبیه‌سازی نسبت به کارهای انجام شده‌ی قبلی استفاده از خصوصیات آسفالت علاوه بر بتن (ماده‌ی پایه) است؛ زیرا سطوحی مثل جاده‌ها و کف فرودگاه‌ها باید پوششی از نوع آسفالت داشته باشند. مرحله‌ی بعدی وارد کردن ابعاد هندسی پل، خصوصیات فیزیکی بتن، ابعاد



شکل ۱. مقطعی از پل با لوله‌های U شکل.



شکل ۲. قطعه‌ی متقارن برداشت شده از پل با عرض واحد.

به محیط زیست و پوشش گیاهی و جریان‌های آب آسیب می‌رساند. روش دیگر مبارزه با برف، یعنی استفاده از ماشین‌آلات برف‌روب، ممکن است به سطوح آسیب رسانده و هزینه‌های گزافی را برای تعمیر آنها تحمیل کند. در حال حاضر استفاده از برف‌روب‌ها تنها راه مبارزه با برف در شرایط بحرانی است. با توجه به این نکات، در نظر گرفتن سیستم ذوب برفی که هزینه‌های کم‌تری داشته و خسارت وارده بر جاده‌ها و پل‌ها را کم کند ضروری به نظر می‌رسد. در این نوشتار، تأثیر پارامترهای مختلف نظیر ابعاد هندسی و پارامترهای فیزیکی و آب و هوایی و جغرافیایی بر زمان ذوب برف در یک سیستم ذوب برف زمین‌گرمایی بررسی می‌شود.

### پیشینه‌ی پژوهش

طبق مطالعات انجام شده در زمینه‌ی سیستم‌های ذوب برف، تحقیقات به دو دسته‌ی «حالت پایا» و «حالت گذرا» تقسیم می‌شوند. مدل‌های حالت پایای سیستم ذوب برف به صورت یک‌بعدی و نیز دوبعدی موجودند. در این خصوص، تحقیقات اولیه چاپمن در سال ۱۹۵۶ و با طبقه‌بندی این سیستم‌ها شروع شد<sup>[۱]</sup>، و بعد از آن در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۴ محققان دیگری فعالیت‌های وی را دنبال کردند.<sup>[۲،۳]</sup> در سال ۱۹۷۰ نیز پژوهش‌های دیگری در خصوص روش‌های مدل‌سازی دوبعدی صورت گرفته است.<sup>[۴]</sup> در مدل‌های حالت دائم پاسخ فعال سطح در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این حرارت به‌طور خیلی سریع به طرف سطح منتقل نمی‌شود و تأثیرات گذرا همچون دوره‌ی زمانی بین روشن شدن سیستم و رسیدن به شرایط حالت دائم می‌تواند بسیار با اهمیت باشد. مدل‌های ارائه شده در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ بیان‌گر ارتباط گرادیان دمای دوبعدی گذرا و نحوه‌ی چیدمان لوله‌ها و هندسه‌ی سطح است.<sup>[۵،۶]</sup> در این مدل، از شبکه‌ی مستطیلی تفاضل محدود (FDM) استفاده شده است. در سال ۲۰۰۲ و در هشتاد و دومین کنگره TRB، ویرایش تازه‌ی از مدل چپاسون برپایه‌ی روش حجم محدود (FVM) ارائه شد.<sup>[۷]</sup> Liu, X در سال ۲۰۰۵ نیز مجموعه‌ی آزمایشگاهی برای آزمون تجربی سیستم ذوب برف یک پل ارائه<sup>[۸]</sup>، و با مدل عددی ارائه شده در سال ۲۰۰۴ (در هشتاد و سومین کنگره‌ی TRB) مقایسه کرده است.<sup>[۹]</sup>

### شرح مدل‌سازی

روش مدل‌سازی به‌طور مستقل از پمپ گرمازا، و با فرض وجود آب زمین‌گرمایی در دماها و دبی‌های دلخواه انجام شده و این روش فقط به بررسی توزیع دما در قطعه‌ی متقارن می‌پردازد. شکل ۱ مقطع عرضی یک پل را نشان می‌دهد. با فرض این که دمای سیال در طول

که در آن  $q_i^{(t-\Delta t)}$  میزان گرمای ورودی به هرگره است. شار حرارتی در هر گره بالای سطح  $(q''_{(m,n)})$  عبارت است از:

$$q''_{(m,n)} = q''_{solar} + q''_{thermal} + q''_{convection} + q''_{rain,snow-sensible} + q''_{rain,snow-latent} \quad (3)$$

ممکن است سطح زیرین در معرض شرایط تابش حرارتی و جابه‌جایی، یا به‌صورت سطحی عایق باشد. شار حرارتی تابش خورشید  $(q''_{solar})$  مقدار خالص تابش خورشیدی جذب‌شده توسط سطح است و با رابطه‌ی ۴ بیان می‌شود:

$$q''_{solar} = I\alpha \quad (4)$$

در این مدل، تابش خورشید  $(I)$  به دو نوع ذره‌ی  $(I_b)$  و افشانه‌ی  $(I_d)$  دسته‌بندی شده، که در آن‌ها  $I$  طبق رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید:

$$I = I_b \cos\theta + I_d \quad (5)$$

شار حرارتی تابش گرمایی در هرگره  $(q''_{thermal})$  از طریق معادله‌ی ۶ به‌دست می‌آید:

$$q''_{thermal} = h_r(T_r - T_{(m,n)}) \quad (6)$$

که در آن:

$$h_r = \epsilon\sigma \left( \frac{T_{(m,n)} + T_r}{2} \right)^2 \quad (7)$$

شار حرارتی جابه‌جایی در هر گره سطح قطعه  $(q''_{convection})$  از معادله‌ی ۸ به‌دست می‌آید:

$$q''_{convection} = h_c(T_{air} - T_{(m,n)}) \quad (8)$$

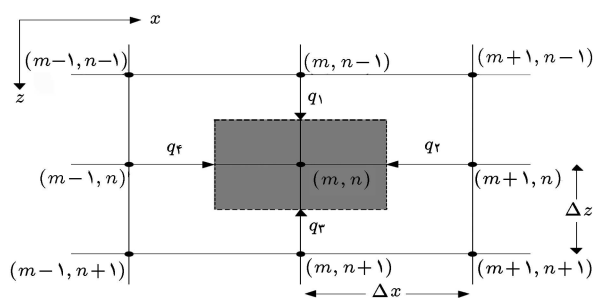
که در آن:

$$h_c = Nu_k/L \quad (9)$$

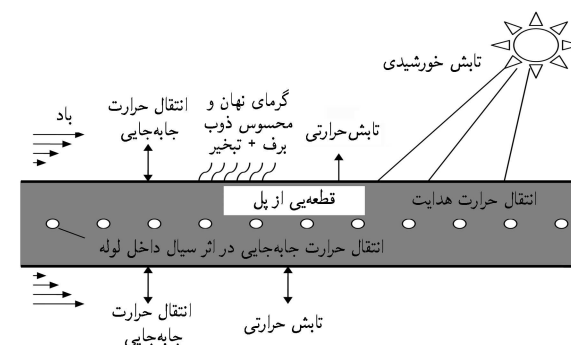
رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ روابط تجربی نوسلت برای جابه‌جایی آزاد به‌شمار می‌آیند:

$$Nu = 0.54 Ra^{1/4} \quad (10^4 < Ra < 10^9 - \text{la min ar flow}) \quad (10)$$

$$Nu = 0.15 Ra^{1/4} \quad (10^9 < Ra < 10^{11} - \text{turbulent flow}) \quad (11)$$



شکل ۳. نحوه‌ی شماره‌گذاری گره‌ها.



شکل ۴. فرایندهای مختلف انتقال حرارت در بالا و پایین پل.

لوله و خصوصیات آب ورودی است. رطوبت نسبی، عدد پراوتل و ضریب هدایت حرارتی هوا ورودی‌های دیگر مسئله‌اند. طبق اطلاعات هواشناسی، لازم است شرایط محیطی طرح، دبی جرمی ریزش برف بر واحد سطح  $(\dot{m}'')$ ، همراه با گرمای نهان تبخیر  $(h_{fg})$  به‌عنوان ورودی به برنامه داده شوند. سپس پارامترهای جغرافیایی محل پل را وارد کنیم. ابتدا عرض جغرافیایی محل، و سپس ساعت طراحی را برحسب ساعت وارد می‌کنیم. شیب قطعه را نسبت به افق برحسب درجه، و زاویه‌ی سمت صفحه و چندمین روز سال را برحسب عددی از صفر تا ۳۶۵ و ارتفاع محل مورد نظر را برحسب کیلومتر وارد می‌کنیم. در یک سیستم دوبعدی گذرا با خواص ثابت و بدون تولید انرژی داخلی، از معادله‌ی گرما به‌صورت زیر استفاده می‌شود<sup>[۱۰]</sup>:

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

به‌دلیل گذرا بودن سیستم، علاوه بر مشتقات مکانی مشتقات زمانی هم باید گسسته شوند. این روش حل دما را فقط در نقاط گسسته و در زمان‌های متوالی محاسبه می‌کند. در حالت کلی معادله‌ی بالانس انرژی را برای همه‌ی گره‌ها چنین تعریف می‌کنیم:

$$\sum_{i=1}^4 q_i^{(t-\Delta t)} A = V\rho c_p \left( \frac{T_{(m,n)}^t - T_{(m,n)}^{(t-\Delta t)}}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

و برای جابه‌جایی اجباری:

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \text{ (laminar flow regime)} \quad (12)$$

$$Nu = 0.37 Re^{4/5} Pr^{1/3} \text{ (mixed and turbulent flow)} \quad (13)$$

است. در این شبیه‌سازی یک برنامه‌ی رایانه‌ی نوشته شده که با دریافت متغیرهای ذکر شده در قسمت قبل خروجی‌های مورد نظر را به صورت نمودار یا عدد ارائه می‌دهد. این خروجی‌ها می‌توانند گرادیان دما در هر مقطع مورد نظر، و در هر زمان از کارکرد سیستم ذوب برف یا دمای متوسط سطح بر حسب زمان یا هر متغیر دیگری باشد.

### نتایج

شکل ۵ بیانگر متوسط دمای سطح قطعه بر حسب زمان در حالت پایا است. این نمودار بیانگر آن است که دمای سطح پس از حدود ۲۰ ساعت به حالت دائم می‌رسد. در حالت پایا، بارش برف و مواردی نظیر تبخیر و گرمای نهان وجود ندارد و فرض شده که هوا صاف است و آفتاب بر سطح می‌تابد. مشاهده می‌شود که نمودار دمای متوسط سطح به دست آمده از نتیجه‌ی تحقیق دیگو<sup>[۱۱]</sup> در حالتی که برف و باران نداریم (شکل ۶) با شکل ۵ که حاصل کار ما است به خوبی مطابقت دارد. شکل ۷ بیانگر متوسط دمای سطح بر حسب زمان در حالت گذرا است. باید توجه داشت که در این حالت سیستم دائماً روشن است و قطع و وصل نمی‌شود و برف دائماً می‌بارد. متوسط دمای سطح با فرض ثابت ماندن شرایط آب و هوایی پس از ۱۴ ساعت به حالت پایا می‌رسد. طبق این نمودار با شرایط ورودی داده شده در آغاز، مدت ۱۸ دقیقه دمای متوسط سطح به علت ریزش برف و نرسیدن گرادیان دمای لوله به سطح سرد شده است. بعد از ۱۸ دقیقه سطح شروع

شار حرارتی محسوس به خاطر بارش برف یا باران در هر گره سطح پیاده‌رو ( $q''_{rain,snow}$ ) از طریق معادله‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$q''_{rain,snow} = \dot{m}''_{rain,snow} c_p (T_{air} - T_{(m,1)}) \quad (14)$$

شار حرارتی مربوط به تبخیر ( $q''_{evaporation}$ ) چنین محاسبه می‌شود:

$$q''_{evaporation} = h_{fg} \dot{m}''_w \quad (15)$$

در این مدل برای محاسبه‌ی شار جرمی آب تبخیر شده در هر گره سطح پیاده‌رو ( $\dot{m}''_w$ ) از تشابه  $z$ -factor استفاده می‌کنیم:

$$\dot{m}''_w = h_d (w_{air} - w_{(m,1)}) \quad (16)$$

ضریب انتقال جرم ( $h_d$ ) با استفاده از تشابه چیلتون - کولبرن تعریف می‌شود:

$$h_d = h_c / c_p Le^{1/3} \quad (17)$$

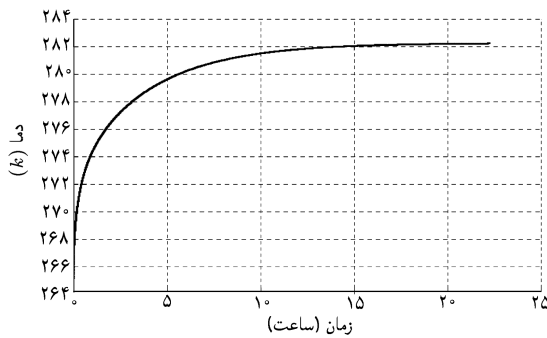
$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (18)$$

شار حرارتی در اثر عبور سیال ( $q''_{fluid}$ ) در یک دور جریان از طریق رابطه‌ی ۱۹ به دست می‌آید:

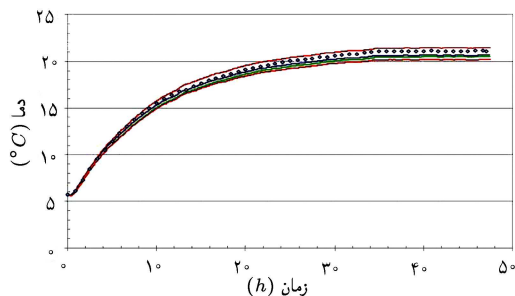
$$q''_{fluid} = U_{pipe} (T_{fluid} - T_{(m,n)}) \quad (19)$$

### روش حل

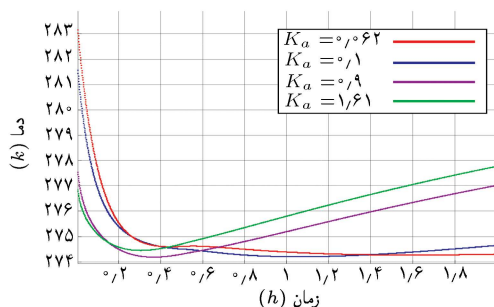
بر اساس مدل ریس و همکاران، مقایسه‌ی انجام شده بین یک مدل حالت دائم با سطح بدون برف و تعداد معینی ساعت کار و یک مدل حالت گذرا با همین شرایط حاکی از آن است که انرژی لازم برای راه‌اندازی سیستم می‌تواند بیشتر از ۵ برابر چیزی باشد که در حالت دائم محاسبه شده است. بنابراین مدل‌سازی انجام شده در این نوشتار بر پایه‌ی روش تفاضل محدود و در حالت گذرای دوبعدی است. تفاوت‌های این مدل‌سازی نسبت به دیگر مدل‌سازی‌ها، در نظر گرفتن لایه‌های مختلف برای قطعه از جمله لایه‌ی آسفالت در سطح، تحلیل حالت پایای سیستم و منظور کردن خروجی این قسمت به عنوان ورودی قسمت حالت گذرای سیستم، پارامتریکی بودن و قابلیت دادن ورودی‌های متنوع به برنامه



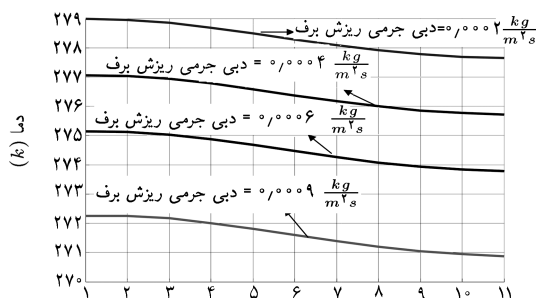
شکل ۵. متوسط دمای سطح قطعه بر حسب زمان در حالت پایا.



شکل ۶. متوسط دمای سطح قطعه بر حسب زمان در حالت پایا در مدل دیگو - اسپین<sup>[۱۱]</sup> برای مقایسه با شکل ۵.

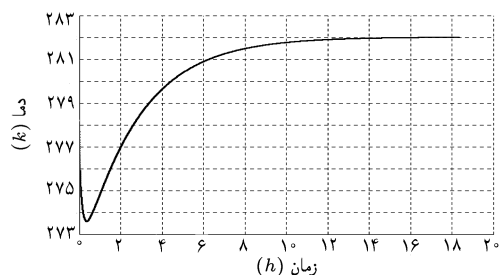


شکل ۹. متوسط دمای سطح برحسب زمان با تغییر ضریب انتقال حرارت آسفالت.

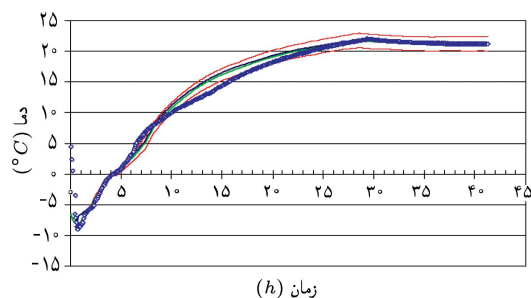


شکل ۱۰. گرادیان دمای سطح با تغییر دبی جرمی ریزش برف.

است. وقتی که میزان بارش برف  $10^{-4} (kg/m^2.s)$  است دمای سطح کم‌تر از صفر است (شکل ۱۱). با کم‌کردن فاصله‌ی بین لوله‌ها تا ۱۵ سانتی‌متر دمای سطح افزایش می‌یابد ولی این فاصله بسیار کم و غیراقتصادی است. در حالت بعدی دمای سیال را از ۳۲۵ کلوین به ۳۷۵ کلوین می‌رسانیم که تغییر دمای سطح به‌وضوح معلوم است. برای تأمین این دما قطعاً کمپرسور پمپ گرمازا برای رساندن دمای سیال به این میزان، باید انرژی بیشتری مصرف کند. در حالت بعدی ضخامت آسفالت را به اندازه‌ی ۱ سانتی‌متر کم کرده و دمای سیال را همان ۳۷۵ در نظر گرفته‌ایم. این گرادیان دما بعد از گذشت ۳۹ دقیقه از کار سیستم رسم شده است. در شکل ۱۲ همان تغییرات قسمت قبل را وارد کرده و تغییرات دمای متوسط سطح را برحسب زمان رسم کرده‌ایم. در حالت عادی، یعنی بارش  $10^{-4} (kg/m^2.s)$ ، دمای متوسط سطح بعد از ۱٫۵ ساعت به بالای صفر می‌رسد که مسلماً از نظر طراحی غیرقابل قبول است. اما با تغییر فاصله‌ی بین لوله‌ها به ۱۵cm این زمان به ۸ دقیقه می‌رسد. با زیاد کردن دمای سیال به ۳۷۵ کلوین این زمان به ۳۶ دقیقه می‌رسد. با همین دما و کم کردن ضخامت آسفالت این زمان به ۲۴ دقیقه رسیده است. بهترین حالت ممکن این است که با همین دما هم ضخامت آسفالت و هم ضخامت بتن را به اندازه‌ی ۱ سانتی‌متر کم کنیم که زمان آن به کم‌تر از ۱۸ دقیقه می‌رسد. در شکل ۱۳ دمای متوسط سطح برحسب زمان برای چند ظرفیت حرارتی مختلف بتن رسم شده است. در یک لحظه‌ی مشخص، هرچه ظرفیت حرارتی

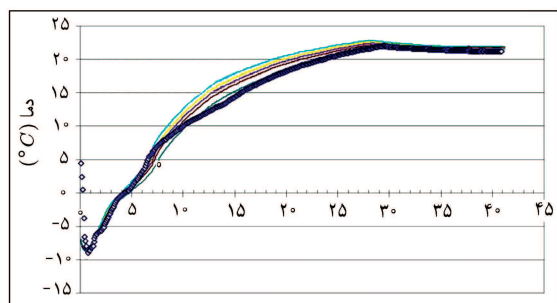


شکل ۷. متوسط دمای سطح قطعه برحسب زمان در حالت گذرا.

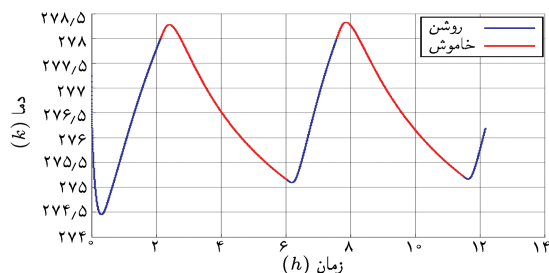


شکل ۸. متوسط دمای سطح قطعه برحسب زمان در حالت گذرا در مدل تفاضل محدود چپاسون و نتایج تجربی دیاگو اسپین [۱۱] برای مقایسه با شکل ۷.

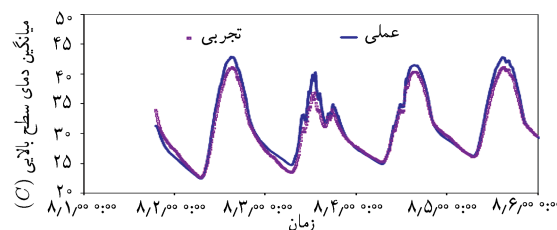
به گرم شدن می‌کند. البته در عمل، با گذاشتن حساسه بعد از این که دمای متوسط سطح به مقدار معینی برسد سیستم خاموش می‌شود. در شکل ۸ دمای متوسط سطح برحسب زمان هنگام روشن بودن سیستم طبق نتایج پژوهش‌های چپاسون و دیاگو اسپین [۱۱] برای مقایسه‌ی نتایج آورده شده است. در روش چپاسون دمای اولیه‌ی قطعه برای تحلیل گذرا برابر دمای هوا در نظر گرفته شده است. اما در این نوشتار از نتایج حالت پایا به‌عنوان شرایط اولیه برای حالت گذرا استفاده شده است. چنان که مشاهده می‌شود در آغاز دما کاهش می‌یابد و سپس شروع به زیاد شدن می‌کند که دقیقاً مشابه رفتار سیستم در شکل ۷ است. در شکل ۹ به بررسی تغییرات دمای متوسط سطح برحسب مقادیر مختلف ضریب هدایت حرارتی آسفالت پرداخته‌ایم. ضریب هدایت حرارتی برای آسفالت معمولی  $0.062$  است که در این حالت دمای متوسط به سرعت کاهش می‌یابد و بعد از حدود ۲ ساعت به کندی شروع به افزایش می‌کند. اما وقتی ضریب هدایت حرارتی آسفالت برابر بتن باشد بعد از ۱۵ دقیقه دمای متوسط به  $274.5$  کلوین رسیده و به سرعت شروع به افزایش می‌کند. در شکل ۱۰ تأثیر میزان بارش بر گرادیان دمای سطح را بررسی می‌کنیم. چنان که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان بارش در واحد زمان دمای سطح کم‌تر می‌شود. با ابعاد ورودی به‌ازای بارش  $10^{-4} (kg/m^2.s)$  سیستم قادر به ذوب کردن برف نیست و دمای سطح کم‌تر از صفر می‌شود. (این گرادیان دما بعد از ۳۹ دقیقه رسم شده است). در شکل ۱۱ هدف ارائه راه حل برای بارش سنگین



شکل ۱۴. متوسط دمای سطح برحسب زمان با تغییر ظرفیت گرمایی ویژه بتن در مدل دیاگو<sup>[۱۱]</sup> - اسپین برای مقایسه با شکل ۱۳.



شکل ۱۵. متوسط دمای سطح برحسب زمان با ویژگی روشن و خاموش شدن سیستم و با فرض ثابت بودن شرایط آب و هوایی.



شکل ۱۶. متوسط دمای سطح برحسب زمان یا ویژگی روشن و خاموش شدن سیستم در مدل اسپلیتر، لیو و ریس برای مقایسه با شکل ۱۵.

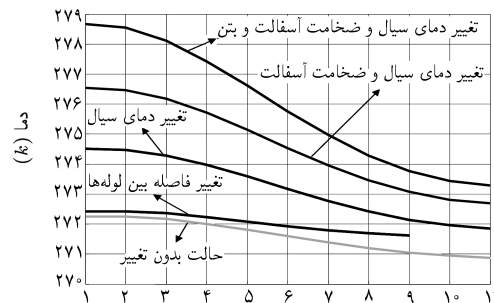
وقتی که دمای سطح به ۲۷۵ کلوین برسد حساسه دستور برقراری دبی را می‌دهد و همین‌طور تکرار می‌شود.

در این شکل شرایط آب و هوایی ثابت فرض شده است. شکل ۱۶ متوسط دمای سطح برحسب زمان با ویژگی روشن و خاموش شدن سیستم در مدل اسپلیتر، لیو و ریس برای مقایسه با شکل ۱۵ است.

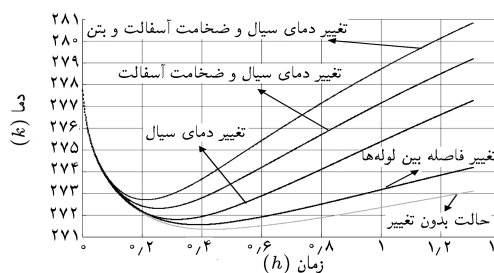
### نتیجه‌گیری

مدل‌سازی انجام شده در این نوشتار از آنجا که به صورت پارامتریکی است می‌تواند نتایج متنوعی در موارد گوناگون ارائه دهد. مثلاً در زمینه‌ی مواد سازنده‌ی پل نتایج زیر حاصل شده است.

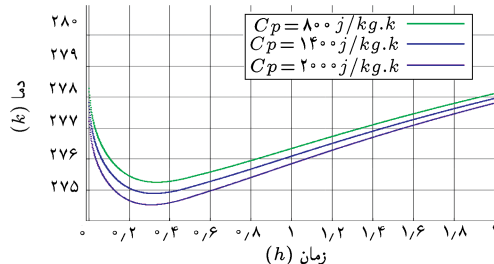
- ساختن آسفالتی که ضریب هدایت حرارتی آن برابر با بتن به‌کار رفته در پل باشد.
- ساختن بتنی با ظرفیت حرارتی کم‌تر از بتن‌های موجود.



شکل ۱۷. گرادیان دمای سطح با تغییرات دما، فاصله‌ی بین لوله‌ها، دمای سیال ضخامت آسفالت و بتن.



شکل ۱۸. متوسط دمای سطح با تغییرات دما، فاصله‌ی بین لوله‌ها، دمای سیال ضخامت آسفالت و بتن.



شکل ۱۹. متوسط دمای سطح برحسب زمان با تغییر ظرفیت گرمایی ویژه بتن.

بتن کم‌تر باشد دمای متوسط سطح قطعه بیشتر است. این بدان دلیل است که هرچه ظرفیت حرارتی کم‌تر باشد جسم قدرت عبور گرمایی بیشتری را دارد و دما به‌راحتی در آن تغییر می‌کند. بنابراین هر چه بتوانیم ظرفیت حرارتی بتن را کم کنیم شرایط بهتری فراهم می‌شود؛ البته این عمل بر زمان سیستم اثری ندارد. در شکل ۱۳ که حاصل نتایج ما در آن منعکس شده است، اثر ظرفیت گرمایی بتن بر دمای متوسط سطح بررسی شده است می‌توان این شکل را با شکل ۱۴ که حاصل نتایج دیگو<sup>[۱۱]</sup> است مقایسه کرد. همان‌طور که در شکل ۱۴ آمده، در یک زمان مساوی هرچه ظرفیت گرمایی بتن بیشتر باشد دمای متوسط سطح کم‌تر خواهد شد که نتایج به دست آمده‌ی ما نیز در شکل ۱۳ این مطلب را تصدیق می‌کند، لازم به ذکر است که نمودار شکل ۱۳ فقط برای ۲ ساعت کارکرد سیستم است. شکل ۱۵ نیز در حالتی است که روی سیستم حساسه قرار دهیم، وقتی که دمای متوسط سطح به ۲۷۸ کلوین برسد دبی آب قطع می‌شود و سطح شروع به سرد شدن می‌کند.

### پانوشت

1. solar radiation
2. convection
3. thermal radiation
4. evaporation
5. sensible heat flux
6. latent heat flux
7. conduction

### منابع

1. Chapman, W.P. "Design of snow melting systems", *National Trade Journals* (1956).
2. Kilkis, I.B. "Design of embedded snow-melting systems: part 2, heat transfer in the slab – a simplified model", *ASHRAE Transactions* (1994).
3. Ramsey, J., M. J. Hewett, T.H. Kuehu, and S. D. Petersen "Updated design guidelines for snow melting systems", *ASHRAE Transactions* (1991).
4. Schnurr, N.M. and Rogers, D.B. "Heat transfer design for optimization of snow melting systems", *ASHRAE Transactions* (1970).
5. Rees, S.J., Splitter, J.D., Xiao, X. "Transient analysis of snow-melting system performance", *ASHRAE Transactions* (2002).
6. Chiasson, A.D., Spilter, J.D., Rees, S.J. Smith, M.D. "A model for simulating the performance

of a pavement heating system as a supplemental heat rejector with closed-loop ground-source heat pump systems", *ASME journal of solar Energy* (1999).

7. Liu, X. Rees, S.J. Spilter, J.D., "Simulation of a geothermal bridge deck antiicing system and experimental validation", *Proceeding of the Transportation Research Board 82<sup>nd</sup> Annual Meeting* (2002).
8. Liu, X. Development and Experimental Validation of Simulation of Hydronic Snow Melting Systems for Bridges. Ph.D. Thesis. Oklahoma State University. Stillwater, (2005).
9. Liu, X. and J.D. Spilter. 2004. *Simulation Based Investigation on the Design of Hydronic Snow Melting System*. Proceedings of the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting. Washington, D.C. (January 11-15, 2004).
10. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P. introduction to Heat Transfer. Third edition. New York: John Wiley & sons (1996).
11. Diego Patricio Espin Tobar. "Experimental and computational investigation of snow melting on a hydronically heated concrete slab" (1998). <http://www.hvac.okstate.edu/pdfs/>