

بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی انتقال حرارت در آزمایش‌های شار برودتی در دریاچه‌ها

امیر حشمتی‌فر* (دانشجوی دکتری)

میرمصدق جمالی (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۲/۳، ص. ۳۸-۳۳

همواره در طبیعت، انتقال حرارت در محیط‌های آبی اتفاق می‌افتد. سرمای‌ساز سطح، یکی از روش‌های انتقال حرارت در محیط‌های آبی است که در اثر وزش باد، سرد شدن محیط در طول شب و دیگر عوامل اتفاق می‌افتد و می‌تواند باعث ایجاد جریان تبادل شود. اهمیت شناخت پدیده مذکور می‌تواند به شناخت بهتر جریان‌های تبادل‌ی بیانجامد. در نوشتار حاضر، عوامل تأثیرگذار در شار برودتی در آزمایش‌های مدل‌سازی شار برودتی تعیین شده است و نتایج آزمایشگاهی با نتایج حل تحلیلی انتقال حرارت مقایسه شده است. در آزمایش‌ها از مخلوط آب و یخ درون یک مخزن گالوانیزه برای ایجاد شار برودتی استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که جرم آب، یخ و فاصله‌ی کف مخزن گالوانیزه تا سطح آب از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در شار برودتی اندازه‌گیری شده است. به منظور انجام مقایسه، یک مدل تحلیلی انتقال حرارت ارائه و عوامل ایجاد تفاوت بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی شدند. ناپایداری لایه‌ی سرد ایجاد شده در سطح آب و نوسان‌های شار برودتی در آزمایش‌ها، مهم‌ترین عوامل ایجاد اختلاف است.

واژگان کلیدی: شار برودتی، باد، سرمای‌ساز سطح، مدل‌سازی آزمایشگاهی، حل تحلیلی.

۱. مقدمه

همواره در طبیعت، انتقال حرارت بین اجسام مختلف در حال انجام است. انتقال حرارت هدایتی، یکی از انواع انتقال حرارت است که بیشتر در سیالات اتفاق می‌افتد. در طبیعت در اثر سرد شدن هوا، سیالات مختلف علی‌الخصوص آب شروع به سرد شدن می‌کنند که از سطح آن شروع می‌شود و می‌تواند به علت سرد شدن هوا در شب و یا وجود یخ روی سطح آب باشد. از طرفی با کاهش دما و افزایش چگالی، اختلاف چگالی قائم درون آب ایجاد می‌شود که باعث ایجاد جریان تبادل می‌شود.^[۱] لایه‌ی سرد مذکور که در سطح آب تشکیل می‌شود، چگالی بیشتری نسبت به آب موجود در اعماق دارد و در نتیجه‌ی اختلاف چگالی ذکر شده، آب سرد به سمت پایین حرکت می‌کند. این ناپایداری سطحی خود عامل مهمی در آزمایش‌هاست. در شکل ۱، جریان تبادل به صورت شماتیک مشاهده می‌شود.

عامل دیگری که می‌تواند باعث ایجاد جریان تبادل مذکور شود، وزش باد است. با وزش باد بر روی سطوح آب، پدیده‌ی تبخیر سطحی و جدا شدن مولکول‌های آب از سطح تشدید می‌شود. با افزایش تبخیر سطحی، لایه‌ی بالایی شروع به سرد شدن می‌کند که افزایش چگالی لایه‌ی سطح را با خود به همراه دارد. در نتیجه، پس از

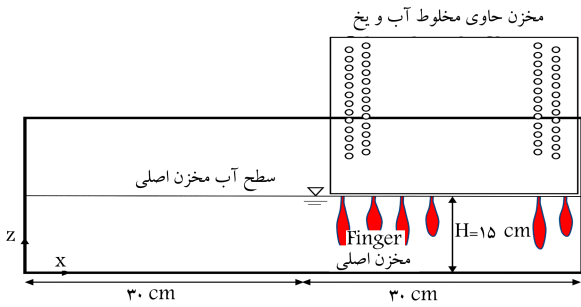
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۰/۱۵، پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۲۸

DOI:10.24200/J30.2018.1418

گذشت زمان، یک لایه‌ی سرد و متراکم در سطح تشکیل می‌شود که به آن پدیده‌ی سرمای‌ساز سطح گفته می‌شود. همچنین در روزهای سرد سال که یک لایه‌ی یخ بر روی سطح آب تشکیل می‌شود، باعث بروز پدیده‌ی سرمای‌ساز سطح می‌شود. اختلاف دمای مذکور باعث می‌شود که سیال در دو عمق متفاوت، اختلاف دما و در نتیجه اختلاف چگالی داشته باشد، بنابراین سیال با چگالی بیشتر به سمت پایین و سیال با چگالی کمتر به سمت بالا و در جهت مخالف حرکت می‌کند. از همین رو، مطالعه‌ی جریان‌های اشاره‌شده، نیازمند مدل‌سازی مناسبی برای پدیده‌ی سرمای‌ساز سطح و همچنین شناخت از نحوه‌ی انتقال حرارت در آزمایش‌های ذکر شده است. در سال ۱۹۸۸، به منظور مدل‌سازی آزمایشگاهی پدیده‌ی سرد شدن سطحی، ابتدا آب درون مخزن را گرم و سپس آن را رها می‌کردند تا آب درون مخزن شروع به سرد شدن کند که باعث می‌شد عوامل محیطی، خطای زیادی در آزمایش‌ها ایجاد کنند.^[۲] برخی پژوهشگران (۲۰۰۱)، نیز به منظور مدل‌سازی آزمایشگاهی سرمای‌ساز سطح از یک ورق استفاده می‌کردند که آن را روی سطح آب قرار می‌دادند و با سرد کردن ورق، آب درون مخزن سرد می‌شد. آن‌ها هیچ‌گونه اطلاعاتی به منظور مقدار شار برودتی معادل آزمایش‌های خود ارائه نکردند که این امر باعث عدم کارایی این‌گونه مدل‌سازی می‌شود.^[۳] همچنین در سال ۲۰۰۹، با استفاده از مدل‌سازی عددی به مطالعه‌ی پدیده‌ی مذکور پرداخته شد و به صورت نوسانی، دمای اولیه‌ی سیال

amir_heshmaty69@yahoo.com
jamali@sharif.edu



شکل ۲. محفظه‌ی گالوانیزه و مخزن مورد استفاده در آزمایش‌ها.



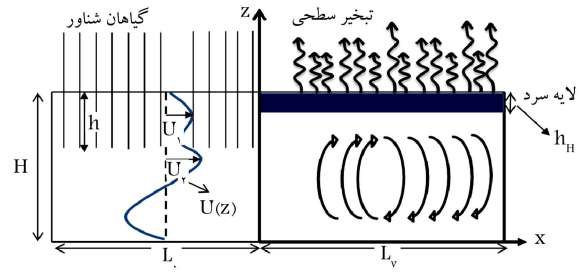
شکل ۳. مجموعه‌ی دماسنج، حس‌گر و مخزن پلاکسی گلاس.

ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و عرض ۱۲ سانتی‌متر انجام شده است. این مخزن از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده است. شار ورودی به کمک مخلوط آب و یخ که درون یک محفظه از جنس گالوانیزه به ضخامت ۰/۴ میلی‌متر قرار داشت، به سطح آب اعمال شد. محفظه‌ی گالوانیزه‌ی موردنظر به طول ۲۶ سانتی‌متر، عرض ۱۱/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰/۵ سانتی‌متر بود. مطابق شکل ۲، بر روی محفظه‌ی مذکور سوراخ‌هایی برای تنظیم ارتفاع قرار داشت. بدین ترتیب که دو میله که درون سوراخ‌ها وجود داشتند، بر روی لبه‌ی مخزن کوچک قرار می‌گرفتند و فاصله‌ی بین کف مخزن گالوانیزه و سطح آب درون مخزن کوچک تنظیم می‌شد. فاصله‌ی بین کف محفظه و سطح آب بیش از ۴ میلی‌متر نبود.

طبق مطالعات انجام‌شده به محض اعمال شار ورودی بر روی سطح آب مخزن اصلی، جریان‌های کوچکی از سطح آب به سمت پایین ایجاد می‌شوند، که به آن‌ها فینگر گفته می‌شود. در حقیقت، فینگرهای مذکور، سیال سردشده در سطح هستند، که کاهش دما داده‌اند و چگالی آن‌ها افزایش یافته است، در نتیجه میل به حرکت به سمت پایین را دارند. از طرفی در طی مسیر حرکت فینگرهای مذکور (مطابق شکل ۲)، چون در مجاورت آب گرم است، دمای آن‌ها افزایش می‌یابد و آب اطراف آن‌ها کمی کاهش دما می‌دهد؛ که در نتیجه حرکت فینگرهای مذکور، خود باعث انتقال حرارت درون مخزن اصلی می‌شود، که کاملاً مشابه اتفاق مذکور، در پدیده‌ی جامدسازی آلیاژهای مختلف روی می‌دهد. حرکت فینگرهای مذکور خود باعث ایجاد گرادیان چگالی در طول مخزن اصلی نیز می‌شود که عامل ایجاد جریان افقی در مخزن اصلی است که به آن‌ها جریان تبدیلی گفته می‌شود.

همچنین از ۲ دماسنج Lutron TM-۹۱۷ با دقت ۰/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد و بسامد ۰/۵ هرتز استفاده شده و هر یک از آن‌ها به یک عدد حس‌گر PT-۱۰۰ به طول ۱۵ سانتی‌متر متصل شده است. شکل ۳، دماسنج، حس‌گر مورد استفاده و مخزن پلکسی مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

به منظور شروع آزمایش سرمایش سطح، ابتدا مخلوط آب و یخ درون مخزن گالوانیزه می‌ریزد و با دماسنج دمای تمامی نقاط آن اندازه‌گیری می‌شود. برای شروع آزمایش باید دمای تمامی نقاط یکسان باشد، زیرا اگر دمای نقاط مختلف متفاوت باشد، باعث می‌شود شار ورودی مساوی به تمامی سطح موردنظر وارد نشود و در



شکل ۱. چگونگی ایجاد جریان تبدیلی و نحوه‌ی توزیع آن.

به مقدار $\frac{\Delta T}{T}$ کاهش و افزایش می‌یافت. مشکل مدل‌سازی ذکرشده، عدم تطابق مدل‌سازی با واقعیت بود. [۴] برخی پژوهشگران (۲۰۰۰) نیز به حل دقیق غیرخطی معادله‌ی انتقال حرارت و انتقال جرم پرداختند و آن را برای حالات مختلف حل و تابع پاسخ را تعیین کردند که می‌تواند برای شرایط مرزی مختلف استفاده شود. [۵] همچنین در سال ۲۰۰۱، انتقال حرارت ناپایدار در یک مخزن مثلثی با روش آنالیز ابعادی و شبیه‌سازی عددی برای شیب‌های کم کف مخزن مطالعه و بررسی شد و در ابتدا به کمک آنالیز ابعادی، رابطه‌ی بر حسب عدد رایلی، عدد گراشوف، عدد پرتل و شیب کف کانال، به‌عنوان عوامل مهم ارائه و سه نوع رژیم جریان براساس عدد رایلی معرفی شد که در شبیه‌سازی عددی، نتایج آنالیز ابعادی تأیید شده است. در پژوهش مذکور، شرایط لایه‌ی حرارتی مرزی و انتقال حرارت برای هر نوع جریان بیان شده و شیب کف کانال همواره ثابت و برابر ۰/۱ بوده است. [۶]

در پژوهش دیگری (۱۹۶۳) نیز ضریب انتقال حرارت در آب‌های سطحی طبیعی مطالعه شد و با اندازه‌گیری و محاسبه‌ی ضریب مذکور برای چندین دریاچه، نتیجه‌گیری شد که اگر شرایط محل دریاچه و اختلاف حرارت آب و هوا مشخص باشد، می‌توان با یک تقریب مناسب از قانون سرمایش نیوتن استفاده و میزان گرمای مبادله‌شده بین هوا و آب در یک دوره را تعیین کرد. [۷]

همچنین برخی پژوهشگران (۱۹۶۰)، شار گرمایی را در دریاچه‌ی مندوتا بررسی کردند و فرایندهای فیزیکی انتقال حرارت در سطح دریاچه و شار حرارتی داخلی برای دریاچه‌ی مندوتا را مطالعه و اندازه‌گیری کردند و نتیجه گرفتند که با در نظر گرفتن آثار برهم‌زنندگی باد و پایداری هیدرواستاتیک، هنگامی که یک ضریب پخش حرارتی در اختیار باشد، با استفاده از معادله‌ی انتقال حرارت فوریه می‌توان توصیف مناسبی از دما و شار حرارتی ارائه کرد. [۸]

به علت آنکه مطالعاتی که تاکنون بر روی مسئله‌ی سرمایش سطح انجام شده است، برای شناخت جریان تبدیلی ناشی از آن و یا شناخت کلی آثار انتقال حرارت بوده است، نحوه‌ی مدل‌سازی سرمایش سطح و همچنین پارامترهای مؤثر در شار ورودی به‌طور خاص مطالعه نشده است که در پژوهش حاضر به‌طور خاص به آن پرداخته شده است. از سوی دیگر، براساس مطالعات انجام‌شده، مهم‌ترین عامل ایجاد جریان تبدیلی، شار ورودی اعمال‌شده بر سطح آب مخزن اصلی است که بیان‌کننده‌ی اهمیت این موضوع است. می‌توان به منظور شناخت دقیق‌تر پدیده‌ی سرمایش، عوامل مؤثر در انتقال حرارت ورودی را نیز در نظر گرفت، اما در این مطالعه چون هدف تعیین مجموع شار ورودی رسیده به سطح آب در مخزن اصلی است، عوامل انتقال حرارت به‌صورت جز به جز مطالعه نشده است.

۲. روش آزمایشگاهی

تمامی آزمایش‌های سرمایش سطح آب، در یک مخزن به طول ۶۰ سانتی‌متر،

- فرض بر آن است که شار برودتی به طور ثابت بر روی سطح ظرف اعمال می شود، پس نتایج مدل باید با نتایج آزمایشی پس از ثابت شدن شار برودتی مقایسه شود. به عبارت دیگر، شرایط اولیه در ابتدای زمان ثابت شدن شار برودتی به مدل اعمال می شود.
- مقدار ضریب هدایت گرمایی آب درون مخزن اصلی با توجه به دمای سطح مشخص می شود. مقدار این ضریب برای دو دمای ۲۰ و ۲۵ درجه ی سلسیوس وجود دارد. برای سایر دماها از درون یابی خطی برای تعیین مقدار ضریب هدایت گرمایی آن دما استفاده می شود.

شکل ۴، شکل مسئله و شرایط مرزی آن را نشان می دهد، که مطابق آن می توان این گونه نتیجه گرفت که شار برودتی به کف مخزن نخواهد رسید. در پژوهشی در سال ۲۰۱۱، نیز با استفاده از یک مدل عددی نشان داده شد که شار حرارتی قادر است تا دمای یک عمق خاص را تغییر دهد.^[۹] به عبارت دیگر، شار برودتی اعمالی تا یک عمق مشخص باعث تغییر دما خواهد شد و از آن به بعد دما ثابت خواهد بود. عمق مخزن برابر L فرض شده است. با توجه به شکل ۴، معادله و شرایط مرزی و اولیه به صورت رابطه ی ۲ تعریف می شود که در آن: α ضریب پخش حرارتی، κ ضریب هدایت گرمایی و T_i دمای اولیه ی سیال است که به عنوان شرط اولیه ($I.C$) استفاده می شود و دو شرط دیگر شرایط مرزی مسئله هستند:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$H_H = -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \quad z = L$$

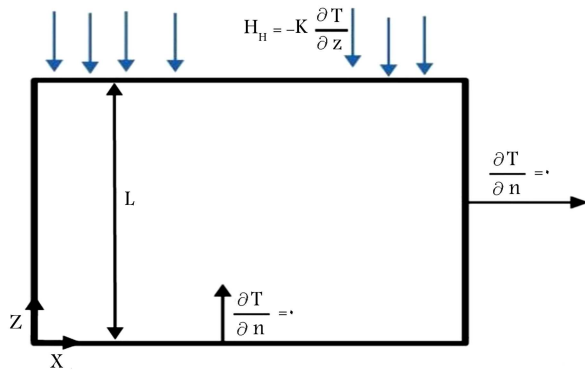
$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad z = 0$$

$$T = T_i \quad 0 \leq z \leq L, t = 0 \quad (2)$$

در نهایت، با حل معادلات ۲، معادله ی پاسخ T به دست خواهد آمد که می توان پاسخ نهایی رابطه ی دما را به صورت رابطه ی ۳ بر حسب عمق و زمان نوشت:

$$T(z, t) = T_i + \frac{H_H L}{\kappa} \left(\frac{1}{3} + \frac{\alpha t}{L^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-2}{(n\pi)^2} \exp\left(-\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \alpha t\right) \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{z}{L}\right)^2 - \frac{z}{L} \right) \quad (3)$$

همان طور که مشاهده می شود، در آن مقدار شار برودتی ثابت فرض شده است که از طریق آزمایش ها تعیین می شود. همین امر می تواند عاملی برای ایجاد اختلاف



شکل ۴. شکل مسئله و شرایط مرزی.

نتیجه، اختلاف شار برودتی ایجاد شده، باعث تغییر میدان سرعت ناشی از پدیده ی مذکور شود.

در ابتدا حس گرهای دماسنج در فاصله ی قائم ۳ میلی متری از یکدیگر قرار گرفتند و آنگاه محل مذکور با خمیر بازی آب بند شد، تا از خروج آب جلوگیری به عمل آید. بعد درون مخزن (هر کدام از مخازنی که برای آن آزمایش استفاده می شود) با آب پر شده است. حس گرهای طوری قرار گرفتند که یکی دقیقاً رو سطح آب باشد، به طوری که یک ضخامت بسیار نازک آب روی آن قرار گیرد و دیگری به فاصله ی ۳ میلی متر پایین تر از آن قرار گرفته است. سپس مخلوط آب و یخ که درون مخزن گالوانیزه آماده شده است، بر روی مخزن کالیبراسیون قرار گرفت و بعد دما توسط دماسنج به کمک حس گرها قرائت شد. سپس با استفاده از رابطه ی ۱، شار برودتی اعمالی از طرف مخلوط آب و یخ بر سطح آب به دست آمد:

$$H_H = -\kappa \frac{\partial T}{\partial Z} \simeq \kappa \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (1)$$

که در آن، H_H شار برودتی و κ ضریب هدایت گرمایی، ΔZ فاصله ی قائم بین دو حس گر و ΔT اختلاف دمایی است که دو حس گر در هر لحظه اندازه می گیرند. باید دقت داشت که در طول انجام آزمایش، دمای مخزن گالوانیزه تغییر نکند؛ به عبارت دیگر، دما همواره صفر باقی بماند تا بتوان شار برودتی را به طور صحیح محاسبه کرد. علت اینکه در آزمایش سعی شده است دمای مخزن مخلوط آب و یخ صفر درجه باشد، فرض اعمال شار برودتی یکنواخت بر روی کل سطح آب است؛ به عبارت دیگر، با ثابت نگه داشتن دمای مخلوط آب و یخ درون مخزن گالوانیزه، شار برودتی یکسانی بر روی سطح آب از طرف مخلوط آب و یخ اعمال می شود. در مورد جرم یخ نیز در یکی از آزمایش ها مشاهده شد هنگامی که جرم یخ نسبت به آب کم است، دمای مخلوط به صفر درجه ی سانتی گراد نمی رسد و مقدار شار برودتی کاهش چشم گیری خواهد داشت. از همین رو سعی شد که در طول آزمایش با هم زدن مخلوط و استفاده از یک دماسنج دمای نقاط مختلف یکسان باقی بماند، تا شار برودتی به طور یکنواخت و مستمر بر سطح آب اعمال شود. همچنین سعی شد برای تعیین شار برودتی، مقدار ضریب هدایت گرمایی برای دمای سطح آب به کمک درون یابی برای دمای اندازه گیری شده توسط دماسنج ها استفاده شود. در نهایت، ۳ عامل جرم آب درون مخزن گالوانیزه، یخ و فاصله ی کف مخزن گالوانیزه تا سطح آب با توجه به شرایط آزمایش و با فرض عدم دخالت محیط آزمایش به عنوان عوامل تأثیرگذار در شار برودتی انتخاب شد و آزمایش هایی به منظور بررسی عوامل مذکور طراحی شدند. منظور از فاصله ی کف مخزن گالوانیزه تا سطح آب که در شکل ۲ نیز مشخص است، فاصله ی بین کف مخزن گالوانیزه تا سطح آب درون مخزن اصلی است. در حین آزمایش فقط همین ۳ عامل می توانند تغییر کنند که به عنوان عوامل اصلی آزمایش مشخص شده اند، البته دمای محیط نیز می تواند در روند آزمایش تأثیر بگذارد که نیاز به مطالعات بیشتر در زمینه ی مذکور است. در مورد باز بودن سطح مخزن آب و یخ، بیان این نکته ضروری است که باز بودن سطح مخزن آب و یخ باعث می شود انتقال حرارت بین مخلوط آب و یخ و هوا ایجاد شود که یکی از عوامل ایجاد خطاست.

۳. حل تحلیلی

ابتدا نکات مهم در بحث مدل انتقال حرارت برای شار برودتی در مخزن آب مطبق و سپس به حل مسئله پرداخته شده است:

- مدل به صورت یک بُعدی است.

جدول ۱. مشخصات و نتایج آزمایش‌ها (M جرم یخ به گرم، m جرم آب به گرم، h_g فاصله‌ی بین سطح آب تا کف مخزن گالوانیزه به سانتی متر، H_H مقدار شار برودتی به ژول بر ثانیه در مترمربع).

Exp No.	M (gr)	m (gr)	M/m	H_H (j/sec.m ²)	h_g (cm)
Calib ۱	۷۲۷	۲۰۴	۳٫۵۶	۸۴	۰٫۴
Calib ۲	۷۲۳	۴۱۰	۱٫۷۷	۵۹	۰٫۴
Calib ۳	۴۰۳	۲۰۱	۲٫۰۰	۵۴	۰٫۴
Calib ۴	۷۲۲	۲۰۴	۳٫۵۴	۴۸	۱٫۶
Calib ۵	۸۳۳	۳۰۵	۲٫۷۳	۵۷	۰٫۴
Calib ۶	۵۰۸	۴۲۸	۱٫۱۹	۲۶	۰٫۴

بین نتایج حل تحلیلی و آزمایشگاهی باشد. ضمناً در مدل تحلیلی حاضر، آثار جریان چرخشی ناشی از قرارگیری سیال سنگین (سرد) بر روی سیال سبک‌تر در مخزن در نظر گرفته نشده است. در مورد شرط مرزی دیواره باید این نکته را بازگو کرد که چون جریان به صورت یک بُعدی در نظر گرفته شده است، دیگر نیازی به اعمال شرط مرزی دیواره به عنوان شرط اضافه نیست، چون باعث می‌شود که معادله بسیار مقید شود.

علت فرض یک بُعدی آن است که در پژوهشی در سال ۲۰۱۵ نشان داده شده است که در ابتدای شروع آزمایش، جریان افقی درون مخزن اصلی بسیار کوچک است و فقط جریان‌های قائم ناشی از ریزش سیال سرد موجود در سطح آب مخزن اصلی وجود دارد، در نتیجه می‌توان از انتقال حرارت جابه‌جایی صرف‌نظر کرد و انتقال حرارت را یک بُعدی در نظر گرفت.^[۱۰]

همچنین با توجه به فرض اعمال یکنواخت شار برودتی از طرف مخلوط آب و یخ و از طریق هوای بین کف مخزن گالوانیزه و سطح آب، بر روی سطح آب، فرض یک بُعدی پدیده ذکر شده انجام شده است که البته هدف از آن بررسی میزان تطابق حل یک بُعدی با نتایج حاصل از آزمایش‌ها به منظور استفاده از مطالعات آتی بوده است که مشاهده شد دقت قابل قبولی دارد. البته می‌توان مسئله را به صورت دو بُعدی نیز بررسی و با پاسخ‌های حل یک بُعدی مقایسه کرد.

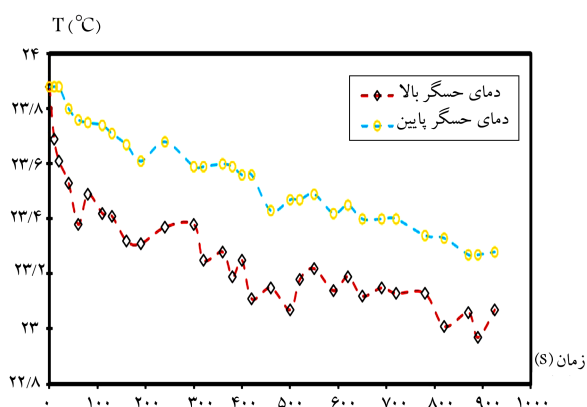
۴. نتایج

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، با انجام آزمایش‌های کالیبراسیون و با استفاده از رابطه‌ی ۱، مقدار شار برودتی تعیین شده است، که مقادیر به دست آمده و مشخصات هر آزمایش مختصراً در جدول ۱ ارائه شده است

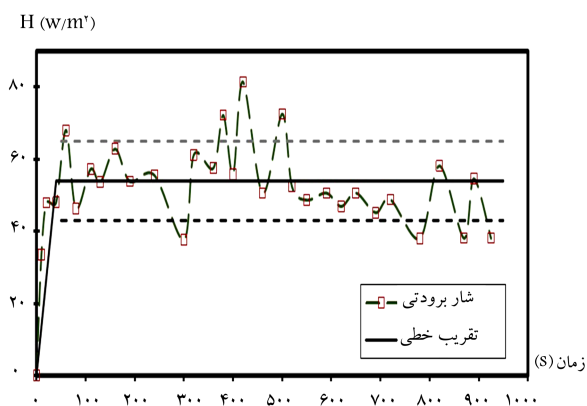
در شکل‌های ۵ و ۶، نحوه‌ی تغییر دمای ثبت‌شده توسط حسگرها و همچنین تغییرات شار برودتی محاسبه‌شده با استفاده از دماهای ثبت‌شده با رابطه‌ی ۱، برای آزمایش Calib ۳ نشان داده شده است. $T_{surface}$ دمای ثبت‌شده توسط حسگر در بالای سطح آب و T_{bottom} دمای ثبت‌شده توسط حسگر پایین است که به مقدار ۳ میلی‌متر پایین‌تر قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شار برودتی در طول زمان انجام آزمایش نوسانی است. در حقیقت مقدار شار برودتی حول یک مقدار ثابت نوسان می‌کند، که مقدار گزارش شده در نوشتار حاضر، مقدار متوسط شار برودتی است.

با مقایسه‌ی آزمایش‌های Calib ۳ و Calib ۱ در جدول ۱، با توجه به اینکه تمامی پارامترها ثابت هستند و فقط جرم یخ تغییر می‌کند، می‌توان دریافت که با کاهش جرم یخ مورد استفاده، شار برودتی مجموع کاهش می‌یابد که به این دلیل است که هر چه یخ کمتری در شرایط یکسان استفاده شود، پتانسیل مخلوط آب و یخ برای ایجاد شار برودتی کاهش می‌یابد و اختلاف دمای کمتری در بین دو لایه‌ی آب توسط حسگرها ثبت می‌شود.

عامل دیگری که در مقدار شار برودتی تأثیر می‌گذارد، مقدار آبی است که در آزمایش استفاده می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های Calib ۱ و Calib ۲، این نتیجه حاصل می‌شود که با وجود ثابت بودن تمامی پارامترها، با افزایش مقدار آب، شار برودتی کمتری ایجاد می‌شود؛ زیرا با افزایش مقدار آب، سرعت ذوب یخ‌ها بیشتر می‌شود. به طوری که در آزمایش‌ها مشاهده شد، یخ‌های آزمایش Calib ۱ پس از تقریباً ۶۰ دقیقه ذوب و یخ‌های آزمایش Calib ۶ پس از ۲۵ دقیقه، تقریباً کاملاً ذوب شدند. همچنین هر چه مقدار آب افزایش می‌یابد، دمای درون مخلوط آب



شکل ۵. دمای ثبت‌شده در آزمایش Calib ۳ ($M = ۴۰۳ gr$; $m = ۲۰۱ gr$; $h_g = ۰٫۴ cm$).



شکل ۶. شار برودتی محاسبه‌شده در آزمایش Calib ۳ (خط چین‌ها بیان‌کننده‌ی انحراف معیار داده‌ها از میانگین است) ($M = ۴۰۳ gr$; $m = ۲۰۱ gr$; $h_g = ۰٫۴ cm$).

و یخ بیشتر می‌شود، به طور مثال در آزمایش‌های Calib ۳، Calib ۵ و Calib ۶ دمای مخلوط آب و یخ درون مخزن گالوانیزه در ابتدای آزمایش به صفر درجه‌ی سانتی‌گراد نمی‌رسید و در حدود ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد بود، اما در آزمایش‌های دیگر، دمای شروع آزمایش، صفر درجه‌ی سانتی‌گراد بود.

دو عامل مذکور را می‌توان به صورت یک پارامتر بی‌بعد (نسبت جرم یخ به جرم آب) بیان کرد و با تعیین آن برای هر آزمایش می‌توان به این نکته پی برد که در زمان

جدول ۲. مقایسه‌ی دمای آزمایش و دمای محاسبه‌شده از مدل تحلیلی (t_i): زمان ثابت شدن شار برودتی، t : زمان انتخاب‌شده، H_H : شار برودتی مربوط به هر آزمایش، ΔT_{Exp} : اختلاف دمای مشاهداتی در آزمایش‌ها، ΔT_{Anl} : اختلاف دمای حاصل از مدل تحلیلی).

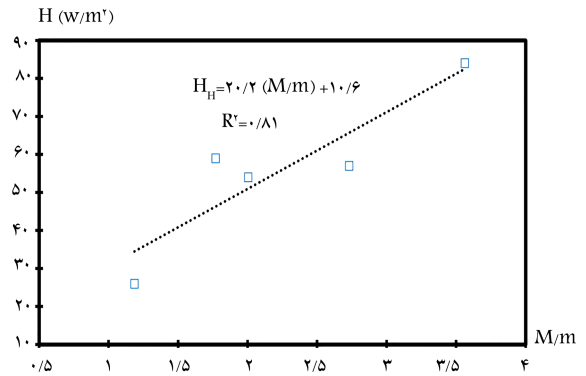
ΔT_{Anl}	ΔT_{Exp}	H_H ($j/sec.m^2$)	t (sec)	t_i (sec)	Exp No.
۰٫۲۱	۰٫۱۴	۸۴	۵۳۰	۳۵۷	Calib۱
۰٫۱۹	۰٫۰۷	۵۹	۲۳۰	۵۰	Calib۲
۰٫۲۱	۰٫۱۶	۵۴	۲۴۰	۴۰	Calib۳
۰٫۱۹	۰٫۱۲	۴۸	۳۶۰	۱۶۰	Calib۴
۰٫۱۸	۰٫۱۵	۵۷	۴۳۰	۲۴۰	Calib۵
۰٫۰۸	۰٫۰۶	۲۶	۲۳۰	۴۰	Calib۶

است. همچنین در حل تحلیلی مسئله، هیچ‌گونه انتقال حرارتی با محیط اطراف وجود ندارد؛ در صورتی که مخزن آب در آزمایشگاه در تماس با هواست و یک انتقال حرارت بین مخزن کالیبراسیون و محیط اطراف وجود دارد، که باعث بروز خطا در بین نتایج آزمایشگاهی و حل تحلیلی می‌شود. به عبارت دیگر، انتقال حرارت بین مخلوط آب و یخ از دو مسیر انجام می‌شود: اولین مسیر انتقال حرارت، بین مخلوط آب - یخ و هواست که باعث انتقال بخشی از شار برودتی ایجادشده توسط مخلوط آب و یخ از طریق هوا به محیط مجاور می‌شود؛ دومین مسیر انتقال حرارت از طریق کف مخزن گالوانیزه است که به سطح آب اعمال می‌شود و در آزمایش‌های پژوهش حاضر اندازه‌گیری شده است. پس می‌توان گفت مقدار شار برودتی اندازه‌گیری شده، تمامی شار برودتی ایجادشده توسط مخلوط آب و یخ نیست و فقط بخشی از آن است، که خود می‌تواند یکی از عوامل تغییر شار برودتی اندازه‌گیری شده در مدت زمان انجام آزمایش باشد. البته مقدار شار برودتی برای محاسبه‌ی دمای آب مخزن اصلی توسط پاسخ تحلیلی ثابت در نظر گرفته شده است و از نتایج آزمایش تعیین می‌شود که باعث کاهش خطاست، زیرا عیناً از نتایج آزمایش استفاده می‌شود. در روش آزمایشگاهی، از مقادیر شار برودتی به‌دست آمده از زمانی که نسبتاً ثابت شده است، یک میانگین‌گیری زمانی انجام و به‌عنوان شار برودتی هر آزمایش ارائه شده است. در طول هر آزمایش مشاهده شد که شار برودتی مذکور به علت نوسان‌های دمای اندازه‌گیری شده نوسان می‌کند و حتی در یک آزمایش دوباره به صفر می‌رسد و این خود به‌عنوان عامل بسیار مهمی در نتایج تأثیرگذار است.

همچنین عاملی دیگر، که در آزمایش‌ها اتفاق می‌افتد، ناپایداری لایه‌ی سرد و حرکت رو به پایین آن است که در هیچ‌یک از معادلات حل تحلیلی مد نظر قرار نگرفته است و می‌تواند عاملی برای ایجاد خطا بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی باشد. ریزش لایه‌ی سرد ذکرشده، خود باعث ایجاد جریان قائم می‌شود که باعث انتقال لایه‌ی سرد به سمت پایین می‌شود و در نتیجه باعث ایجاد خطا و اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی است. همچنین جریان افقی ناشی از اختلاف چگالی افقی نیز باعث می‌شود در حین آزمایش، آب گرم مجاور به سمت محل اعمال شار برودتی حرکت کند و بر دمای نشان داده‌شده توسط حس‌گرها تأثیر بگذارد.

۵. نتیجه‌گیری

مدل‌سازی آزمایشگاهی فرایند انتقال حرارت، به نحوی که بتوان مؤلفه‌های آن را اندازه‌گیری کرد، اهمیت خاصی دارد. مدل‌هایی که تاکنون ارائه شده‌اند، یا دقت کافی



شکل ۷. نمودار شار برودتی بر حسب نسبت جرم یخ به جرم آب برای آزمایش‌های Calib ۱، Calib ۲، Calib ۳، Calib ۵، Calib ۶.

کاهش پارامتر مذکور، شار برودتی اعمالی از سمت مخلوط آب و یخ کاهش می‌یابد. مثلاً برای آزمایش‌های Calib ۱، Calib ۲، Calib ۳، Calib ۵، Calib ۶ مقدار آن در حال کاهش بوده است که در نتیجه، شار برودتی نیز کاهش یافته است.

به منظور بررسی پارامتر نسبت جرم یخ به جرم آب، مقدار شار برودتی بر حسب نسبت جرم یخ به جرم آب برای آزمایش‌های Calib ۳، Calib ۵، Calib ۶، Calib ۱ و Calib ۲ در شکل ۷ ترسیم شده است. در تمامی آزمایش‌های مذکور، مابقی پارامترهای آزمایش، ثابت بوده و فقط پارامتر نسبت جرم یخ به جرم آب تغییر کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طورکلی هر چه مقدار نسبت جرم یخ به آب افزایش یابد، شار برودتی نیز بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است در یکی از آزمایش‌ها، فقط درون مخزن گالوانیزه یخ قرار داده شد و مشاهده شد که یخ به تنهایی توانایی ایجاد شار برودتی زیادی ندارد، به‌طوری که حس‌گرها تغییر دمایی را پس از چند دقیقه نشان ندادند. به همین دلیل در جدول ۱، آزمایش مذکور بیان نشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب رگرسیون برای خط برازش داده‌شده برابر ۰٫۸۱ است که نسبتاً خوب است. و نیز همان‌طور که ذکر شد، مقدار شار برودتی برای هر آزمایش به‌صورت تقریبی بیان شده است و یکی از عوامل ایجاد خطا و عدم تطابق داده‌ها و نمودار می‌تواند همین عامل باشد.

به منظور بررسی اثر فاصله‌ی مخزن گالوانیزه تا سطح آب، آزمایش Calib ۴ انجام شد تا نتایج آن با آزمایش Calib ۱ مقایسه شود. همان‌طور که از نتایج مشخص است، افزایش فاصله‌ی مخزن از سطح آب باعث کاهش شار برودتی می‌شود. این را نیز می‌توان به این صورت توجیه کرد که مقدار ضریب هدایت گرمایی هوا از مقدار ضریب هدایت گرمایی آب بسیار کمتر است، در نتیجه شار برودتی ناشی از مخلوط آب و یخ درون مخزن گالوانیزه که از طریق ذرات هوا به سطح آب می‌رسد، کمتر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با ۴ برابر شدن فاصله، مقدار شار حرارتی تقریباً نصف می‌شود.

در مورد مدل تحلیلی نیز باید این نکته را بازگو کرد که محاسبات برای $n = 10$ انجام شده است. همچنین برای بررسی نتایج با یکدیگر، دمای آب در تراز حس‌گر اول، که تقریباً ۱ میلی‌متر تا سطح آب فاصله دارد، مینا قرار گرفته است. لذا با در نظر گرفتن شرایط مذکور، اختلاف دمای دو حس‌گر بر مبنای مدل تحلیلی (ΔT_{Anl}) مطابق جدول ۲ به‌دست می‌آید.

حال عوامل تفاوت بین نتایج آزمایشگاهی و مدل تحلیلی بیان می‌شود: یکی از علت‌های خطای موجود، نوع مدل تحلیلی است. در حل تحلیلی، مسئله به‌صورت یک بعدی حل می‌شود، در صورتی که در روش آزمایشگاه این‌گونه نیست و دو بعدی

و عوامل ایجاد اختلاف و خطا شناسایی شده است. به نظر می‌رسد نوسان‌های شار برودتی در حین آزمایش و همچنین جریان تبدیلی قائم ایجاد شده در هنگام انجام آزمایش، ناشی از ناپایداری سطحی و خطاهای ناشی از شرایط محیطی، مهم‌ترین عوامل ایجاد خطا بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی هستند. در انتها می‌توان گفت مدل آزمایشگاهی پیشنهادی در نوشتار حاضر، تطابق نسبتاً مناسبی با واقعیت دارد و حل تحلیلی نیز با تقریب مناسبی می‌تواند استفاده شود.

و یا مدل‌سازی دقیق و مناسبی از واقعیت مسئله نداشته‌اند. همچنین مؤلفه‌های تأثیرگذار در آن‌ها و مقدار شار برودتی مشخص نبوده است. در همین راستا، در پژوهش حاضر به طراحی یک مدل‌سازی مناسب از واقعیت مسئله و تعیین مؤلفه‌های تأثیرگذار در شار برودتی در مدل‌سازی حاضر و بررسی هر کدام از عوامل مذکور پرداخته شده است. همچنین به حل تحلیلی مسئله با توجه به روابط انتقال حرارت و شرایط مرزی پرداخته و نتایج حاصل از حل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه

پانوشتها

1. finger
2. solidification

منابع (References)

1. Heshmatifar, A. "Study of surface evaporation currents due to wind-induced in aquatic canopy areas with floating vegetation", M.Sc. thesis, Sharif University of Technology (2015).
2. Horsch, G.M. and Stefan, H.G. "Convective circulation in littoral waters due to surface cooling", *Limnology Oceanography*, **33**(5), pp. 1068-1083 (1988).
3. Sturman, J.J. and Oldham, C.E. "The effect of emergent vegetation on convective flushing in shallow wetlands: Scaling and experiments", *Limnol Oceanogr.*, **46**(6), pp. 1486-1493 (2001).
4. Bednarz, T.P., Lei, C. and Patterson, J.C. "Unsteady natural convection induced by diurnal temperature changes in a reservoir with slowly varying bottom topography", *International Journal of Thermal Sciences*, **48**(10), pp. 1932-1942 (2009).
5. Polyanin, A.D., Zhurov, A.I. and Vyaz'min, A.V. "Exact solutions of non-linear heat- and mass- transfer equations", *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, **34**(5), pp. 403-415 (2000).
6. Lei, C. and Patterson, J.C. "Unsteady natural convection in a triangular enclosure induced by absorption of radiation", *Journal of Fluid Mechanic*, **460**, pp. 181-209 (2001).
7. Williams, G.P. "Heat transfer coefficients for natural water surface", *National Research Council, Canada, Division of Building Research*, **62**, pp. 203-212 (1963).
8. Dutton, J.A. and Bryson, R.A. "Heat flux in lake MENDOTA", 2, University of Wisconsin, Department of Meteorology, Technical Report Series A (1960).
9. Tohidi, A. "Investigation wind-induced currents in sloped aquatic canopy areas", M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology (2011).
10. Heshmatifar, A. and Jamali, M. "A Study of effect of floating vegetation on the formation of exchange flow", 10th International Congress on Civil Engineering, University of Tabriz (2015).