

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

## بررسی تجربی تشکیل برفک در حالت طبیعی روی یک مبدل با پره های صفحه ای

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیلی انرژی

محمد امینی

استاد راهنما

دکتر احمد رضا پیشه‌ور

دکتر محمود یحقیبی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تبدیلی انرژی آقای محمد امینی

تحت عنوان

**بررسی تجربی تشکیل برفک در حالت طبیعی روی یک مبدل با پره های صفحه ای**

در تاریخ ۹۲/۱۱/۲ توسط کمیته ی تخصصی زیر مورد تصویب و بررسی نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان نامه دکتر احمد رضا پیشه ور

۲. استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمود یعقوبی

۳. استاد داور پایان نامه دکتر محمد رضا سلیم پور

۴. استاد داور پایان نامه دکتر محمد رضا توکلی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر محمد رضا سلیم پور

شکر و سپاس خدای را که با الطاف ربانی اش توفیق داد تا این مجموعه را به پایان رسانده و از خداوند منان توفیق و سعادت همه پویندگان و رهروان علم و دانش را خواهانم. اینک که حاصل همه تلاش ها مثمر ثمر واقع شده بر خود فرض می دانم که با بضاعت اندک در کمال ادب و احترام مراتب سپاس و قدردانی خالصانه و صمیمانه را از همه کسانی که مرا در این وادی یاری نموده اند ابراز دارم.

اساتید محترم، جناب آقای دکتر پی‌شاه و جناب آقای دکتر یعقوبی که با راهنمایی های بی شائبه ی خود رهگشای اینجانب بوده اند،

جناب آقای مهندس عضدی و جناب آقای مهندس یادگار که در آموختن عملی علم اینجانب را بهره مند ساختند،

دوستان عزیزم که با گرمای محبتشان مرا در انجام این پژوهش دلگرم کردند،

و در نهایت از پدر بزرگوار، مادر مهربان و خانواده ی عزیزم که در تمامی زمینه ها حامی من بوده اند تشکر و قدردانی می نمایم.

محمد امینی

زمستان ۱۳۹۲

کلید حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی  
اصفهان است.

تقدیم به

پدر بزرگوار،

مادر مهربان،

و خانواده عزیزم،

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره ی‌آوری دلسوز و فداکار و پشتی‌بانی  
محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

فهرست مطالب

فهرست مطالب .....	هشت
فهرست اشکال .....	یازده
فهرست جداول .....	چهارده
فهرست علائم و نمادها .....	پانزده
چکیده .....	۱

#### فصل اول: مقدمه

۱-۱ تشکیل برفک .....	۲
۲-۱ مروری بر کارهای انجام شده .....	۵
۱-۲-۱ تشکیل برفک با جریان اجباری .....	۵
۲-۲-۱ تشکیل برفک در جابجایی آزاد .....	۱۷
۳-۱ اهمیت موضوع و هدف آن .....	۲۴

#### فصل دوم: شرح دستگاه و روش آزمایش

۱-۲ تجهیزات آزمایشگاهی .....	۶۲
۱-۱-۲ آماده سازی قطعه آزمایش .....	۲۶
۲-۱-۲ اتاق کنترل .....	۲۸
۳-۱-۲ واحد سرمایش محیط آزمایش .....	۳۰
۴-۱-۲ واحد گرمایش محیط آزمایش .....	۳۱
۵-۱-۲ واحد سرمایش مبرد .....	۳۱
۶-۱-۲ واحد رطوبت ساز .....	۳۲
۷-۱-۲ واحد ثبت داده ها .....	۳۲
۸-۱-۲ کامپیوتر و نرم افزار .....	۳۲
۲-۲ اندازه گیری .....	۳۳
۱-۲-۲ اندازه گیری دمای سیال مبرد .....	۳۴
۲-۲-۲ اندازه گیری دمای اتاق و رطوبت نسبی .....	هشت

- ۳-۲-۳ اندازه گیری دمای دی‌واره ها و سقف ..... ۳۴
- ۴-۲-۲ اندازه گیری ضخامت برفک ..... ۳۴
- ۵-۲-۲ اندازه گیری نرخ انتقال حرارت ..... ۳۶
- ۶-۲-۲ کالی‌بره کردن ابزار اندازه گیری ..... ۳۷
- ۳-۲ روند آزمایش ..... ۳۸

### فصل سوم: نتایج

- ۱-۳ مقدمه ..... ۴۰
- ۲-۳ بررسی تجربی تشکیل برفک روی یک مبدل لوله وپره در جریان طبیعی ..... ۴۰
- ۱-۲-۳ تشکیل برفک ..... ۴۲
- ۲-۲-۳ ضخامت برفک ..... ۴۸
- ۳-۲-۳ انتقال حرارت ..... ۵۷
- ۳-۳ تکرار پذیری آزمایش ها ..... ۵۹
- ۴-۳ روابط تجربی ..... ۶۰
- ۵-۳ تحلیل خطا و عدم قطعیت ..... ۶۴
- ۱-۵-۳ خطا در اندازه گیری دمای هوای محیط ..... ۶۴
- ۲-۵-۳ خطا در اندازه گیری رطوبت نسبی هوا ..... ۶۴
- ۳-۵-۳ خطای اندازه گیری دمای مبرد ..... ۶۴
- ۴-۵-۳ خطای اندازه گیری ضخامت برفک ..... ۶۵
- ۵-۵-۳ تحلیل عدم قطعیت ..... ۶۵
- ۶-۳ مدل سازی تشابهی ..... ۶۶
- ۷-۳ مشاهده ی جریان طبیعی ..... ۷۲

### فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱-۴ نتیجه گیری ..... ۷۳
- ۲-۴ پیشنهادات ..... ۷۴



مراجع ..... ۷۵

پیوست الف: خواص ..... ۷۸

پیوست ب: روابط تجربی

ب-۱ مقدمه ..... ۸۰

ب-۲ روابط تجربی ..... ۸۰

ب-۳ ضریب تعین ..... ۸۲

ب-۴ خطای مربعات متوسط ری شه ..... ۸۲

پیوست ج: خطا، دقت و عدم قطعیت

ج-۱ خطا ..... ۸۳

ج-۲ دقت ..... ۸۵

ج-۳ عدم قطعیت ..... ۸۵

پیوست د: مشخصات ابزار اندازه گیری

د-۱ مقدمه ..... ۸۷

د-۲ واحد ثبت داده ها ..... ۸۷

د-۳ اندازه گیری دما و رطوبت اتاق کنترل ..... ۸۹

د-۴ ابزار اندازه گیری در کالیبراسیون ..... ۹۰

د-۴-۱ Testo 735-1 ..... ۹۰

د-۴-۲ Testo 174H ..... ۹۰

د-۴-۳ Testo 881 ..... ۹۱

د-۵ اندازه گیری ضخامت برفک ..... ۹۲

د-۵-۱ Canon S3IS ..... ۹۲

د-۵-۲ Logitech C615 ..... ۹۴

د-۵-۳ Canon LEGRIA FS-405 ..... ۹۵

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: تشکیل برفک روی مبدل لوله و پره در جابجایی سبب می<sup>ده</sup> ..... ۳

- شکل ۱-۲: نمودار سایکرومتریک فرایند تشکیل برفک ..... ۴
- شکل ۱-۳: آزمایش‌های و رو [۴]: (آ) شماتیک از قطعه تست و محیط آزمایش و (ب) تفاوت ضخامت برفک دور لوله ..... ۶
- شکل ۱-۴: تغییرات زمانی زبری سطح برفک [۵] ..... ۷
- شکل ۱-۵: تغییرات زمانی و مکانی ضریب انتقال حرارت [۵] ..... ۸
- شکل ۱-۶: روند رشد لایه‌ی برفک در لبه‌ی جلویی صفحه [۶] ( $V = 2.3 \text{ m/s}$ ,  $RH = 60\%$ ,  $T_a = 22.5^\circ\text{C}$ ) ..... ۹
- شکل ۱-۷: نتایج تجربی مرتبه‌ی فوق‌اشباعی برای سطوح متفاوت [۷] ..... ۱۰
- شکل ۱-۸: شکل برفک روی صفحه سرد: (آ) برفک اولیه (ب) رشد برفک و (پ) پوشاندن سطح سرد توسط برفک [۷] ..... ۱۰
- شکل ۱-۹: مدل فیزیکی رشد برفک [۸] ..... ۱۱
- شکل ۱-۱۰: مقایسه‌ی نتایج تجربی به محاسباتی برای (آ) مدل اشباع (ب) مدل فوق‌اشباع [۹] ..... ۱۲
- شکل ۱-۱۱: شکل ظاهری کریستال‌های برفک: (آ) صفحه مانند (ب) ستون مانند [۸] ..... ۱۲
- شکل ۱-۱۲: (آ) مبدل مورد مطالعه‌ی لنتیک و همکاران و (ب) دامنه‌ی محاسباتی آنها [۱۰] ..... ۱۱۳
- شکل ۱-۱۳: توزیع طولی ضریب انتقال حرارت روی سطح لایه‌ی برفک ( $V = 1 \text{ m/s}$ ,  $w = 0.002 \text{ kg/kg}_a$ ,  $T_a = 12$ ) ..... ۱۴
- شکل ۱-۱۴:  $(T_s = -12^\circ\text{C})$  [۱۰] ..... ۱۴
- شکل ۱-۱۴: الگوی تشکیل برفک روی می‌کروکانال [۱۱] ..... ۱۵
- شکل ۱-۱۵: تجمع برفک روی نمونه در وضعیت لوله‌های افقی [۱۲] ..... ۱۶
- شکل ۱-۱۶: تجمع برفک روی نمونه در وضعیت لوله‌های عمودی [۱۳] ..... ۱۶
- شکل ۱-۱۷: مجموعه‌ی آزمایشگاهی فاسا و تاندا [۱۴] ..... ۱۸
- شکل ۱-۱۸: مقایسه‌ی نتایج تجربی (خطوط) و مدل‌سازی (نقاط) در پژوهش فاسا و تاندا برای تشکیل برفک بصورت طبیعی روی یک صفحه‌ی عمودی [۱۴] ..... ۱۹
- شکل ۱-۱۹: روند تغییرات تشکیل برفک روی پره‌ی یک مبدل در جابجایی طبیعی [۱۵] ..... ۲۰
- شکل ۱-۲۰: مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی تشکیل برفک در جابجایی طبیعی در پژوهش تهور و یعقوبی [۱۸] ..... ۲۲
- شکل ۱-۲۱: مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی تشکیل برفک در جابجایی طبیعی در پژوهش تهور و یعقوبی [۱۸] ..... ۲۲
- شکل ۱-۲۲: مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی تشکیل برفک در جابجایی طبیعی در پژوهش تهور و یعقوبی [۱۸] ..... ۲۳
- شکل ۱-۲۳: نحوه تشکیل برفک با جابجایی آزاد روی پره‌ها و نبودن برفک داخل پره‌ها در پژوهش مهدوی و یعقوبی ..... ۲۳
- شکل ۱-۲۴: [۱۹] ( $T_s = -7^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 25^\circ\text{C}$ ,  $\phi = 35\%$ ,  $t = 700 \text{ min}$ ) ..... ۲۴
- شکل ۱-۲۵: (آ) مبدل لوله و پره، (ب) نمای جانبی قطعه تست و (ج) معادله‌ی موقعیت‌های اندازه‌گیری‌نی‌ز نام‌گذاری شده‌ی از ..... ۲۵
- شکل ۱-۲۶: (آ) مبدل لوله و پره، (ب) نمای جانبی قطعه تست و (ج) معادله‌ی موقعیت‌های اندازه‌گیری‌نی‌ز نام‌گذاری شده‌ی از ..... ۲۶
- شکل ۱-۲۷: ..... ۲۷

- شکل ۲-۲: نحوه ی قرارگیری عایق های حرارتی و ترموکوپل ها ..... ۲۷.
- شکل ۳-۲: پای ۴ ی نگهدارنده ی قطعه آزمایش ..... ۲۸.
- شکل ۴-۲: شمایی کلی از اتاقک کنترل و تجهیزیات ..... ۲۹.
- شکل ۵-۲: اتاق کنترل ..... ۳۰.
- شکل ۶-۲: لایه های تشکیل دهنده ی اتاق کنترل ..... ۳۰.
- شکل ۷-۲: واحد سرمایش محیط آزمایش ..... ۳۱.
- شکل ۸-۲: واحد سرمایش میرد ..... ۳۱.
- شکل ۹-۲: (آ) سیکل بسته، (ب) سیکل باز واحد سرمایش میرد ..... ۳۲.
- شکل ۱۰-۲: نرم افزار لوک اوت جهت تنظیم دما و رطوبت اتاق کنترل ..... ۳۳.
- شکل ۱۱-۲: نرم افزار آدام وی و جهت نمایش دمای اندازه گیری شده توسط ترموکوپل ها ..... ۳۳.
- شکل ۱۲-۲: ترانسمیتر TMH-1 و سنسور Pt-100 ..... ۳۴.
- شکل ۱۳-۲: نمایشگر دما و رطوبت ..... ۳۵.
- شکل ۱۴-۲: وسایل تصویری برداری جهت مشاهده ی نحوه ی رشد و ضخامت برفک ..... ۳۵.
- شکل ۱۵-۲: موقعیت قرارگیری دوربین ها اطراف قطعه آزمایش ..... ۳۶.
- شکل ۱۶-۲: نحوه قرارگیری تجهیزیات آزمایشگاهی، اندازه گیری و تصویری برداری ..... ۳۶.
- شکل ۱۷-۲: ابزار اندازه گیری مورد استفاده در کالیبراسیون (آ) Testo 735-1 (ب) Testo 174 H ..... ۳۸.
- شکل ۱۸-۲: عایق کردن مبدل قبل از آزمایش ..... ۳۹.
- شکل ۱-۳: تصویری حرارتی قطعه تست با استفاده از دستگاه Testo 881 که دارای دقت  $\pm 0.2$  درجه ی سانتی گراد است. .... ۴۱.
- شکل ۲-۳: روند تشکیل و رشد برفک در شرایط  $T_a = 30^\circ\text{C}, T_{\text{ref,m}} = -10^\circ\text{C}, \text{RH} = 70\%$  (آ) نمای روبروی مبدل حرارتی و (ب) بخشی از مبدل از نمای نزدیکی در زمان های متفاوت ..... ۴۳.
- شکل ۳-۳: روند تشکیل و رشد برفک در ناحیه ی پایینی مبدل در شرایط  $T_a = 30^\circ\text{C}, T_{\text{ref,m}} = -20^\circ\text{C}, \text{RH} = 70\%$  ..... ۴۴...%
- شکل ۴-۳: روند تشکیل و رشد برفک در قسمت پایینی مبدل در شرایط  $T_a = 20^\circ\text{C}, T_{\text{ref,m}} = -20^\circ\text{C}, \text{RH} = 50\%$  ..... % ۴۵.
- شکل ۵-۳: روند تشکیل و رشد برفک در تمامی سطح مبدل از روبرو در شرایط  $T_a = 30^\circ\text{C}, T_{\text{ref,m}} = -20^\circ\text{C}, \text{RH} = 60\%$  ..... ۴۶20
- شکل ۶-۳: تشکیل برفک روی لبه ی پره ها ..... ۴۷.
- شکل ۷-۳: تشکیل برفک در سطح زیرین مبدل  $T_a = 20^\circ\text{C}, T_{\text{ref,m}} = -20^\circ\text{C}, \text{RH} = 60\%$  ..... ۴۷.

- شکل ۳-۸: موقعیت دید دوربین عکس برداری در شکل های ۳-۹، ۳-۱۰ و ۳-۱۱..... ۴۸
- شکل ۳-۹: روند تشکیل و رشد برفک از نمای جانبی پره ها در شرایط  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH} = 60\%$ ..... ۴۹
- شکل ۳-۱۰: روند تشکیل و رشد برفک از نمای حانه پره ها در شرایط  $T_{\text{ref},m} = -20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH} = 60\%$ ..... ۵۰
- شکل ۳-۱۱: روند تشکیل و رشد برفک از نمای پره دوازده ر شرایط  $T_{\text{ref},m} = -20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۱
- شکل ۳-۱۲: تاثیر رطوبت نسبی هوا بر نرخ رشد برفک در شرایط  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{ref},m} = -20^{\circ}\text{C}$  برای رطوبت نسبی مختلف محیطی در نقاط مختلف پره از سطح مبدل..... ۵۳
- شکل ۳-۱۳: میزان تاثیر رطوبت نسبی هوا بر رشد برفک در موقعیت های مختلف پره در شرایط  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۴
- شکل ۳-۱۴: تاثیر تغییر دمای هوای محیطی بر نرخ رشد برفک در نقاط مختلف سطح پره در شرایط  $T_{\text{ref},m} = -20^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۵
- شکل ۳-۱۵: میزان تاثیر دمای هوای محیطی بر رشد برفک در موقعیت های مختلف پره در شرایط  $\text{RH} = 60\%$ ..... ۵۶
- شکل ۳-۱۶: تاثیر دمای متوسط مبرد بر نرخ رشد برفک در شرایط  $\text{RH} = 70\%$ ,  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$  در موقعیت های متفاوت..... ۵۷
- شکل ۳-۱۷: میزان تاثیر دمای متوسط مبرد بر رشد برفک در موقعیت های مختلف پره در شرایط  $\text{RH} = 70\%$ ,  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۸: نواحی متناظر انتقال حرارت و سطح مبدل و تاثیر افزایش دمای متوسط مبرد بر نرخ انتقال حرارت از مبدل لوله و پره در شرایط  $\text{RH} = 70\%$ ,  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۹: تاثیر افزایش دمای محیطی بر نرخ انتقال حرارت در شرایط  $\text{RH} = 60\%$ ,  $T_{\text{ref},m} = -20^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۹
- شکل ۳-۲۰: تاثیر افزایش رطوبت نسبی بر نرخ انتقال حرارت در شرایط  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{ref},m} = -20^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۹
- شکل ۳-۲۱: مقایسه نرخ انتقال حرارت در دو آزمایش یکسان جهت بررسی تکرار پذیری آزمایشات..... ۶۰
- شکل ۳-۲۲: مقایسه داده های تجربی با داده های حاصل از رابطه ی (۳-۱)..... ۶۲
- شکل ۳-۲۳: مقایسه داده های تجربی با داده های حاصل از رابطه ی (۳-۲)..... ۶۳
- شکل ۳-۲۴: مقایسه داده های تجربی با داده های حاصل از رابطه ی (۳-۳)..... ۶۳
- شکل ۳-۲۵: مقایسه داده های تجربی با داده های حاصل از رابطه ی (۳-۴)..... ۶۴
- شکل ۳-۲۶: مقایسه ی نتایج مدل سازی با داده های تجربی در شرایط  $T_{\text{ref},m} = -15^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH} = 70\%$ ,  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ..... ۷۰

شکل ۳-۲۷: مقایسه ی نتایج مدل سازی با داده های تجربی در شرایط  $T_{ref,m} = -10^{\circ}C$ ,  $RH = 70\%$ ,  $T_a = 20^{\circ}C$

۷۰.....

شکل ۳-۲۸: تاثیر دمای متوسط مبرد روی تغییرات چگالی برفک با گذشت زمان در شرایط  $RH = 70\%$ ,  $T_a = 20^{\circ}C$

۷۱.....

شکل ۳-۲۹: تاثیر دمای متوسط مبرد روی تغییرات دمای سطح برفک با گذشت زمان در شرایط  $RH = 70\%$ ,  $T_a = 20^{\circ}C$

شکل ۳-۳۰: مشاهده ی جریان در آ (سطح بالایی ب) سطح پایینی پ) سطح کناری مبدل حرارتی در

شرایط  $T_{ref,m} = 2^{\circ}C$ ,  $RH = 50\%$ ,  $T_a = 20^{\circ}C$  , ۷۲.....

شکل د-۱: دستگاه های واحد اکتساب آ) AM-4522 سی زده MOXA ioLogik E221 ۸۹.....

## فهرست جداول

جدول ۱-۱: شرایط آزمایش لی و رو [۴]..... ۶.....

جدول ۲-۱: شرایط آزمایش یون و همکاران [۵]..... ۷.....

جدول ۳-۱: شرایط آزمایش چنگ و شی و [۶]..... ۸.....

جدول ۴-۱: مشخصات مبدل مورد مطالعه لئی ک و همکاران [۱۰]..... ۱۳.....

جدول ۵-۱: مشخصات مبدل مورد مطالعه ژو و همکاران [۱۲]..... ۱۵.....

جدول ۶-۱: شرایط آزمایش ژو و همکاران [۱۲]..... ۱۷.....

جدول ۷-۱: شرایط آزمایش وانگ و همکاران [۱۵]..... ۱۹.....

جدول ۸-۱: شرایط آزمایش خوشنظر و ی عقوبی [۱۶]..... ۲۱.....

جدول ۱-۲: مشخصات قطعه آزمایش..... ۲۸.....

جدول ۱-۳: شرایط آزمایشات انجام شده در این پژوهش..... ۴۱.....

جدول ۲-۳: مقدار متوسط ضخامت لایه ی برفک بر حسب تغییر دمای مبرد مربوط به شکل ۳-۹..... ۴۹.....

جدول ۳-۳: مقدار متوسط ضخامت لایه ی برفک بر حسب تغییر دمای محیط مربوط به شکل ۳-۱۰..... ۵۰.....

جدول ۴-۳: مقدار متوسط ضخامت لایه ی برفک بر حسب تغییر رطوبت نسبی مربوط به شکل ۳-۱۱..... ۵۲.....

جدول ۵-۳: متغیرهای بدون بعد سازی با توجه به ابعاد مبدل در جدول ۲-۱..... ۶۱.....

جدول ۶-۳: ضریب تعین برای روابط تجربی..... ۶۲.....

جدول ۷-۳: میزبان دقت فرآیندها..... ۶۵.....

جدول ۸-۳: عدم قطعیت روابط..... ۶۶.....

جدول ۹-۳: ضرایب معادله (۳-۹) و (۳-۱۰)..... ۶۸.....

- جدول الف-۱: خواص ترموفیزیکی هوا..... ۷۸.....
- جدول الف-۲: خواص ترموفیزیکی یخ..... ۷۹.....
- جدول الف-۳: خواص ترموفیزیکی برفک..... ۷۹.....

## فهرست علائم و نمادها

چهارده

### نمادهای لاتین

$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J/kg.K$ )
$d$	فاصله بین پره ها (m)
$F$	ضریب دید
$F_o$	عدد فوری ه براساس خواص یخ
$g$	شتاب گرانش ( $m/s^2$ )
$Gr$	عدد گرافش
$h$	ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $W/m^2.K$ )
$h_{lat}$	گرمای نهان ( $J/kg$ )
$h_m$	ضریب انتقال جرم ( $m/s$ )
$k$	ضریب هدایت حرارتی ( $W/m.K$ )
$l$	ارتفاع پره (m)
$Le$	عدد لویی س
$n$	دبی جرمی ( $kg/s$ )
$Nu$	عدد ناسلت
$P$	فشار (Pa)
$Nu$	عدد ناسلت جریان
$q$	نرخ انتقال حرارت (W)
$V$	سرعت ( $m/s$ )
$Ra$	عدد رایلی
$Re$	عدد ری نولدز
$RH$	رطوبت نسبی

S	مرتبه ی فوق اشباعی
Sh	عدد شروود
t	زمان (s)
T	دما (°C)
w	نسبت رطوبت ( $kg/kg_a$ )
W	دیوار
x	فاصله از بالای پره (m)

### نمادهای یونانی،

$\alpha$	پانزده ضریب نفوذ حرارتی ( $m^2/s$ )
$\beta$	ضریب انبساط حجمی ( $1/k$ )
$\sigma$	ثابت استفان-بولتزمن ( $W/m^2.K^4$ )
$\varepsilon$	ضریب صدور تشعشع
$\delta$	ضخامت برفک (mm)
$\nu$	لزجت سینماتیکی ( $m^2/s$ )
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )

### زیرنویس‌ها

a	هوا
cond	هدایت
conv	جابجایی
exp	تجربی
f	برفک
fs	سطح برفک
lat	نهان
m	متوسط
mod	مدل
pre	پیش‌بینی شده
rad	تشعشع
ref	میرد
s	سطح سرد
sat	اشباع

## بالا نویس

بدون بعد

شانزده

## چکیده

در صنایع تبرید و تهویه مطبوع به طور عمده مبدل های لوله و پره به عنوان اواپراتور مورد استفاده واقع می شوند. روی سطح این مبدل ها بدلیل دمای پایینی، در بسیاری از موارد برفک تشکیل می شود. برفک تشکیل شده بر روی پره ها عملکرد سیستم را تحت تأثیر قرار می دهد و باعث کاهش انتقال حرارت بین سیستم و محیط اطراف می شود. جهت طراحی چنین سیستم های از نظر برفک زدایی و افزایش انتقال حرارت نیاز به دانستن جزئیات روند تشکیل برفک بر روی چنین مبدل های می باشد. مروری بر کارهای گذشته نشان می دهد که کار های بسیاری اندکی بر روی چنین مبدل های در جریان جابجایی طبیعی صورت گرفته است. بنابراین در این پژوهش سعی شده است به صورت تجربی عملکرد یک نوع از مبدل های لوله و پره صفحه ای در شرایط مختلف محیطی و همچنین دمای مبرد مورد بررسی قرار گیرد.

برای انجام آزمایشات از اتاق کنترل مخصوصی که می تواند شرایط دلخواه را تامین نماید، استفاده شده است. با بهره گیری از تجهیزاتی سرمایش، گرمایش و رطوبت زنی، شرایط کنترل شده مانند رطوبت نسبی محیط بین ۵۰٪ تا ۷۰٪، دمای هوای محیط بین ۲۰°C تا ۳۰°C و دمای متوسط مبرد بین ۲۰°C تا ۱۰°C- تغییر داده شده است. در هر موردی که متغیر هنگامی که سایر متغیرها ثابت بوده تغییر داده شده و اثرات آن مطالعه و بررسی شده است. نتایج شامل نحوه رشد برفک، تغییرات ضخامت برفک و تأثیر آن روی میزان انتقال حرارت بین مبدل و محیط اطراف می باشد. ضخامت لایه ی برفک به واسطه ی تغییرات ضخامت لایه های مرزی سرعت، گرما و غلظت متغیر است. با افزایش رطوبت نسبی و کاهش دمای مبرد، ضخامت لایه ی برفک افزایش می یابد اما با افزایش دمای محیط، تادمای حدود زیر ۳۰ درجه سانتی گراد رشد برفک افزایش و در دماهای



بالا تر، عدم رشد ضخامت لایه ی برفک مشاهده شده است. همچنین ضخامت لایه ی برفک در قسمت های بالای مبدل بیشتر از پایین آن است. نرخ انتقال حرارت در ابتدای آزمایش افزایش و سپس کاهش یافته تا به مقدار تقریباً ثابتی می رسد. با افزایش هر کدام از شرایط محیطی نرخ انتقال حرارت نیز افزایش می یابد. بر اساس داده های آزمایش رابطه های تجربی بدون بعد برای تغییرات ضخامت لایه ی برفک و نرخ انتقال حرارت بر اساس داده های تجربی ارائه گردیده است. مدل سازی انتقال جرم با استفاده از روش تشابه با انتقال حرارت با فرض شرایط فوق اشباع بر روی لایه ی برفک صورت گرفته است و نتایج حاصل از مدل سازی انطباق خوبی با داده های تجربی از نظر رشد برفک با زمان دارد.

**کلمات کلیدی:** جابجایی طبیعی، تشکیل برفک، مبدل لوله و پره، شرایط محیطی

## فصل اول

### مقدمه

برفک<sup>۱</sup> زمانی تشکیل می شود که هوای مرطوب به سطحی سرد که دمایش زیر دمای انجماد<sup>۲</sup> آب باشد برخورد کند. این پدیده، فرآیند انتقال حرارت را مخصوصاً در تهویه مطبوع، یخچال ها، صنایع تبرید و مبدل ها تحت تأثیر قرار می دهد. لایه ی متخلخل<sup>۳</sup> برفک که به روی سطح سرد تشکیل می شود به عنوان یک لایه ی عایق گرمایی بر روی مبدل ها عمل کرده و سبب می گردد نرخ انتقال حرارت کاهش یابد. این لایه همچنین

<sup>۱</sup> Frost

<sup>۲</sup> Freezing point

<sup>۳</sup> Porous

جریان هوا را نیز مجبوس کرده و بنابراین عملکرد مبدل حرارتی را کاهش می دهد. برخی از نمونه های تشکیل برفک بر روی ابزار صنایع تبریدی در شکل ۱-۱ دیده می شود.

### ۱-۱ تشکیل برفک

در صورتی که دمای سطح از دمای انجماد آب بالاتر باشد قطرات ریز آب بر روی سطح ایجاد می شود اما در صورتی که دمای سطح زیر دمای انجماد آب باشد بخار آب موجود در هوا به صورت برفک بر روی سطح دیده خواهد شد که به پدیده ی انتقال از فاز بخار به فاز جامد فروزش<sup>۱</sup> گفته می شود.



شکل ۱-۱: تشکیل برفک روی مبدل لوله و پره در جابجایی طیعی

برای شروع فرایند تشکیل برفک به شرایط رطوبت و دمایی مشخص نیاز است. هنگامی که دمای سطح بالای نقطه شبنم است تنها انتقال حرارت محسوس اتفاق می افتد. اگر دمای سطح به زیر نقطه شبنم و بالای  $0^{\circ}\text{C}$  برسد چگالش بخار آب اتفاق می افتد (بین  $A-A'$ ) و اگر دمای سطح کمتر از  $0^{\circ}\text{C}$  باشد بخار چگالیده شده ممکن است یخ بزند (بین  $A'-B$ ). در حالتی که هم دمای سطح و هم نقطه شبنم زیر  $0^{\circ}\text{C}$  باشد بخار آب مستقیماً تبدیل به جامد می شود. در هر دو حالت، بین دمای سطح و نقطه شبنم بایستی اختلاف دمای  $\Delta T_{\text{sup}}$  یا اصطلاحاً درجه فوق سرد<sup>۲</sup> قبل از تغییر فاز اتفاق افتاده باشد. همان طور که در شکل ۱-۲ دیده می شود این اختلاف دما باعث ایجاد اختلاف نسبت رطوبت  $\Delta \omega_{\text{sup}}$  بین جریان هوا و سطح سرد می شود که به آن درجه فوق اشباع<sup>۳</sup> (supersaturation degree) گفته می شود (رابسون و همکاران [۱]).

ابتدا بخار آب در جریان هوا ( $A$ ) تا زیر نقطه شبنم سرد می شود ( $A'$ ). این اتفاق در لایه مرزی حرارتی اتفاق می افتد. به دلیل انرژی سطح آزاد، تشکیل برفک زمانی آغاز می شود که یک دیواره انرژی<sup>۴</sup> بوسیله سرمایش اضافی

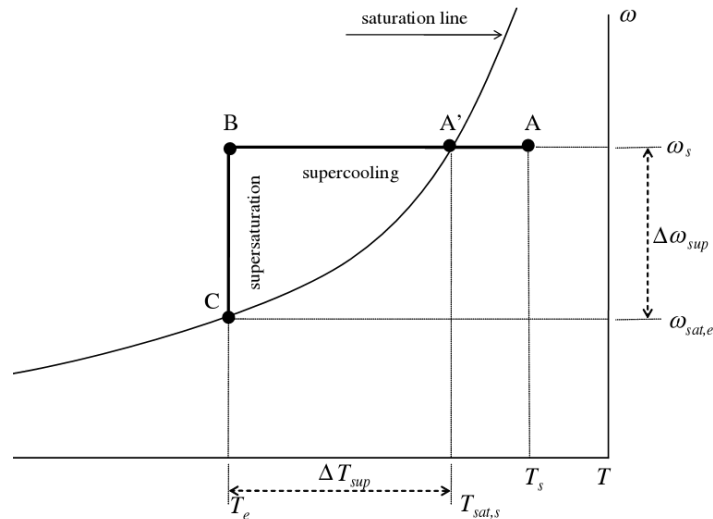
<sup>1</sup> Desublimation

<sup>2</sup> Supercooling degree

<sup>3</sup> Supersaturation degree

<sup>4</sup> Energy barrier

جریان را به نقطه B برساند. سپس تغییر فاز در فرایند (B-C) اتفاق می افتد. کل انتقال حرارت افتاده مجموع حرارت محسوس (A-B) و حرارت نهان (B-C) می باشد.



شکل ۱-۲: نمودار سایکرومتریکی فرایند تشکیل برفک

هایاشی<sup>۱</sup> [۲] تشکیل برفک را به سه دوره ی زمانی تقسیم می کند. در طی دوره اول، رشد برفک ی یک بعدی در نظر گرفته می شود. در دوره ی دوم، رشد برفک سه بعدی می شود که این بدین معنی است که چگالی برفک هنگامی که ارتفاع آن زیاد می شود، افزایش می یابد. دوره ی سوم زمانی آغاز می گردد که دمای سطح برفک به  $0^{\circ}\text{C}$  برسد.

بر اساس نتایج تجربی [۲] فرض می شود که چگالی برفک در دوره ی اول  $100 \text{ kg/m}^3$  می باشد. مدت زمان این دوره بین یک تا دو ساعت است. در طول دوره ی دوم، قسمتی از بخار آب منتقل شده از محیط به لایه ی برفک جهت افزایش ضخامت برفک و بقیه جهت افزایش چگالی برفک در نظر گرفته می شود. این واقعیت که در طول این دوره هم ضخامت و هم چگالی برفک افزایش می یابد مورد توافق اکثر پژوهشگران است. اما چگونگی توزیع بخار آب برای ضخامت برفک و چگال تر کردن آن بین همه پژوهشگران مورد توافق نمی باشد. کرامر و مهرا<sup>۲</sup> [۳] فرض کردند که در حالت شبه پای، انتقال جرم به دو نیمه تقسیم می شود. یک نیمه برای چگال تر کردن لایه و نیمه دیگ جهت افزایش ضخامت لایه ی برفک بکار می رود. نتایج تجربی نشان می دهد که حتی تا زمانی که دمای سطح برفک به  $0^{\circ}\text{C}$  می رسد ضخامت برفک همچنان زیاد می شود. بنابراین در طی زمانی که دمای سطح برفک به  $0^{\circ}\text{C}$  می رسد همچنان فرض می شود که بخشی از انتقال جرم به برفک صرف

<sup>1</sup> Hayashi

<sup>2</sup> Cremers and Mehra

افزایش چگالی تا  $800 \text{ kg/m}^3$  می گردد. هنگامی که چگالی برفک به مقدار نهایی می رسد، لایه ی برفک توانایی جذب بیشتر آب روی سطح لایه را ندارد و چگالی لایه ثابت باقی می ماند. از لحاظ تئوری هنگامی که پدیده ی انتقال به این مرحله می رسد لایه ی برفک تبدیل به یخ جامد می شود. اما به هر حال، تا زمانی که حفره های ی از هوا در لایه ی سیال حبس شده باشد، لایه برفک تبدیل به یخ جامد نخواهد شد. دوره ی سوم زمانی آغاز می شود که چگالی برفک به  $800 \text{ kg/m}^3$  می رسد. در این دوره چگالی برفک ثابت باقی می ماند. در این دوره فرض می شود که جرم برفک و ضخامت آن ثابت است و این بدان معنی است که میزان قطراتی که از سطح لایه ی برفک می چکد برابر با میزان بخار آب مایع شده بر روی سطح است. تشکیل و رشد برفک در حالت جابجایی آزاد یا اجباری روی سطوح مختلف متفاوت است و تحقیقات مفصلی در هر مورد انجام شده که در ادامه، موارد مربوط به پژوهش حاضر مرور خواهد شد. در صورتی که  $Gr/Re^2 \ll 1$  باشد، جریان اجباری در نظر گرفته می شود، با شرط  $Gr/Re^2 \gg 1$  جریان آزاد خواهد بود و در حالت  $Gr/Re^2 \approx 1$  جریان به صورت ترکیبی اجباری-آزاد در می آید.

#### ۲-۱ مروری بر کارهای انجام شده

بسیاری از پژوهشگران روی موضوع تشکیل برفک، خواص آن، و فرایند انتقال حرارت در حین تشکیل برفک مطالعه نموده اند. در بسیاری از صنایع که درگیر تشکیل برفک می باشند ممکن است هر یک از جریان های آزاد یا اجباری مورد نظر باشد. مطالعه ی تجربی، عددی و تحلیلی تشکیل برفک نیز به دو دسته ی کلی جریان آزاد و جریان اجباری تقسیم بندی می گردد. هر یک از جریان ها خود با مطالعه بر روی صفحات صاف، لوله های ساده و لوله های دارای پره تقسیم بندی می شود. شکل ابزاری که برفک بر روی آن تشکیل می شود برخواص آن و میزان انتقال حرارت تأثیرگذار است. در این بخش تلاش بر آن است که خلاصه ای از پژوهش های اخیر در هر یک از زمینه های ذکر شده ارائه شود.

#### ۱-۲-۱ تشکیل برفک با جریان اجباری

لی و رو<sup>۱</sup> [۴] به بررسی تجربی تشکیل برفک روی یک استوانه ی افقی در جریان اجباری پرداختند. در این پژوهش آزمایشات در شرایط محیطی با رطوبت پایین انجام شده است به طوری که نقطه ی شبنم جریان هوا زیر نقطه ی انجماد آب قرار می گیرد. شرایط آزمایش آنها در جدول ۱-۱ آورده شده است. آنها دریافتند که ضخامت برفک و ضریب هدایت برفک در سطح استوانه ی کنواخت نیست، بلکه ضخامت در جلو و پشت استوانه نسبت به بالا و پایین آن بیشتر است (شکل ۱-۳) و همچنین ضریب هدایت در بالا و پایین بیشتر از جلو و عقب استوانه می باشد. آنها علت ضخیم تر بودن برفک در جلوی استوانه وجود نقطه سکون در زاویه ی صفر درجه و علت ضخیم بودن برفک در پشت را جدایش جریان در پشت استوانه و ایجاد گردابه که باعث افزایش انتقال حرارت و جرم شده است را ذکر کردند. همچنین ضخامت برفک در پشت استوانه بیشتر از جلوی

<sup>1</sup> Lee and Ro