

بررسی تجربی تأثیر زبری سطح بر تشکیل برفک روی استوانه*

بهروز بهروزی^(۱) حسن بصیرت تبریزی^(۲) ابراهیم دامنگیر^(۳)

چکیده تشکیل برفک اثرات مهمی در بسیاری از زمینه‌ها از جمله صنعت تبرید، تهویه مطبوع، حمل و نقل هوایی و غیره دارد. هنگامی که هوای مرطوب نزدیک سطح سرد به زیر دمای انجماد آب برسد برفک تشکیل می‌شود. تشکیل برفک پدیده پیچیده‌ای است که انواع مکانیزم-های انتقال حرارت و جرم به‌طور هم‌زمان در حال وقوع است. در این کار به‌صورت تجربی، تأثیر زبری بر تشکیل برفک در استوانه افقی تحت جریان جابه‌جایی اجباری مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای ایجاد جریان اجباری از تونل باد استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد، ضخامت برفک در پشت استوانه بیشینه و در جلوی استوانه کمینه می‌باشد. با ایجاد زبری بیشتر روی سطح میزان ضخامت برفک بیشتر می‌شود و هرچه سطح زیر ایجاد شده دارای ضریب انتقال حرارت بیشتری باشد میزان ضخامت برفک بیشتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی استوانه سرد، انتقال حرارت و جرم، برفک، جابه‌جایی اجباری، زبری دیواره.

Experimental Study of Wall Roughness Effects on the Frost Formation over a Cylinder

B. Behroozi H. Basirat Tabrizi E. Damangir

Abstract Frost formation has important effects on many fields, such as refrigeration industry, air-conditioning, aviation, etc. The frost develops when a humid air contacts with a cooler surface at its freezing point. Frost formation is a complicated transient phenomenon in which a variety of heat and mass transfer mechanisms are taking place simultaneously. In this work, effect of roughness on frost formation over horizontal cylinder in force convection conditions was investigated experimentally. For creating the force flow field, a wind tunnel was used. Results indicated that the frost thickness behind the cylinder is at the maximum and in the front of cylinder is in the minimum. Further increasing of the wall roughness, result in the frost thickness increases and increasing the thermal conductivity coefficient of rough surface, increases the frost thickness too.

Key Words Cold cylinder; Heat and mass transfer; Frost; Force convection; Wall roughness.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۱/۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

bbehroozi@mail.kntu.ac.ir

(۲) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

(۳) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

مقدمه

برفک ارائه دادند. جواب‌های آنها به‌شدت به رابطه ارائه‌شده برای چگالی وابسته بود و این امر دقت کار را کاهش می‌داد. امینی و همکاران [7] به بررسی تجربی جابه‌جایی طبیعی تشکیل برفک در مبدل لوله-پره با دمای 10-، 15- و 20- پرداختند. آنها برای شرایط محیطی مختلف، ضخامت و چگالی برفک را برحسب زمان به‌دست آوردند. چن و همکاران [8] به بررسی تجربی جابه‌جایی طبیعی تشکیل برفک در فشار پایین پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که فشار محیط نقش مؤثری بر تشکیل برفک دارد. کاهش فشار محیط باعث تأخیر در تشکیل برفک می‌شود و هرچه فشار کاهش یابد، کریستال‌های اولیه تشکیل برفک شکل منظم‌تری به‌خود می‌گیرند.

کیم و همکاران [9] به بررسی میکروسکوپی مراحل اولیه تشکیل برفک بر روی سطح آب‌گریز پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش زاویه تماس سطح، ارتفاع کریستال‌های اولیه برفک بیشتر می‌شود و همچنین قطر کریستال و چگالی برفک کاهش می‌یابد. همچنین آنها رابطه همبستگی برای تشکیل برفک ارائه کردند. لیو و همکاران [10] به بررسی تشکیل برفک روی سطح سرد کرایوژنیک در شرایط جابه‌جایی طبیعی پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد اولین کریستال‌های برفک برای سطح کرایوژنیک در دمای سطح کمتر از 165- درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. جانگ و همکاران [11] به بررسی تجربی تأثیر هوای محیط و ذرات درون آن بر تشکیل برفک روی سطح صاف سرد پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد هرچه غلظت ذرات بیشتر باشد، ضخامت برفک و ارتفاع کریستال‌های تشکیل‌شده بیشتر می‌شود.

در این تحقیق به بررسی تجربی تأثیر زبری سطح بر روی ضخامت برفک پرداخته شده‌است. همان‌گونه که در مقالات ذکر شده‌است، بیشتر تحقیقات بر روی جریان طبیعی انجام شده و مطالعات کمی بر روی

تشکیل برفک پدیده متداولی در مبدل‌های حرارتی در محیط سرد محسوب می‌شود. هنگامی که هوای مرطوب نزدیک سطح سرد به دمای زیر دمای انجماد آب برسد برفک تشکیل می‌گردد [1]. وجود برفک کم و بیش مشکلاتی را ایجاد می‌کند؛ از جمله در مبدل‌های هوایی گرچه عملکرد حرارتی مبدل در مراحل اولیه تشکیل برفک به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت به میزان کمی افزایش می‌یابد ولی با گذشت زمان نه تنها این مشخصه از بین می‌رود، بلکه برفک به‌عنوان یک عایق حرارتی بین سطح سرد و جریان آزاد هوا عمل می‌نماید و مشخصه‌های انتقال حرارت را به‌شدت کاهش می‌دهد [2].

تشکیل برفک در وسیله‌های حمل‌ونقل نیز اثرهای قابل توجهی دارد. تشکیل برفک بر روی بال‌های هواپیما وضعیت آیرودینامیکی آن را تغییر می‌دهد و اثر نامطلوبی بر حرکت هواپیما دارد. این معضل در صنعت حمل‌ونقل ریلی نیز وجود دارد که با یخ‌زدگی سوپاپ‌های ترمز سبب بروز مشکل در کنترل قطار می‌گردد و نیز در بزرگراه‌ها با یخ‌زدن سطح جاده موجب لغزندگی سطح می‌شود [3].

کارهای اولیه در زمینه مرحله جوانه‌زنی برفک توسط فلچر [4] انجام گردید و مرحله‌های تشکیل برفک را به دو مرحله جوانه‌زنی و رشد کریستالی برفک تقسیم کرد. پروسه جوانه‌زنی نیازمند آن است که جوانه‌ها بر انرژی گیبس تغییر فاز غلبه کنند و این زمانی رخ می‌دهد که جزء بخار در حالت فوق‌اشباع باشد. ساندرز [5] تحقیق‌های خود را بر روی علت عدم یکنواختی تشکیل برفک روی سطح متمرکز کرد و بیان نمود که ناهماهنگی انرژی سطح، بر تشکیل اولیه برفک اثرگذار است. راجو و شریف [6] به صورت تحلیلی تشکیل برفک و انتقال حرارت را در یک کانال دایروی بررسی کردند. آنها روابطی را برای به‌دست آوردن ضرایب مختلف از جمله ضخامت برفک و چگالی



شکل ۲. نمای از استوانه (تبخیرکننده)

همان‌گونه که در شکل (۳) نیز قابل مشاهده است، مبرد داغ خروجی از کمپرسور از سمت بالای چگالنده وارد می‌شود و پس از طی مسیر از سمت پایین چگالنده خارج می‌گردد. مبرد پس از خروج از چگالنده به حالت مایع مادون سرد می‌باشد. در اینجا برای افت فشار و دمای مبرد، آن را از یک وسیله اختناق عبور می‌دهند. این وسیله می‌تواند یک شیر انبساط و یا یک لوله موئین با طول زیاد باشد. لوله موئین معمولاً در سیستم‌های با کمینه دمای 15- درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود؛ اما در سیستم‌هایی که نیاز به دمای کمتری دارند از شیر انبساط استفاده می‌شود. شیر انبساط در مسیر مبرد خروجی از چگالنده قرار می‌گیرد. دهانه اریفیس شیر انبساط، به دو ترتیب قابل کنترل است. یکی با استفاده از یک پیچ دستی که در بیرون شیر قرار دارد و برای تنظیم توان عبور دهی مبرد (و در نتیجه توان سیستم) استفاده می‌شود و دیگری به وسیله اکولایزر.



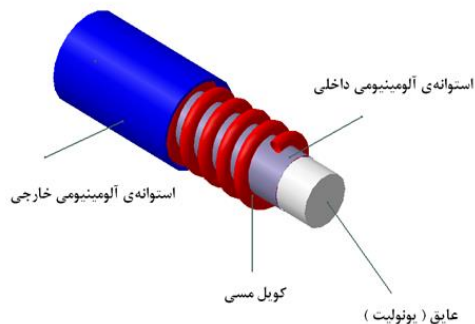
شکل ۳. شماتیک کمپرسور و کندانسور

تشکیل برفک در جریان اجباری در تونل باد انجام گرفته‌است. در این مطالعه جریان اجباری ایجاد شده در تونل باد و با در نظر گرفتن زبری سطح که در مقالات پیشین به آن نپرداخته‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بیان مسئله

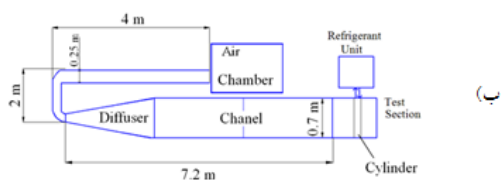
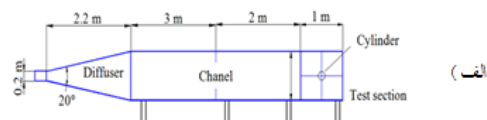
در این تحقیق دمای سطح استوانه 14.6- درجه سانتی‌گراد، دمای هوای محیط 25 درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی 45 درصد و سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌است و ضخامت برفک در بالا، جلو و پشت استوانه برای سطح صاف، سطح فولادی و سطح برنجی با زبری متفاوت بررسی شده‌است.

شرح دستگاه آزمایش. هسته اصلی این آزمایش را یک تبخیرکننده به شکل استوانه تشکیل می‌دهد (شکل‌های ۱ و ۲). تبخیرکننده 35 متر لوله مسی نمره 8 می‌باشد و به دمای کمینه 40- درجه سانتی‌گراد می‌رسد. تمام اندازه‌های دیگر دستگاه تابع شکل و اندازه تبخیرکننده است. مبرد مناسب استفاده شده برای شرایط این آزمایش، گاز R502 می‌باشد که با توجه به خاص بودن گاز تنها یک نوع کمپرسور ($\frac{3}{4}$ hp دانفوس (Danfus) ساخت آلمان غربی) سازگار با این گاز استفاده شده‌است (شکل ۳).



شکل ۱. شماتیک سه‌بعدی استوانه تبخیرکننده

می باشد. این کانال از اسکلتی از نبشی آهنی و با بدنه‌ای از ورق گالوانیزه ساخته شده است (شکل ۴- الف). همچنین یک دیفیوزر با زاویه 10 درجه و طول 2.2 متر به کانال اولیه اضافه شده است (شکل ۴- الف). برای جلوگیری از ورود مستقیم جریان از فن به درون کانال، با استفاده از یک کانال به شکل U به طول 2 متر و سطح مقطع 20 در 25 و اتصال یک سر آن به دیفیوزر و سر دیگر آن به یک کانال 4 متری با سطح مقطع 20 در 25 (این کانال به صورت موازی با کانال بزرگتر نصب شده است نه به صورت سری) و اتصال مجموعه فن به آنها، تا حد فوق العاده زیادی از ورود نوسان‌های فن به درون کانال جلوگیری شد و جریان درون کانال به یکنواختی لازم رسید (شکل ۴- ب).



شکل ۴ الف) نمای روبه روی دستگاه تونل باد،
ب) نمای بالای دستگاه تونل باد

محفظه کنترل جریان. برای تولید جریان با شرایط ورودی‌های دلخواه از یک محفظه مکعبی استفاده شده است که درون آن یک فن با توان 1.5 اسب بخار و تک‌فاز قرار دارد. برای ایجاد رطوبت مورد نیاز در جریان اجباری هوای مرطوب از یک لوله پلاستیکی که دارای منفذهای بسیار ریز می باشد استفاده شده است.

وسایل اندازه‌گیری. در انجام آزمایش‌های مربوط به رشد برفک، پارامترهای گوناگونی وجود دارد که برخی از آنها مثل سرعت هوا باید پیش از شروع آزمایش

اکولایزر یک ترموستات است که سر حسگر آن را در جای مناسب قرار می دهند. (در اینجا به ابتدای لوله خروجی تبخیرکننده وصل شده است.) در موقع کار کردن سیستم، این قسمت با حس کردن سرمای محل قرارگیری خود، می تواند پیام بسته شدن یا باز شدن کامل را به اریفیس بدهد. با این کار دبی جریان مبرد به درون تبخیرکننده و در نتیجه سرمای آن قابل کنترل است. مسیر خروجی شیر انبساط به درون تبخیرکننده قرار دارد.

تونل باد. برای ایجاد جریان اجباری از تونل باد استفاده شده است. تونل باد از چهار قسمت اصلی تشکیل می شود:

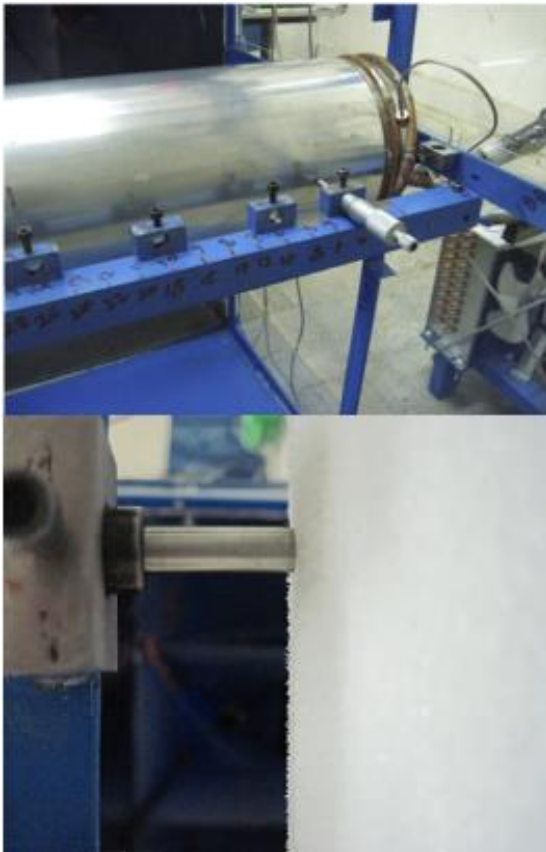
- بخش تست و محل قرارگیری استوانه مورد آزمایش، کانال‌ها و نازل، محفظه کنترل جریان و وسیله‌های اندازه‌گیری.
- بخش تست و محل قرارگیری استوانه مورد آزمایش

طول استوانه مورد بررسی 70 سانتی‌متر و قطر آن 15.6 سانتی‌متر می باشد. بخش تست که استوانه مورد بررسی در آن قرار دارد، دارای عمق، ارتفاع و طول به ترتیب 70، 90 و 80 سانتی‌متر است (شکل ۲). این قسمت از یک اسکلت از جنس نبشی آهنی ساخته شده و در کف آن ورق گالوانیزه قرار گرفته است. در سه سمت دیگر آن برای سهولت در دید از ورقه‌های پلکسی گلاس استفاده شده است. همچنین برای دسترسی آسان به استوانه و نصب وسایل اندازه‌گیری، یک سمت آن دری لولادار در نظر گرفته شده است.

کانال‌ها و نازل. باتوجه به این‌که این مجموعه (استوانه و بخش تست) باید به کانال موجود در آزمایشگاه انرژی متصل گردد تا سیرکولاسیون هوا صورت گیرد ساخت کانال صورت گرفت. طول این کانال 5 متر و سطح مقطع آن 90 در 70 سانتی‌متر

برای این که دمای سر عمق سنج با دمای برفک هم اندازه باشد و سر عمق سنج سبب ذوب شدن برفک نشود، در طی انجام آزمایش، عمق سنج بر روی صلیب طوری قرار می گیرد که سر آن بر روی استوانه سرد قرار گیرد و دمای آن با سطح سرد به تعادل برسد.

به علاوه برای این که لحظه مماس شدن سر عمق سنج با برفک ها به خوبی دیده شود، از یک عدد ذره بین با بزرگ نمای مناسب استفاده شده است تا بتوان به خوبی این لحظه را دید.



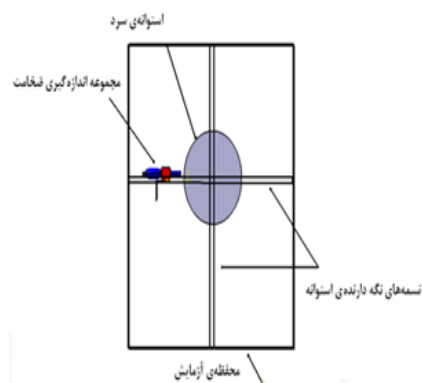
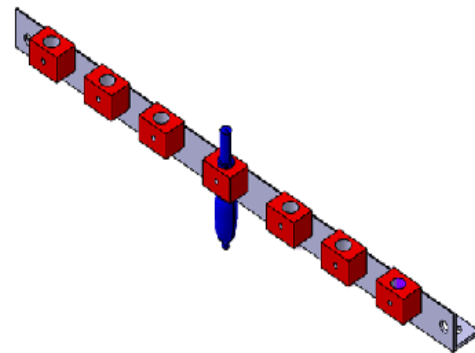
شکل ۶ نحوه اندازه گیری ضخامت برفک

رطوبت نسبی هوا. رطوبت نسبی هوای مرطوب توسط یک رطوبت سنج دیجیتالی با دقت 1 درصد اندازه گیری شده است.

دمای استوانه و هوا. بر روی استوانه به جز درجه حرارت، گرادیان دما در راستای طول استوانه و گرادیان

تنظیم شوند و در طول آزمایش دیگر نیازی به کنترل ندارند. در این آزمایش اندازه گیری سرعت جریان هوا توسط یک سرعت سنج توربینی انجام شده است.

ضخامت برفک. برای اندازه گیری ضخامت برفک در ابتدا و قبل از برفک زدن سطح استوانه، عمق سنج با دقت $\pm 0.01 \text{ mm}$ بر روی نبشی (نگه دارنده عمق سنج) در جای خود ثابت می شود و فاصله نبشی از سطح استوانه خوانده می شود (شکل ۵ وسیله اندازه گیری ساخته شده برای اندازه گیری ضخامت برفک و محل قرارگیری آن را نشان می دهد و شکل ۶ نحوه اندازه گیری ضخامت برفک را نشان می دهد). سپس نبشی برداشته می شود و بعد از روشن شدن دستگاه و پس از طی زمان مطلوب دوباره نبشی گذاشته می شود و فاصله نبشی از سطح برفک دوباره خوانده می شود. با کم کردن این دو عدد از یکدیگر ضخامت برفک به دست می آید.



شکل ۵ وسیله اندازه گیری ضخامت برفک و محل قرارگیری آن

$$\frac{\partial T_a^*}{\partial Fo} + (\text{Re} \cdot \text{Pr}) u_i \frac{\partial T_a^*}{\partial x_i} = \frac{\partial^2 T_a^*}{\partial x_i^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega_a}{\partial Fo} + (\text{Re} \cdot \text{Pr}) u_i \frac{\partial \omega_a}{\partial x_i} = \frac{1}{Le} \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^2} = \frac{Pr}{Sc} \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^2} \quad (5)$$

که در معادله (۵) فرض می‌شود که عدد لویس ثابت باشد [2].

مطابق معادلات (۵-۱) در جریان اجباری هوای مرطوب، ضخامت برفک تابعی از متغیرهای بی‌بعد زیر می‌باشد [2].

$$\delta = f(\text{Re}, \text{Fo}, \omega_{air}, T_a^*, T_p^*) \quad (6)$$

که در آن، δ ضخامت برفک برحسب Re عدد رینولدز ($\text{Re} = \frac{ud}{\nu}$)، Fo عدد فوریه ($\text{Fo} = \frac{\alpha t}{d^2}$)، ω_{air} نسبت رطوبت، T_a^* دمای بی‌بعد هوا ($T_a^* = \frac{T_a + 273.15}{T_p}$)، T_p^* دمای بی‌بعد استوانه ($T_p^* = \frac{T_p + 273.15}{T_p}$) می‌باشد.

در نتیجه باتوجه به رابطه (۶) پارامترهای اندازه‌گیری مؤثر ضخامت برفک، دمای سطح، دمای محیط، رطوبت هوا، ظرفیت گرمایی و سرعت هوای محیط می‌باشد.

بررسی نتایج

در ابتدا تأثیر سرعت بر روی ضخامت برفک برای سطح صاف و سپس تأثیر دمای سطح بر ضخامت برفک برای سطح زیر فولادی با تعداد مش 50 بررسی می‌شود و پس از آن تأثیر سطح فولادی با زبری متفاوت بر ضخامت برفک مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در انتها به بررسی تأثیر جنس سطح زبر بر روی ضخامت برفک پرداخته می‌شود.

دما در راستای محیطی باید اندازه‌گیری شود.

برای اندازه‌گیری دمای هوای ورودی نیز از ترموکوپل نوع k استفاده شده است که دقت 0.1 درجه سانتی‌گراد دارد. اندازه‌گیری دما در راستای محیطی، توسط چهار پروب در یک مقطع و در چهار زاویه اصلی از نقطه سکون بر روی سطح ثابت می‌شوند و بعد از نیم ساعت از شروع به کار سیستم تبرید، ترمومتر بر روی حالت داده‌برداری خودکار قرار می‌گیرد تا هم تغییر دما در طی زمان و هم در راستای محیطی را ذخیره کند. تغییر در طی زمان دارای نوسان‌های بسیار کم با دامنه 0.2 درجه است. این عمل در چهار مقطع انجام شد که نتیجه آن بسیار مشابه با مقطع اولیه بود. برای اثبات تکرار پذیر بودن این رفتار، این عمل سه دفعه تکرار شد که همبستگی مناسبی بین داده‌ها مشاهده شد. استفاده از ژل سیلیکون به این علت است که این ژل دارای ضریب هدایت حرارتی بسیار بالا می‌باشد و خطای کمی را در اندازه‌گیری ایجاد می‌کند. همچنین از حرکت سر پروب می‌تواند جلوگیری کند.

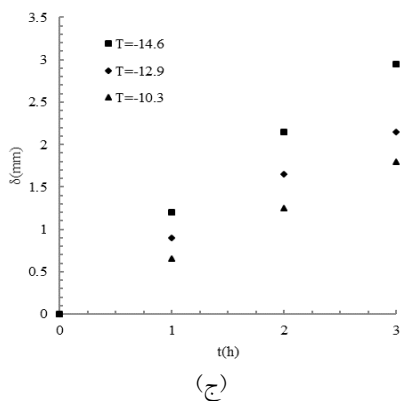
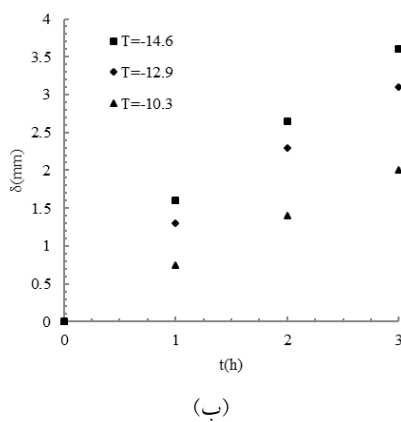
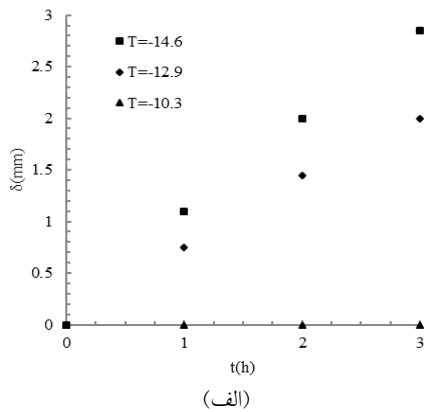
بررسی پارامترهای مؤثر برای اندازه‌گیری. معادلات انرژی و انتقال جرم استفاده شده مطابق رابطه (۱ و ۲) می‌باشد [2].

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (1)$$

$$\rho_a \frac{\partial \omega_a}{\partial t} + \rho_a u_i \frac{\partial \omega_a}{\partial x_i} = \rho_a D \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^2} \quad (2)$$

با استفاده از رابطه (۳)، روابط (۱ و ۲) به صورت بدون بعد مطابق رابطه (۴ و ۵) می‌باشد.

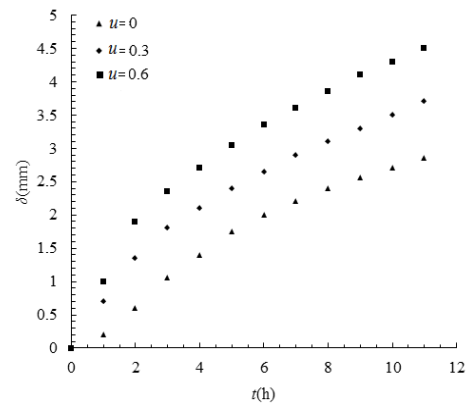
$$y_f^* = \frac{y_f}{d}, T_p^* = \frac{T_{pipe}}{T_{tp}}, T_a^* = \frac{T_{air}}{T_{tp}}, T_{fs}^* = \frac{T_{air} - T_{fs}}{T_{air} - T_{pipe}} \quad (3)$$



شکل ۸ میزان ضخامت برفک برای دمای سطح مختلف و برای سطح فولادی دارای زبری با تعداد مش 50 در (الف) جلوی استوانه، (ب) پشت استوانه و (ج) بالای استوانه

مطابق شکل (۹) هرچه تعداد شبکه سطح افزایش یابد یا به عبارتی زبری سطح کاهش یابد، ضخامت برفک کاهش می یابد که این نتیجه برای جلو، بالا و پشت استوانه مشابه می باشد و همچنین سطح صاف دارای کمترین ضخامت است.

مطابق شکل (۷) با افزایش سرعت، عدد رینولدز و ضریب های انتقال حرارت و جرم نیز افزایش می یابد و با زیاد شدن انتقال جرم، مقدار رشد برفک نیز زیاد و ضخامت برفک زیاد می گردد.

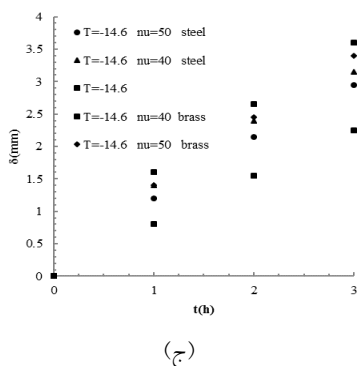
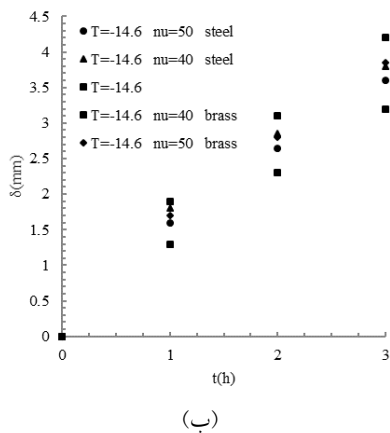
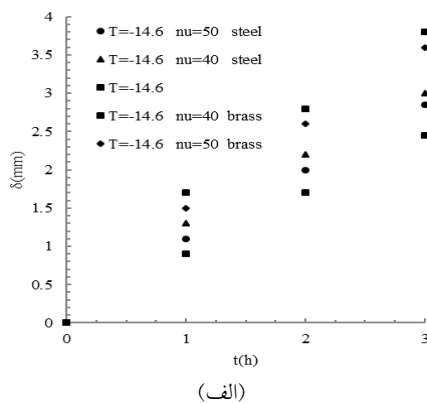


شکل ۷ ضخامت برفک در جلوی استوانه برای دمای سطح -14.6- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی 36 درصد، دمای هوای 17 درجه سانتی گراد و سرعت هوای متفاوت

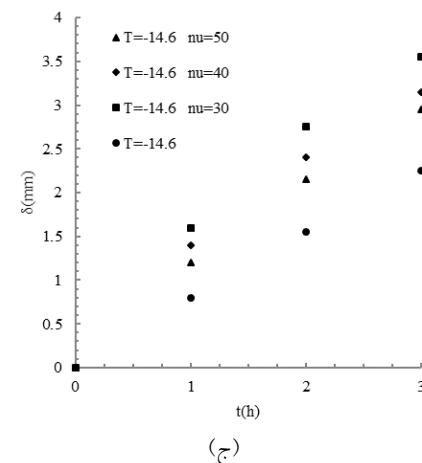
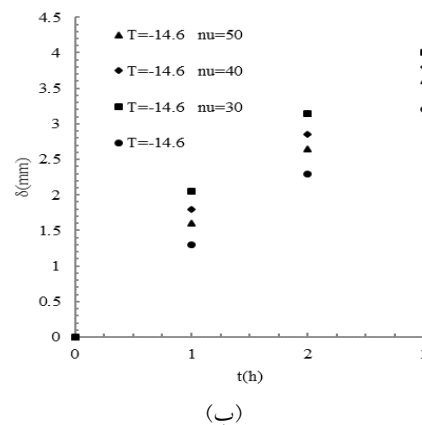
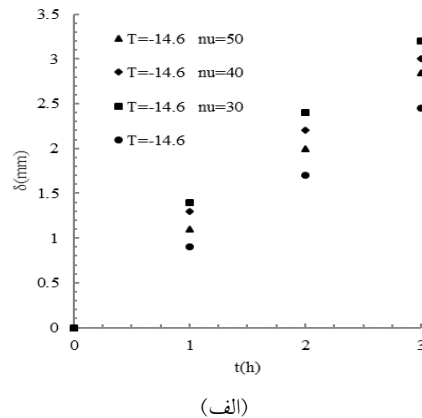
شکل (۸-الف-ج) میزان ضخامت برفک را به ترتیب در جلو، پشت و بالای استوانه برای سطح فولادی دارای زبری با تعداد مش 50 و دمای سطح -14.6، -12.9 و -10.3 درجه سانتیگراد نشان می دهد. مطابق شکل (۸) در دمای -10.3- برفک در جلوی استوانه به دلیل برخورد مستقیم هوا با سطح استوانه تشکیل نمی شود و با کاهش دمای سطح ضخامت برفک افزایش می یابد. در پشت و بالای استوانه در سه دمای مورد بررسی برفک تشکیل می شود و با کاهش دما ضخامت برفک افزایش می یابد. ضخامت برفک در پشت استوانه بیشینه و در جلوی استوانه کمینه است.

شکل (۹-الف-ج) میزان ضخامت برفک را به ترتیب در جلو، پشت و بالای استوانه برای سطح فولادی دارای زبری با تعداد مش 30، 40، 50 و سطح صاف نشان می دهد.

دارای زبری با تعداد مش 50، 40 و سطح صاف نشان می‌دهند. مطابق شکل (۱۰) سطح صاف دارای کمترین ضخامت برفک و سطح برنجی با زبری بیشتر دارای بیشترین ضخامت برفک می‌باشد. همچنین با زبری برابر سطح برنجی نسبت به سطح فولادی دارای ضخامت برفک بیشتری است.



شکل ۱۰ میزان ضخامت برفک برای سطح فولادی دارای زبری متفاوت، سطح برنجی دارای زبری متفاوت و سطح صاف: (الف) جلوی استوانه، (ب) پشت استوانه و (ج) بالای استوانه



شکل ۹ میزان ضخامت برفک برای سطح فولادی دارای زبری متفاوت و سطح صاف: (الف) در جلوی استوانه، (ب) در پشت استوانه و (ج) در بالای استوانه

شکل (۱۰-الف-ج) میزان ضخامت برفک را به ترتیب در جلو، پشت و بالای استوانه برای سطح فولادی دارای زبری با تعداد مش 50، 40، سطح برنجی

		نتیجه گیری
جنس سطح فولادی	steel	
دمای سطح استوانه (°C)	T	در جریان اجباری هوای مرطوب تأثیر زبری سطح و
ضخامت برفک (mm)	δ	همچنین جنس سطح زیر برروی ضخامت برفک
عدد فوریه	Fo	به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر
عدد رینولدز	Re	به دست آمد.
زمان (s)	t	
دما (°C)	T	• ضخامت برفک در پشت استوانه بیشینه و در
دمای هوای محیط (°C)	Ta	جلوی استوانه کمینه می باشد.
دمای سطح استوانه (°C)	Tp	• با ایجاد زبری روی سطح میزان ضخامت برفک
دمای بی بعد هوا	Ta*	بیشتر می شود.
دمای بی بعد استوانه	Tp*	• هرچه سطح زیر ایجاد شده دارای ضریب انتقال
دمای نقطه سه گانه (K)	Ttp	حرارت بیشتری باشد میزان ضخامت برفک بیشتر
ضخامت بی بعد برفک	y*	خواهد بود.
ضریب نفوذ گرمایی (m ² /s)	α	
ویسکوزیته سینماتیک (Pa.s)	ν	
رطوبت نسبی	Φ	
نسبت رطوبت ($\frac{kg}{kgair}$)	ω	
		فهرست علائم
		جنس سطح برنجی brass
		قطر استوانه (cm) d
		تعداد شبکه های سطح nu
		زمان (s) t

مراجع

1. Barzanoni, Y., Noorshams, O., Basirat Tabrizi, H. and Damangir, E., "Experimental Investigation of Frost Formation on a Horizontal Cold cylinder under Cross Flow", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, pp. 1174-1180, (2011).
2. Barzanoni, Y., Basirat Tabrizi, H., Noorshams, O. and Eftekhari, H., "Correlation for Frost Properties on a Cold Cylinder Surface in Cross Flow", *Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1477-1484, (2012).
3. Li, A., Niu, F., Zheng, H., Akagawa, S., Lin, Z. and Luo, J., "Experimental Measurement and Numerical Simulation of Frost Heave in Saturated Coarse-grained Soil", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 137, pp. 68-74, (2017).
4. Fletcher, N.H., "*The Chemical Physics of Ice*", Cambridge University Press, Cambridge, (1970).
5. Sanders, C.T., "The Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Air Cooler", PhD Thesis, Delft Technical University, Delft, (1974).
6. Raju, S.P. and Sherif, S.A., "Frost Formation and Heat Transfer on Circular Cylinder in Cross Flow", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 16, pp. 390-401, (1993).
7. Amini, M., Pishevar, A.R. and Yaghoubi, M., "Experimental Study of Frost Formation on a Fin-and-tube Heat Exchanger by Natural Convection", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 46, pp. 37-49, (2014).

8. Chen, Y., Lu, P., Shen, C. and Zhang, Q., "Experimental Study on Frost Formation on a Cold Surface in Low Atmospheric Pressure", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 90, pp. 86-93, (2015).
9. Kim, H., Kim, D., Jang, H., Kim, D.R. and Lee, K.S., "Microscopic Observation of Frost Behaviors at the Early Stage of Frost Formation on Hydrophobic Surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 97, pp. 861-867, (2016).
10. Liu, Z., Dong, Y. and Li, Y., "An Experimental Study of Frost Formation on Cryogenic Surfaces under Natural Convection Conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 97, pp. 569-577, (2016).
11. Gong, J., Sun, J. and Li, G., "An Experimental Study of the Effect of Air Quality on Frosting on Cold Flat Surface", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 82, pp. 139-144, (2017).