



مدل سازی و بررسی تجربی جریان اجباری تشکیل برفک روی سطح سرد خمیده

بهرروز بهروزی^{۱*}، حسن بصیرت تبریزی^۲، ابراهیم دامنگیر^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

بذیرش:

ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

استوانه سرد

انتقال حرارت و جرم

برفک

جابه‌جایی اجباری

چکیده: تشکیل برفک اثرات مهمی در بسیاری از زمینه‌ها از جمله صنعت تبرید، تهویه مطوع، حمل و نقل هوایی و غیره دارد. هنگامی که هوای مرطوب نزدیک سطح سرد به دمای زیر دمای انجماد آب برسد برفک تشکیل می‌شود. تشکیل برفک یک پدیده گذر پیچیده‌ای می‌باشد که انواع مکانیزم‌های انتقال حرارت و جرم به طور همزمان در حال وقوع است. در این کار توسعه تشکیل برفک در استوانه افقی تحت جابه‌جایی اجباری به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. یک سیستم آزمایشگاهی تشکیل برفک در سطح استوانه سرد همراه با تونل باد راه اندازی شده است و تأثیر دمای سطح سرد، دمای هوا، سرعت هوا و رطوبت نسبی بر روی ضخامت و چگالی برفک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش رطوبت هوا و کاهش دمای سطح، ضخامت برفک افزایش می‌یابد و چگالی برفک کمتر می‌شود. همچنین با افزایش دمای هوای محیط و کاهش سرعت هوا، ضخامت برفک کاهش می‌یابد و چگالی برفک کمتر می‌شود. در نهایت یک رابطه همبستگی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و تأثیر پارامترها برای ضخامت برفک مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- مقدمه

تشکیل برفک پدیده متداولی در مبدل‌های حرارتی در محیط سرد می‌باشد. هنگامی که هوای مرطوب نزدیک سطح سرد به دمای زیر دمای انجماد آب برسد برفک تشکیل می‌شود [۱]. وجود برفک کم و بیش مشکلاتی را ایجاد می‌کند. از جمله در مبدل‌های هوایی گرچه عملکرد حرارتی مبدل در مراحل اولیه‌ی 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 به عنوان یک عایق حرارتی بین سطح سرد و جریان آزاد هوا عمل می‌کند و مشخصه‌های انتقال حرارت را به شدت کاهش می‌دهد [۲]. تشکیل برفک در وسیله‌های حمل و نقل نیز اثرهای قابل توجهی دارد. تشکیل برفک بر روی بال‌های هواپیما وضعیت ایروپدینامیکی آن را تغییر داده و اثر نامطلوبی بر حرکت هواپیما دارد. این مشکل در صنعت حمل و نقل ریلی نیز وجود دارد که با یخ زدگی سوپاپ‌های ترمز سبب اختلال در کنترل قطار می‌شود. در بزرگراه‌ها با یخ زدن سطح جاده موجب لغزندگی سطح می‌شود [۳].

کارهای اولیه در زمینه مرحله‌ی جوانه‌زنی برفک توسط فلچر [۴] در سال ۱۹۷۰ انجام شد. وی مرحله‌های تشکیل برفک را به دو مرحله جوانه‌زنی و رشد کریستالی برفک تقسیم کرد. نا و وب [۵] در سال ۲۰۰۳ فوق اشباع

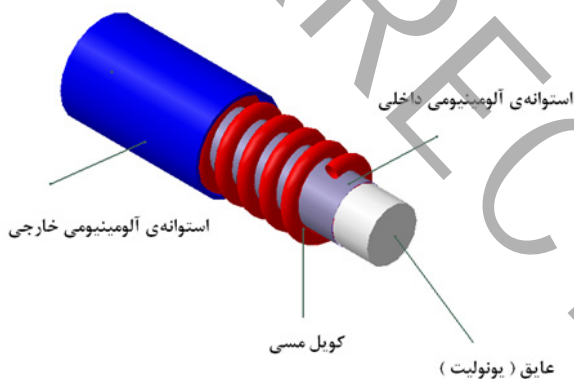
بودن هوا در سطح سرد را هنگام جوانه‌زنی ثابت کرده‌اند. تحقیق‌های آن‌ها نشان داد که سطح‌های با انرژی کمتر نسبت به سطح‌های با انرژی بالاتر، به درجه فوق اشباع بالاتری نیاز دارند و نیز نشان دادند زبری سطح درجه فوق اشباع لازم برای تشکیل جوانه‌ها را کاهش می‌دهد. یان و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۲ مدلی برای رشد و نیز خاصیت‌های برفک در جریان هوای آشفته روی صفحه‌ی تخت ارائه کرده‌اند. آن‌ها برای اولین بار اثر زبری سطح برفک را وارد معادله‌های لایه‌ی هوا کردند. اما به دلیل در نظر گرفتن رابطه‌های تجربی زیاد در کار خود، دقت لازم در جواب‌های آن‌ها دیده نمی‌شود. ماگو و شریف [۷] در سال ۲۰۰۵ با استفاده از رابطه‌های تجربی بین لایه‌ی برفک و میدان جریان ارتباط ایجاد نمودند و تشکیل برفک را در جریان هوای فوق اشباع بر روی استوانه و صفحه‌ی سرد بررسی کردند. و همچنین مدلی را برای پیش‌بینی ضخامت برفک ارائه دادند که فقط در دما و رطوبت هوای بالا نتایج خوبی دارد.

تهور و یعقوبی [۸] در سال ۲۰۰۹ به بررسی مراحل ابتدایی تشکیل برفک در جابه‌جایی طبیعی برای استوانه افقی پرداختند و همچنین مدلی را برای زمان گذر و مرحله جوانه‌زنی ارائه دادند. آن‌ها رابطه همبستگی برای مرحله جوانه‌زنی برفک ارائه دادند. مدل آن‌ها برای پیش‌بینی زمان گذر مؤثر می‌باشد و مراحل بعدی و رشد برفک را پیش‌بینی نمی‌کند و همچنین مطالعاتی بر روی جریان اجباری برفک و تأثیر سرعت هوا بر روی ضخامت

افقی سرد در شرایط جابه‌جایی اجباری و همچنین به ارائه رابطه همبستگی برای ضخامت برفک پرداخته می‌شود. در این پژوهش دمای سطح استوانه $۸/۳$ ، $-۱۰/۳$ ، $-۱۲/۹$ و $-۱۴/۶$ درجه سانتیگراد و دمای محیط اطراف ۱۵ ، ۱۶ و ۱۷ درجه سانتیگراد و همچنین رطوبت نسبی هوا ۳۳ ، ۳۴ و ۳۶ درصد می‌باشد. ضخامت برفک در پایین، بالا، جلو و پشت استوانه اندازه‌گیری می‌شود. چگالی برفک در انتهای آزمایش اندازه‌گیری می‌شود.

۲-۱- شرح دستگاه آزمایش

هسته‌ی اصلی این آزمایش، یک تبخیرکننده به شکل استوانه مطابق شکل ۱ می‌باشد. تبخیرکننده ۳۵ متر لوله‌ی مسی نمره‌ی ۸ می‌باشد و به دمای کمینه‌ی -۴۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. تمام اندازه‌های دیگر دستگاه تابع شکل و اندازه‌ی تبخیرکننده می‌باشد. مبرد مناسب استفاده شده برای شرایط این آزمایش، گاز $R۵۰۲$ می‌باشد که با توجه به خاص بودن گاز تنها یک نوع کمپرسور سازگار با این گاز در بازار موجود بود. این کمپرسور $۰/۷۵$ hp دانفوس^۱ ساخت آلمان غربی می‌باشد.



شکل ۱: شماتیک سه‌بعدی تبخیرکننده

مبرد داغ خروجی از کمپرسور از سمت بالای چگالنده وارد شده و پس از طی مسیر از سمت پایین چگالنده خارج می‌گردد. مبرد پس از خروج از چگالنده به حالت مایع مادون سرد می‌باشد. در این جا برای افت فشار و دمای مبرد، آن را از یک وسیله‌ی اختناق عبور می‌دهند. این وسیله می‌تواند یک شیر انبساط و یا یک لوله‌ی موئین با طول زیاد باشد. لوله‌ی موئین معمولاً در سیستم‌های با مینیمم دمای -۱۵ درجه‌ی 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. دهانه‌ی 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 وسیله‌ی اکولایزر.

برفک انجام ندادند. در ادامه تهور و یعقوبی [۹] در سال ۲۰۱۰ به بررسی عددی و تجربی جابه‌جایی طبیعی تشکیل برفک بر روی سطح استوانه افقی با دمای سطح -۴ تا -۱۰ درجه سانتیگراد پرداختند. آن‌ها برای شرایط معین، ضخامت و چگالی برفک را بر حسب زمان به دست آوردند که فقط ضخامت بالا و پایین استوانه را بررسی کردند و برای اطراف استوانه نتایجی را ارائه ندادند.

برزنونی و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۱ به بررسی جریان اجباری تشکیل برفک روی سطح استوانه سرد پرداختند. آن‌ها در این کار به بررسی تأثیر دمای سطح، دمای محیط و رطوبت هوا بر روی ضخامت و چگالی برفک در سه ساعت اول که عمدتاً مرحله جوانه‌زنی برفک می‌باشد، پرداختند. در کار آن‌ها به زمان‌های بیشتر که مربوط به مرحله رشد و تثبیت برفک می‌باشد پرداخته نشده است. در ادامه برزنونی و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۲ یک رابطه همبستگی برای ضخامت برفک در محدوده دمای سطح -۱۶ تا -۲۲ ، دمای محیط $۲۱/۵$ تا ۲۴ و رطوبت نسبی ۳۱ تا ۵۷ درصد برای سه ساعت اولیه تشکیل برفک ارائه دادند و رابطه همبستگی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. در کار آن‌ها برای دمای بالاتر سطح و زمان‌های بالاتر رابطه‌ای ارائه نشده است.

چن و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۵ به بررسی تجربی جابه‌جایی طبیعی تشکیل برفک در فشار پایین پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که فشار محیط نقش موثری بر تشکیل برفک دارد. کاهش فشار محیط باعث تأخیر در تشکیل برفک می‌شود. همچنین هر چه فشار کاهش یابد، کریستال‌های اولیه تشکیل برفک شکل منظم‌تری به خود می‌گیرند. آن‌ها رابطه‌ای برای تأثیر فشار بر ضخامت برفک ارائه ندادند. کیم و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۶ 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 که فقط ضخامت برفک را در مراحل ابتدایی پیش‌بینی می‌کند و برای مراحل بعدی رشد برفک مدلی را ارائه ندادند.

در کارهای پیشین عموماً به مرحله جوانه‌زنی تشکیل برفک پرداخته شده و به مراحل بعدی رشد و تثبیت برفک اشاره‌ای نشده است. و همچنین برای دمای بالا سطح رابطه همبستگی ارائه نشده است. در این مقاله تشکیل برفک در مرحله جوانه‌زنی، مرحله رشد و تثبیت برفک مورد بررسی قرار گرفته است. و همچنین به مقایسه ضخامت و چگالی برفک برای جریان طبیعی و اجباری تشکیل برفک پرداخته شده است. و در نهایت رابطه همبستگی برای دمای سطح $۸/۳$ تا $-۱۴/۶$ ، دمای محیط ۱۵ تا ۱۸ ، رطوبت نسبی ۲۱ تا ۳۶ درصد و زمان ۱ تا ۱۱ ساعت ارائه شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

۲- بیان مسئله

در این کار به بررسی تجربی ضخامت و چگالی برفک روی استوانه

در ۲۵ (این کانال به صورت موازی با کانال بزرگتر نصب شده است نه به صورت سری) و اتصال مجموعه‌ی فن به آن‌ها، تا حد فوق‌العاده زیادی از ورود نوسان‌های فن به درون کانال جلوگیری شد و جریان درون کانال به یکنواختی لازم رسید.

برای تولید جریان با شرایط ورودی‌های دلخواه از یک محفظه‌ی مکعبی استفاده شده است که درون آن یک فن با توان ۱/۵ اسب بخار و تک فاز قرار داشت. برای ایجاد رطوبت مورد نیاز در جریان اجباری هوای مرطوب از یک لوله پلاستیکی که دارای منفذهای بسیار ریز می‌باشد استفاده شده است.

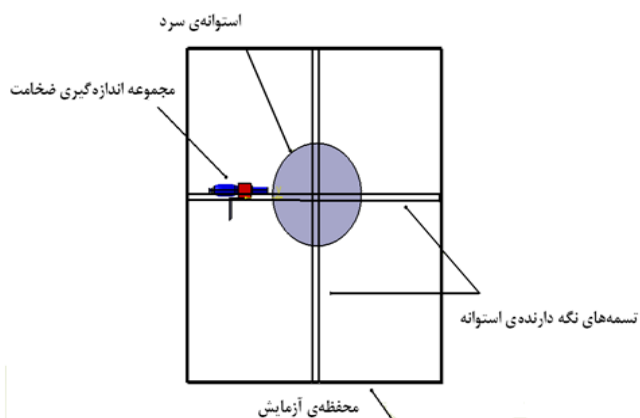
۲-۲- وسایل اندازه‌گیری

در انجام آزمایش‌های مربوط به رشد برفک، پارامترهای گوناگونی وجود دارد که برخی از آن‌ها مثل سرعت هوا باید پیش از شروع آزمایش تنظیم شوند و در طول آزمایش دیگر نیازی به کنترل ندارند. در این آزمایش اندازه‌گیری سرعت جریان هوا توسط یک سرعت‌سنج توریینی^۱ انجام شده است. برای کالیبراسیون سرعت سنج توریینی از سیم داغ استفاده شده است.

• ضخامت برفک

استوانه درون محفظه‌ی خود به وسیله‌ی دو تسمه‌ی صلیبی شکل از دو طرف مطابق شکل ۴ به کانال متصل شده است. در هر طرف و در هر چهار زاویه‌ی اصلی، یک زائده جوش خورده است که می‌تواند یک نبشی آهنی را بر روی خود نگه دارد. سوراخی بر روی هر زائده تعبیه شده است که با یک سوراخ بر روی نبشی هم مکان می‌باشد و می‌توان با قرار دادن یک پین این دو را به هم متصل کرد. در بالای هر مکعب یک پیچ قرار گرفته است و هنگامی که عمق سنج درون سوراخ قرار می‌گیرد با محکم شدن پیچ، هرگونه حرکت احتمالی عمق‌سنج منتفی می‌شود.

برای اندازه‌گیری ضخامت برفک در ابتدا و قبل از برفک زدن سطح استوانه، عمق سنج بر روی نبشی در جای خود ثابت می‌شود و فاصله‌ی نبشی از سطح استوانه خوانده می‌شود. نبشی برداشته شده و بعد از روشن شدن



شکل ۴: وسایل اندازه‌گیری ضخامت برفک

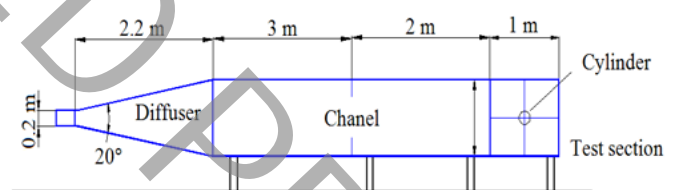
اکولایزر یک ترموستات است که سر حس‌گر آن را در جای مناسب قرار می‌دهند. (در اینجا به ابتدای لوله‌ی خروجی تبخیرکننده وصل شده است.) در موقع کار کردن سیستم، این سر با حس کردن سرمای محل قرارگیری خود، می‌تواند پیام بسته شدن یا باز شدن کامل را به اریفیس بدهد. با این کار دبی جریان مبرد به درون تبخیرکننده و در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

تونل باد از چهار قسمت اصلی تشکیل می‌شود:

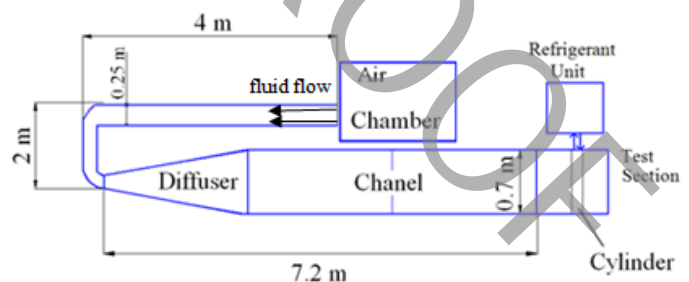
بخش تست و محل قرارگیری استوانه‌ی مورد آزمایش، کانال‌ها و نازل، محفظه‌ی کنترل جریان و وسیله‌های اندازه‌گیری.

طول استوانه مورد بررسی ۷۰ سانتیمتر و قطر آن ۱۵/۶ سانتیمتر می‌باشد. عمق، ارتفاع و طول محفظه اندازه‌گیری به ترتیب ۷۰، ۹۰ و ۸۰ سانتیمتر می‌باشد. 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.

با توجه به این که این مجموعه (استوانه و بخش تست) باید به کانال موجود در آزمایشگاه انرژی متصل گردد تا سیرکولاسیون هوا صورت گیرد، ساخت کانال مطابق اشکال ۲ و ۳ صورت گرفت. طول این کانال ۵ متر و سطح مقطع آن ۹۰ در ۷۰ سانتیمتر مربع می‌باشد. این کانال از اسکلتی از نبشی آهنی و با بدنه‌ای از ورق گالوانیزه ساخته شده است. همچنین یک دیفیوزر با زاویه‌ی ۱۰ درجه و طول ۲/۲ متر به کانال اولیه اضافه شده است. برای جلوگیری از ورود مستقیم جریان از فن به درون کانال، با استفاده از یک کانال به شکل U به طول ۲ متر و سطح مقطع ۲۰ در ۲۵ و اتصال یک سر آن به دیفیوزر و سر دیگر آن به یک کانال ۴ متری با سطح مقطع ۲۰



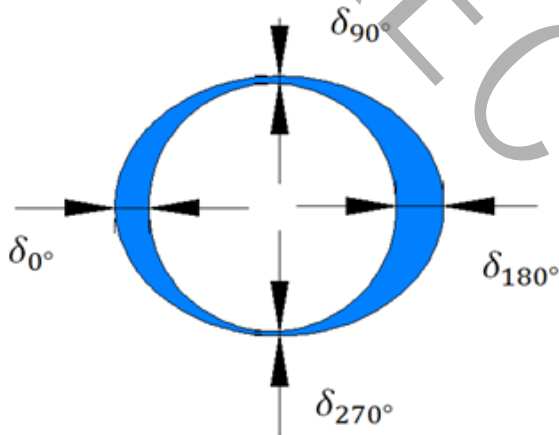
شکل ۲: نمای روبه‌رو دستگاه تونل باد



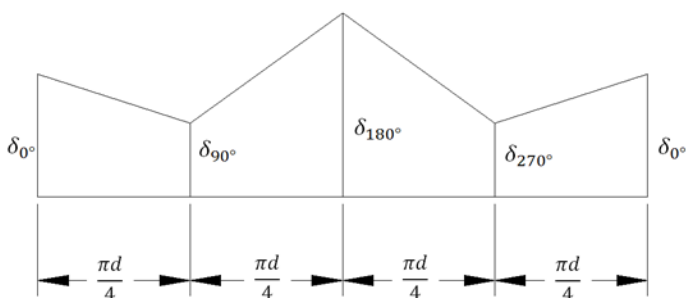
شکل ۳: نمای بالا دستگاه تونل باد

دم باریک که دمای سر آن تقریباً با دمای برفک یکسان شده است از روی استوانه به آرامی جدا می‌شود. جدا کردن فویل از استوانه اگر به تندی انجام گیرد می‌تواند مقداری از برفک تشکیل شده در کناره‌های فویل را پس بزند که این امر سبب ایجاد خطا می‌گردد. اما اگر این کار به آرامی و با حوصله انجام شود، مقدار این خطا کمتر می‌شود. همچنین هنگامی که فویل از روی استوانه باز می‌شود، یک ظرف پلاستیکی بزرگ زیر آن قرار می‌گیرد تا آن مقدار از برفک که از فویل جدا می‌شود به درون آن بریزد. استفاده از ظرف سبب می‌شود که کار حمل و اندازه‌گیری وزن برفک بسیار آسان‌تر و دقیق‌تر شود. هنگام اندازه‌گیری کل ظرف درون ترازو قرار می‌گیرد و چون قبلاً وزن ظرف بر روی ترازو صفر شده است عدد نشان داده شده برابر وزن برفک به علاوه وزن فویل آلومینیومی و وزن ژل سیلیکون است. این عدد یادداشت شده و سپس فویل درون یک خشک کن قرار می‌گیرد تا رطوبت آن به طور کامل خشک شود و آنگاه دوباره وزن می‌شود. با کم کردن این دو عدد از یکدیگر وزن خالص برفک به دست می‌آید.

برای اندازه‌گیری چگالی برفک، فویل آلومینیومی پیچیده شده به دور استوانه را به صورت باز شده در نظر گرفته و چون ضخامت برفک مطابق شکل ۵ فقط در چهار نقطه اندازه‌گیری شده است و در بین این چهار نقطه



شکل ۵: شماتیک ضخامت برفک روی استوانه



شکل ۶: ضخامت برفک روی فویل

دستگاه و پس از طی زمان مطلوب دوباره نبشی گذاشته می‌شود و فاصله‌ی نبشی از سطح برفک دوباره خوانده می‌شود. با کم کردن این دو عدد از یکدیگر ضخامت برفک به دست می‌آید.

برای اینکه دمای سر عمق سنج با دمای برفک هم‌اندازه باشد و سر عمق سنج سبب آب شدن برفک نشود، در طی انجام آزمایش، عمق سنج بر روی صلیب طوری قرار می‌گیرد که سر آن بر روی استوانه‌ی سرد قرار گیرد و دمای آن با سطح سرد به تعادل برسد.

به علاوه برای این که لحظه‌ی تماس شدن سر عمق سنج با برفک‌ها به خوبی دیده شود، از یک عدد ذره‌بین با بزرگنمایی مناسب استفاده شده است تا بتوان به خوبی این لحظه را دید. دقت عمق سنج $\pm 0.1 \text{ mm}$ می‌باشد. کالیبراسیون عمق سنج‌ها با صفر کردن خط نشانه‌ی آن صورت می‌پذیرد.

- رطوبت نسبی هوا

رطوبت نسبی هوای مرطوب توسط یک رطوبت‌سنج دیجیتالی با دقت ۱ درصد اندازه‌گیری شده است.

- دمای استوانه و هوا

بر روی استوانه به جز درجه حرارت، گرادیان دما در راستای طول استوانه و گرادیان دما در راستای محیطی باید اندازه‌گیری شود. برای اندازه‌گیری دما در راستای محیطی، چهار پروب نوع k به وسیله‌ی ژل سیلیکون در یک مقطع و در چهار زاویه‌ی اصلی از نقطه‌ی سکون بر روی سطح ثابت می‌شوند و نیم ساعت بعد از شروع به کار سیستم تبرید، ترمومتر بر روی حالت داده‌برداری خودکار قرار می‌گیرد تا هم تغییر دما را در طی زمان و هم در راستای محیطی ذخیره کند. تغییر در طی زمان دارای نوسان‌های بسیار کم با دامنه‌ی ۰/۲ درجه می‌باشد. این عمل در چهار مقطع انجام شد که نتیجه‌ی آن بسیار مشابه با مقطع اولیه بود. برای اثبات تکرارپذیر بودن این رفتار، این عمل سه دفعه تکرار شد که همبستگی مناسبی بین داده‌ها بود. 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.

برای اندازه‌گیری دمای هوای ورودی نیز از ترموکوپل نوع k استفاده شده است که دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد دارد.

- وزن و چگالی برفک

یک فویل آلومینیومی به ضخامت ۰/۰۱ میلی‌متر و به طولی معادل با محیط استوانه (۴۹ سانتیمتر) و در پهنای ۳ سانتیمتر تهیه می‌شود. سپس یک لایه‌ی نازک از ژل سیلیکون روی تمامی سطح این فویل کشیده می‌شود تا هنگامی که فویل بر روی استوانه کشیده شد هیچ گونه هوایی بین فویل و استوانه محبوس نکرده. وجود هوا بین فویل و استوانه می‌تواند به عنوان یک مقاومت حرارتی عمل کند و دمای سطح فویل در آن نقطه بسیار متفاوت از دمای سطح استوانه می‌گردد.

در حین آزمایش و در زمان‌های مورد نظر، این فویل با استفاده از یک

جدول ۱: دقت تجهیزات و عدم قطعیت

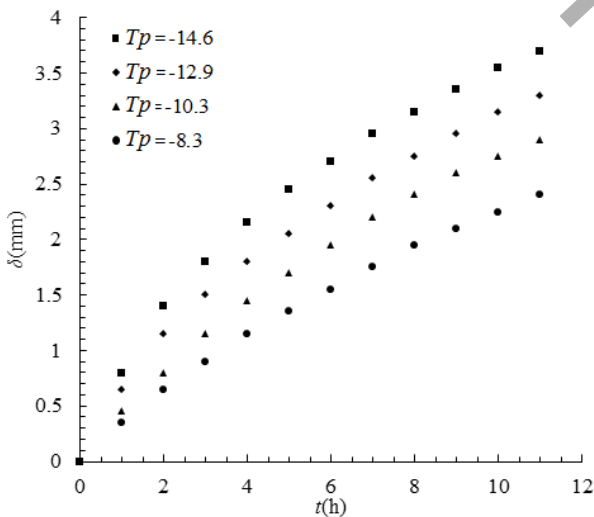
دقت	کمیت مورد سنجش
۰/۱ K	دمای هوا
۱%	رطوبت هوا
۰/۱ K	دمای دیواره
۰/۰۱ mm	ضخامت برفک
۱۰ ^{-۷} kg	وزن برفک
1.1575 × 10 ⁻⁶ m ³	حجم برفک
6 × 10 ⁻² - 8 × 10 ⁻² kg/m ³	چگالی برفک

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر پارامترهای مختلف بر ضخامت و چگالی برفک

در این قسمت ابتدا به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ضخامت و چگالی برفک پرداخته می‌شود و سپس به مقایسه جریان جابه‌جایی طبیعی و اجباری پرداخته می‌شود و در نهایت رابطه همبستگی برای ضخامت برفک ارائه می‌شود.

شکل ۷ تأثیر دمای استوانه بر روی ضخامت برفک در دمای محیط ۱۷ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد و سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است با کاهش دمای سطح استوانه ضخامت برفک افزایش می‌یابد. در واقع با کاهش دمای سطح سرد پتانسیل حرارت و جرم بیشتر شده و برفک ضخیم‌تری حاصل می‌شود.



شکل ۷: ضخامت برفک در بالا و پایین استوانه برای دمای محیط ۱۷ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد و سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه

داده‌ای دیگر در دست نیست، هنگامی که نوار باز می‌گردد فرض می‌شود که ضخامت برفک در بین این چهار نقطه مطابق شکل ۶ یک تابع خطی است. در نتیجه می‌توان سطح کناری برفک (حجم برفک) را به صورت مجموعه‌ای از دوزنقه‌ها و مستطیل‌ها در نظر گرفت.

حال برای محاسبه‌ی چگالی به صورت زیر عمل می‌شود:

رابطه (۱) حجم برفک را نشان می‌دهد و به صورت زیر است:

$$\forall_{frost} = \frac{\Pi d}{4} (\delta_{0^\circ} + \delta_{90^\circ} + \delta_{180^\circ} + \delta_{270^\circ}) \cdot l \quad (1)$$

که در آن، \forall حجم برفک بر حسب m³، d قطر استوانه بر حسب cm، δ ضخامت برفک بر حسب mm و l عرض فویل بر حسب mm می‌باشد.

رابطه (۲) چگالی برفک را نشان می‌دهد.

$$\rho_{frost} = \frac{m_{frost}}{\forall_{frost}} \quad (2)$$

که در آن، \forall حجم برفک بر حسب m³، m جرم برفک بر حسب kg و ρ چگالی برفک بر حسب kg/m³ می‌باشد.

مقدار دقت ترازو برابر $\pm 0.0001 \text{ gr}$ می‌باشد و بیشترین مقداری که می‌تواند وزن کند معادل ۲۷۰ گرم می‌باشد. ترازو با استفاده از وزنه‌های درون خود قابلیت کالیبره کردن خود را دارد. چون ترازو به عامل‌هایی مثل باز و بسته شدن در، وجود میدان مغناطیسی در اطراف، تغییر شدید دما و رطوبت هوا، نوسان برق، وجود جریان هوا در اطراف، وجود گرد و غبار و تراز نبودن محل قرارگیری حساس است، به دور از دستگاه آزمایش و در اتاق دیگر آزمایشگاه قرار گرفته است.

۳-۲- آنالیز خطا و عدم قطعیت

برای محاسبه عدم قطعیت حجم و وزن برفک از روابط (۳) و (۴) استفاده می‌شود.

$$\forall = \pi d l \delta$$

$$\Delta \forall = \sqrt{\left[\frac{\partial \forall}{\partial d} \Delta d \right]^2 + \left[\frac{\partial \forall}{\partial l} \Delta l \right]^2 + \left[\frac{\partial \forall}{\partial \delta} \Delta \delta \right]^2} \quad (3)$$

$$= \pi \sqrt{[l \cdot \delta \cdot \Delta d]^2 + [d \cdot \delta \cdot \Delta l]^2 + [d \cdot l \cdot \Delta \delta]^2}$$

$$\rho = \frac{m}{\forall}$$

$$\Delta \rho = \pm \sqrt{\left[\frac{\partial \rho}{\partial m} \Delta m \right]^2 + \left[\frac{\partial \rho}{\partial \forall} \Delta \forall \right]^2} \quad (4)$$

$$= \pm \frac{1}{\forall} \sqrt{[\Delta m]^2 + [\rho \cdot \Delta \forall]^2}$$

که میزان خطا برای تجهیزات و عدم قطعیت برای پارامترها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۳: چگالی برفک در دمای محیط ۱۷ درجه سانتیگراد، دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه، زمان ۱۱ ساعت و رطوبت نسبی متفاوت

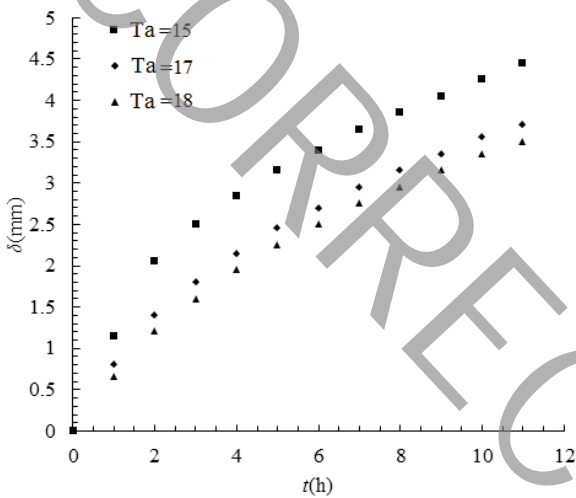
Φ	ρ (kg/m ³)
۲۱	۱۴۷/۱۹۸
۲۷	۱۳۰/۷۰۴
۳۶	۱۱۰/۸۱۵

چگالی برفک با کاهش رطوبت، افزایش دمای سطح و کاهش دمای هوای محیط افزایش می‌یابد. به عبارتی هر چه برفک زمان بیشتری برای تشکیل داشته باشد چگالی آن افزایش می‌یابد و در صورتی که برفک در زمان کمتر تشکیل شود، برفک تولید شده پفکی‌تر و دارای چگالی کمتر می‌باشد. جدول ۲ چگالی برفک در زمان ۱۱ ساعت را برای دمای محیط ۱۷ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه و دمای سطح متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که از مقادیر جدول مشخص است با کاهش دمای سطح چگالی برفک کاهش می‌یابد.

جدول ۲: چگالی برفک در دمای محیط ۱۷ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه، زمان ۱۱ ساعت و دمای سطح متفاوت

T_p (K)	ρ (kg/m ³)
-۱۴/۶	۱۱۰/۸۱۵
-۱۲/۹	۱۱۶/۲۹۵
-۱۰/۳	۱۲۳/۴۳۰
-۸/۳	۱۳۳/۸۵۸

جدول ۳ چگالی برفک را برای رطوبت نسبی متفاوت نشان می‌دهد. مطابق جدول با افزایش رطوبت نسبی، چگالی برفک افزایش می‌یابد.



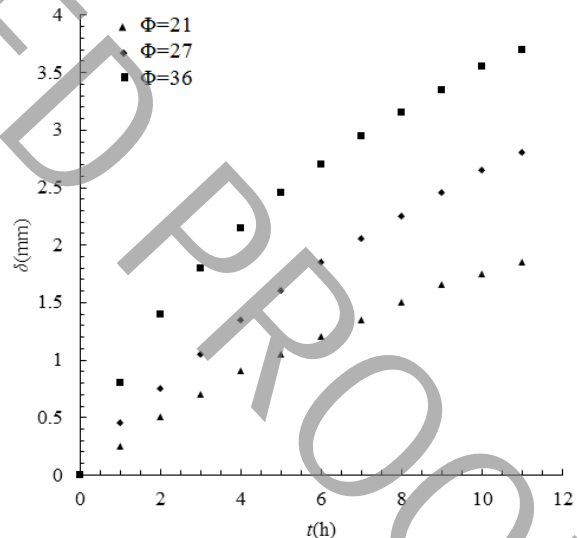
شکل ۸ ضخامت برفک در بالای استوانه برای دمای محیط ۱۷ درجه سانتیگراد، دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی متفاوت را نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش رطوبت نسبی، ضخامت برفک افزایش می‌یابد.

شکل ۹: ضخامت برفک در بالای استوانه برای دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه و دمای هوای متفاوت

شکل ۹ ضخامت برفک در بالای استوانه برای دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه و دمای هوای متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، با افزایش دمای هوای محیط، ضخامت برفک کاهش می‌یابد.

جدول ۴: چگالی برفک در دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه، زمان ۱۱ ساعت و دمای هوای متفاوت

T_a (K)	ρ (kg/m ³)
۱۵	۱۲۱/۱۵۷
۱۷	۱۱۰/۸۱۵
۱۸	۱۰۶/۲۸۵



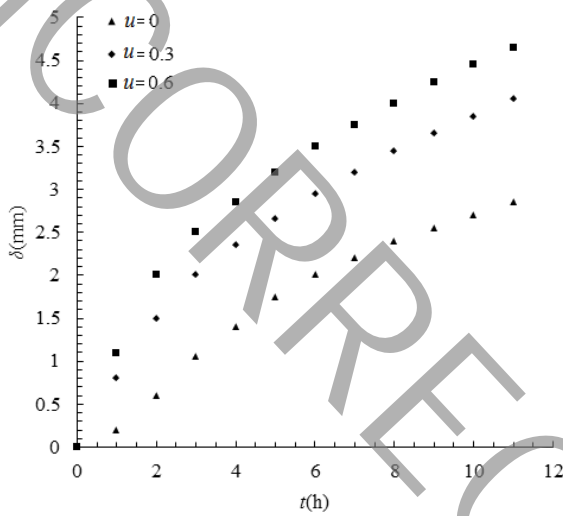
شکل ۸: ضخامت برفک در بالای استوانه برای دمای محیط ۱۶ درجه سانتیگراد، دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی متفاوت

دارد و کمترین ضخامت برفک متعلق به بالا و پایین استوانه می‌باشد. اشکال ۱۰ تا ۱۳ ضخامت برفک را به ترتیب در جلو، بالا، پشت و پایین استوانه برای دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، دمای هوای ۱۷ درجه سانتیگراد و سرعت هوای متفاوت نشان می‌دهند. در سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه مقدار عدد رینولدز ۳۲۰۰ و در سرعت ۰/۶ متر بر ثانیه مقدار عدد رینولدز ۶۴۰۰ می‌باشد. مطابق اشکال ۱۰ تا ۱۳ با افزایش سرعت، عدد رینولدز و ضریب‌های انتقال حرارت و جرم نیز افزایش می‌یابد و به تبع آن انتقال حرارت و جرم نیز اضافه می‌شود. با زیاد شدن انتقال جرم، مقدار رشد برفک نیز زیاد می‌شود و ضخامت برفک زیاد می‌شود. در جلو و

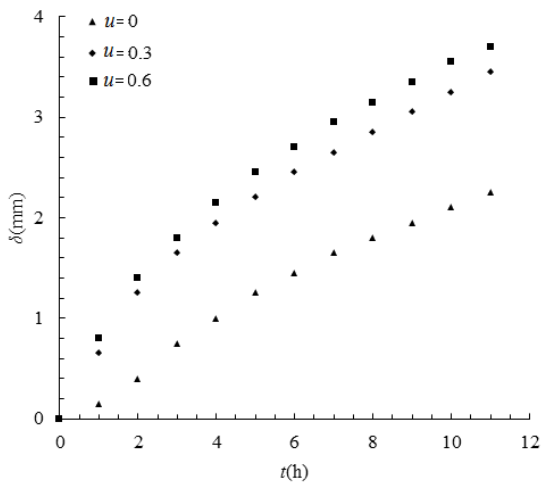
جدول ۴ چگالی برفک را برای دمای هوای محیط متفاوت نشان می‌دهد. مطابق جدول با افزایش دمای هوای محیط، چگالی برفک کاهش می‌یابد.

۳-۲- مقایسه ضخامت و چگالی برفک در جریان جابه‌جایی طبیعی و اجباری

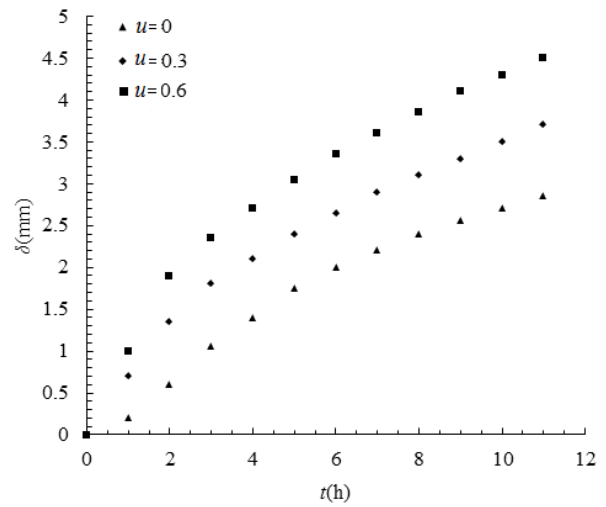
در این قسمت به مقایسه ضخامت برفک در جلو، پشت، بالا و پایین استوانه پرداخته می‌شود. در جابه‌جایی طبیعی در بالای استوانه بیشترین ضخامت وجود دارد و در پایین استوانه کمترین ضخامت برفک وجود دارد ولی در جابه‌جایی اجباری در پشت استوانه بیشترین ضخامت برفک وجود



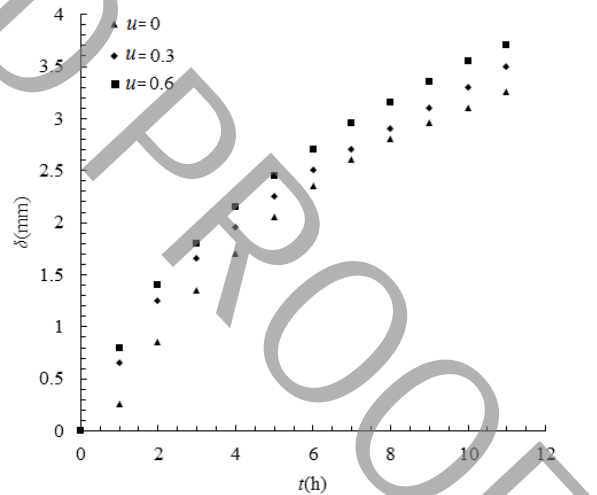
شکل ۱۲: ضخامت برفک در بالا استوانه برای دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، دمای هوا ۱۷ درجه سانتیگراد و سرعت هوای متفاوت



شکل ۱۳: ضخامت برفک در پایین استوانه برای دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، دمای هوا ۱۷ درجه سانتیگراد و سرعت هوای متفاوت



شکل ۱۰: ضخامت برفک در جلو استوانه برای دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، دمای هوا ۱۷ درجه سانتیگراد و سرعت هوای متفاوت



شکل ۱۱: ضخامت برفک در پشت استوانه برای دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، دمای هوا ۱۷ درجه سانتیگراد و سرعت هوای متفاوت

که در معادله (۹) فرض می‌شود که عدد لویس ثابت باشد [۲].
 مطابق معادلات (۵) تا (۹) در جریان اجباری هوای مرطوب، ضخامت برفک تابعی از متغیرهای بی‌بعد زیر می‌باشد [۲].

$$\delta = f(\text{Re}, \text{Fo}, \omega_{air}, T_a^*, T_p^*) \quad (10)$$

که در آن، δ ضخامت برفک بر حسب Re mm عدد رینولدز $(\text{Re} = \frac{ud}{\nu})$ ، عدد فوریه $(\text{Fo} = \frac{\alpha t}{d^2})$ ، نسبت رطوبت، ω_{air} دمای بی‌بعد هوا $(T_a^* = \frac{T_a + 273}{15})$ ، $(T_p^* = \frac{T_p + 273}{15})$ دمای بی‌بعد استوانه $(T_p^* = \frac{T_p + 273}{15})$ می‌باشد.
 برای T_p به دست آوردن رابطه همبستگی برای ضخامت برفک از نرم‌افزار فترن ۹۰ و داده‌های آزمایش بی‌بعد شده استفاده شده است. رابطه همبستگی این تحقیق برای جریان اجباری هوای مرطوب برای نقطه سکون به صورت زیر می‌باشد:

$$y_f^* = \frac{\delta_f}{d} = 2.6211(\text{Re})^{0.1267} (\text{Fo})^{0.5533} (\omega_{air})^{1.1572} (T_a^*)^{-38.0284} (T_p^*)^{-20.1011} \quad (11)$$

که در آن، y_f^* ضخامت بی‌بعد برفک می‌باشد.
 شرایطی که رابطه بالا برقرار است عبارتند از:

- $3200 \leq \text{Re} \leq 6400$
- $3.18 \leq \text{Fo} \leq 34.96$
- $0 \leq t \leq 11$
- $0.0022 \leq \omega_a \leq 0.0111$
- $15 \leq T_a \leq 21$
- $-15 \leq T_p \leq -8$

شکل ۱۴ مقایسه‌ی ضخامت برای دمای هوای ۱۷ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، سرعت هوا ۰/۶ متر بر ثانیه برای داده‌های آزمایشگاهی و رابطه همبستگی این تحقیق نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است بین رابطه همبستگی و داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی وجود دارد.
 جدول ۶ نتایج ۶ حالت را برای مقایسه رابطه همبستگی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

۴- جمع بندی

در جریان اجباری هوای مرطوب تأثیر دمای سطح استوانه، رطوبت، دمای هوا و سرعت هوا بر روی ضخامت و چگالی برفک مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر به دست آمد.

پشت استوانه فاصله بین سرعت صفر و ۰/۳ برابر فاصله ۰/۳ و ۰/۶ می‌باشد. یا به عبارت دیگر افزایش سرعت هوا به صورت خطی ضخامت برفک را افزایش می‌دهد. در بالا و پایین استوانه فاصله بین سرعت صفر و ۰/۳ بیشتر از فاصله ۰/۳ و ۰/۶ می‌باشد. یا به عبارت دیگر افزایش سرعت هوا با شیب کاهشی ضخامت برفک را افزایش می‌دهد. همچنین در پشت استوانه ضخامت برفک ماکسیمم می‌باشد و در پایین و بالای استوانه ضخامت برفک مینیمم می‌باشد.

جدول ۵ چگالی برفک را برای سرعت مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از جدول مشخص است با افزایش سرعت هوا چگالی برفک افزایش می‌یابد.

جدول ۵: چگالی برفک در دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد، دمای هوای ۱۷ درجه سانتیگراد، زمان ۱۱ ساعت و سرعت هوای متفاوت

ρ (kg/m ³)	u (m/s)
۸۲/۱۳۵	۰
۹۸/۸۶۰	۰/۳
۱۱۰/۸۱۵	۰/۶

۳-۳- رابطه همبستگی برای ضخامت برفک

برای به دست آوردن رابطه همبستگی از معادلات انرژی و انتقال جرم استفاده می‌شود که مطابق رابطه (۵) و (۶) می‌باشد [۲].

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (5)$$

$$\rho_a \frac{\partial \omega_a}{\partial t} + \rho_a u_i \frac{\partial \omega_a}{\partial x_i} = \rho_a D \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^2} \quad (6)$$

با استفاده از رابطه (۷)، روابط (۵) و (۶) به صورت بدون بعد مطابق رابطه (۸) و (۹) می‌باشد.

$$y_f^* = \frac{y_f}{d}, T_p^* = \frac{T_{pipe}}{T_{tp}}, \quad (7)$$

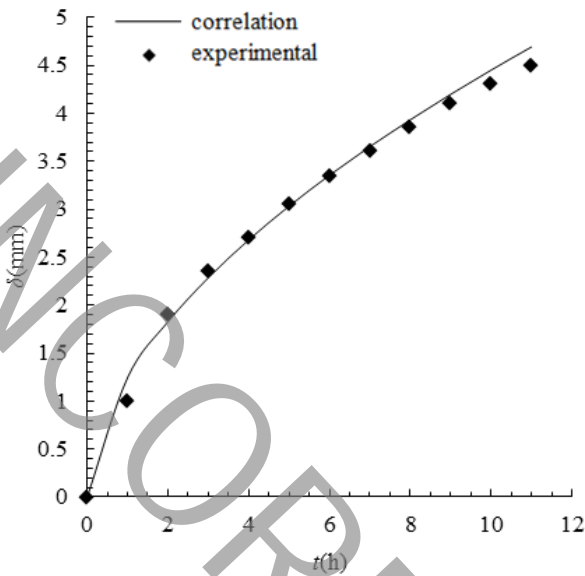
$$T_a^* = \frac{T_{air}}{T_{tp}}, T_{fs}^* = \frac{T_{air} - T_{fs}}{T_{air} - T_{pipe}}$$

$$\frac{\partial T_a^*}{\partial \text{Fo}} + (\text{Re} \cdot \text{Pr}) u_i^* \frac{\partial T_a^*}{\partial x_i} = \frac{\partial^2 T_a^*}{\partial x_i^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \omega_a}{\partial \text{Fo}} + (\text{Re} \cdot \text{Pr}) u_i^* \frac{\partial \omega_a}{\partial x_i} =$$

$$\frac{1}{\text{Le}} \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^2} = \frac{\text{Pr}}{\text{Sc}} \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^2} \quad (9)$$

ساعت که تمامی مراحل رشد برفک را در بر می‌گیرد ارائه و با نتایج تجربی مقایسه شد.



شکل ۱۴: ضخامت برفک برای بالا و پایین استوانه در دمای هوای ۱۷ درجه سانتیگراد، دمای سطح ۱۴/۶- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۳۶ درصد و سرعت ۰/۶ متر بر ثانیه برای رابطه همبستگی و داده‌های آزمایش

- با افزایش رطوبت، ضخامت برفک افزایش و چگالی برفک کمتر می‌شود.
- با افزایش دمای سطح، ضخامت برفک کاهش و چگالی برفک بیشتر می‌شود.
- با افزایش دمای هوای محیط، ضخامت برفک کاهش و چگالی برفک کمتر می‌شود.
- لایه مرزی از جلوی استوانه تشکیل شده و به سمت پشت استوانه پیشروی می‌کند.
- در بالا و پایین استوانه ضخامت برفک مینیمم می‌باشد و در پشت استوانه ضخامت برفک ماکسیمم می‌باشد.
- یک رابطه همبستگی برای ضخامت برفک از داده‌های آزمایشگاهی ارائه گردید.

در جریان اجباری هوای مرطوب ضخامت برفک در تمامی جهات استوانه با افزایش سرعت هوا افزایش می‌یابد. در جلو و پشت استوانه افزایش سرعت هوا به صورت خطی ضخامت برفک را افزایش می‌دهد؛ در بالا و پایین استوانه افزایش سرعت هوا با شیب کم ضخامت برفک را افزایش می‌دهد. همچنین در جریان اجباری با افزایش سرعت جریان میزان چگالی برفک بیشتر می‌شود.

برای جریان اجباری هوا رابطه همبستگی برای دمای سطح $-۸/۳$ تا $-۱۴/۶$ ، دمای محیط ۱۵ تا ۱۸، رطوبت ۲۱ تا ۳۶ درصد و زمان ۱ تا ۱۱

جدول ۶: مقایسه ضخامت برفک رابطه همبستگی با نتایج آزمایشگاهی در سرعت ۰/۶ متر بر ثانیه

$T_a(^{\circ}C)$	$T_p(^{\circ}C)$	Φ	$t=0$	$t=2$	$t=4$	$t=6$	$t=8$	$t=10$	متوسط انحراف	حداکثر انحراف	
۳۶	-۱۴/۶	۱۸	۴/۱	۳/۷	۳/۲	۲/۵	۱/۷	۰			تجربی
۳۶	-۱۴/۶	۱۸	۴/۲	۳/۸	۳/۲	۲/۵	۱/۷	۰	۰/۰۳	۰/۱	رابطه همبستگی
۲۱	-۱۴/۶	۱۶	۲/۳	۲/۱	۱/۷	۱/۳	۰/۷	۰			تجربی
۲۱	-۱۴/۶	۱۶	۲/۴	۲/۲	۱/۸	۱/۴	۱	۰	۰/۱۲	۰/۳	رابطه همبستگی
۲۱	-۱۴/۶	۱۷	۲/۱	۱/۸	۱/۵	۱/۲	۰/۶	۰			تجربی
۲۱	-۱۴/۶	۱۷	۲/۳	۲/۱	۱/۷	۱/۴	۰/۹	۰	۰/۲	۰/۳	رابطه همبستگی
۲۷	-۱۴/۶	۱۷	۳/۲	۲/۸	۲/۴	۱/۸	۱/۲	۰			تجربی
۲۷	-۱۴/۶	۱۷	۳	۲/۷	۲/۳	۱/۸	۱/۳	۰	۰/۰۵	۰/۲	رابطه همبستگی
۳۶	-۱۴/۶	۱۵	۴/۶	۴/۲	۳/۸	۳/۱	۲/۳	۰			تجربی
۳۶	-۱۴/۶	۱۵	۵	۴/۴	۳/۸	۳	۲/۱	۰	۰/۰۵	۰/۴	رابطه همبستگی
۳۶	-۱۴/۶	۱۷	۴/۳	۳/۸	۳/۳	۲/۷	۱/۸	۰			تجربی
۳۶	-۱۴/۶	۱۷	۴/۵	۳/۹	۳/۳	۲/۷	۱/۸	۰	۰/۰۵	۰/۲	رابطه همبستگی

فهرست علائم

علائم انگلیسی

قطر استوانه (cm)	d
عدد فوریه	Fo
عدد رینولدز	Re
زمان (s)	t
دما (°C)	T
دمای هوای محیط (°C)	T_a
دمای سطح استوانه (°C)	T_p
دمای بی‌بعد هوا	T_a^*
دمای بی‌بعد استوانه	T_p^*
دمای نقطه سه‌گانه (K)	T_{tp}
سرعت هوا (m/s)	u
ضخامت بی‌بعد برفک	y^*

علائم یونانی

ضریب نفوذ گرمایی (m ² /s)	α
ضخامت برفک (mm)	δ
چگالی (kg/m ³)	ρ
حجم برفک (m ³)	∇
ویسکوزیته سینماتیک (Pa.s)	ν
رطوبت نسبی	Φ
نسبت رطوبت ($\frac{kg}{kgair}$)	ω

زیرنویس

سیال	f
هوای اطراف	a
هوای اطراف	air
برفک	f
برفک	$frost$
نقطه سه‌گانه	tp

مراجع

- Eftekhari, H. "Correlation for frost properties on a cold cylinder surface in cross flow." *Heat Mass Transfer* 48.8 (2012): 1477-1484.
- [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* 137.1 (2017): 68-74.
- [4] Fletcher N. H. *The chemical physics of ice*, First Edition, Cambridge: Cambridge University Press, 1970.
- [5] Na, B., and Webb, R. L. "A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46.20 (2003): 3797-3808.
- [6] Yun, R., Kim, Y., and Min, M. K. "Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate." *International Journal of Refrigeration* 25.3 (2002): 362-371.
- [7] Mago, P. J., and Sherif, S. A. "Frost formation and heat transfer on a cold surface in ice fog." *International Journal of Refrigeration* 28.4 (2005): 538-546.
- [8] Tahavvor, A. R., and Yaghoubi, M. "Analysis of early-stage frost formation in natural convection over a horizontal cylinder." *International Journal of Refrigeration* 32.6 (2009): 1343-1349.
- [9] Tahavvor, A. R., and Yaghoubi, M. "Experimental and numerical study of frost formation by natural convection over a cold horizontal circular cylinder." *International Journal of Refrigeration* 33.7 (2010): 1444-1458.
- [10] 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* 90.1 (2015) 86-93.
- [11] 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* 97.1 (2016): 861-867.
- [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* 34.4 (2011): 1174-1180.
- [2] Barzanoni, Y., Basirat Tabrizi, H., Noorshams, O., and

Please cite this article using:

B. Behroozi, H. Basirat Tabrizi, E. Damangir, Modeling and Experimental Study of Force Convection Frost Formation over a Curved Surface, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-10.

DOI:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

