

## مطالعه تجربی رطوبت زدایی از هوای مرطوب روی لوله پره‌دار در جابجایی آزاد

در این پژوهش با طراحی، ساخت و آماده‌سازی تجهیزات لازم، به صورت تجربی فرآیند رطوبت زدایی از هوا روی لوله پره‌دار در حالت جابجایی طبیعی مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، مشاهده فرآیند میعان روی لوله پره‌دار و بررسی تأثیر رطوبت نسبی هوا روی مقدار انتقال گرما و جرم می‌باشد. آزمایشات در شرایطی انجام شده است که دمای سطح و محیط به ترتیب برابر با ۸ و ۳۰ درجه سانتیگراد بوده و رطوبت نسبی هوا بین ۲۵ تا ۷۰ درصد تغییر کرده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد به دلیل کم بودن فاصله بین پره‌ها (۲/۳ میلی‌متر)، فقط هسته قطرات تشکیل شده روی لبه پره‌ها شرایط لازم برای رشد را دارند و در ناحیه درونی بین پره‌ها به علت محدود شدن جریان، انتقال گرما و جرم ناچیز است. همچنین ملاحظه گردید که قطرات تشکیل شده پس از رشد، روی لبه پره‌ها حرکت کرده و نهایتاً در پایین‌ترین نقطه از پره جدا شده، سقوط می‌کنند. نمودارهای تغییرات انتقال گرما و ریزش جرمی که بر اساس اندازه‌گیری‌ها به صورت زمانمند تا رسیدن به حالت پایدار برای رطوبت‌های نسبی مختلف ترسیم شده است نشان می‌دهند که با افزایش رطوبت نسبی، مقدار انتقال گرما و جرم افزایش می‌یابد.

کامران هیربدی<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

محمود یعقوبی<sup>۲</sup>

استاد

واژه‌های راهنما: جابجایی طبیعی، رطوبت زدایی، رطوبت نسبی هوا، لوله پره‌دار، میعان، نقطه شبنم

### ۱- مقدمه

یکی از متداول‌ترین روش‌های افزایش گرمای جابجایی، استفاده از سطح گسترش یافته (پره) می‌باشد. پره‌ها انواع گوناگونی دارند که از مهمترین آنها می‌توان به پره‌های مستقیم، سوزنی و حلقوی اشاره کرد. برای تقویت انتقال گرما بین لوله‌ها و محیط، معمولاً از پره‌های حلقوی با مقطع مستطیلی استفاده می‌شود. لوله با این نوع پره به طور گسترده در سیستم‌ها و صنایع مختلف از قبیل سیستم‌های تهویه مطبوع و تولید سرمایش، مبدل‌های گرمایی و فرآیندهای شیمیایی استفاده می‌شود. در برخی از کاربردها مانند فرآیندهای رطوبت زدایی، تهویه مطبوع و سرمایش، روی سطح لوله پره‌دار فرآیند میعان (چگالش) رخ می‌دهد. میعان پدیده‌ای است که در طی آن، بخار انرژی خود را به صورت گرمای نهان از دست داده و به مایع تبدیل می‌شود. میعان زمانی رخ می‌دهد که دمای بخار خالص به کمتر از دمای اشباع و یا دمای مخلوط بخار-گاز

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز kamran\_hirbodi@shirazu.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز yaghoobi@shirazu.ac.ir

به زیر دمای نقطه شبنم روی یک سطح برسد. در این هنگام انرژی بخار به صورت گرمای نهان آزاد شده، به سطح منتقل گردیده و هسته قطرات مایع روی سطح شکل می‌گیرد. به دلیل کمتر بودن دمای سطح لوله‌های پره‌دار از دمای نقطه شبنم هوای محیط در فرآیندهای رطوبت زدایی و تهویه مطبوع، همواره روی این سطوح قرآیند میعان اتفاق افتاده و انتقال گرما همراه با انتقال جرم خواهد بود.

در سال (۱۹۱۶) نخستین پژوهش در مورد پدیده میعان روی سطوح توسط ناسلت [۱] انجام گرفت. وی به صورت تحلیلی میعان بخار آب اشباع روی صفحه عمودی و لوله افقی را مدل کرد و برای محاسبه ضریب انتقال گرمای جابجایی روی این سطوح، روابطی ارائه داد. پس از ناسلت تحقیقات فراوانی در مورد پدیده میعان روی سطوح مختلف از جمله لوله پره‌دار انجام شده است که در ادامه به بخشی از مطالعات مربوط به میعان رطوبت هوا پرداخته می‌شود.

المهدی و بیگز [۲] در سال (۱۹۸۳) اولین مطالعه در مورد میعان رطوبت هوا روی پره‌های حلقوی را انجام دادند. آنها بازده کلی پره حلقوی در شرایطی که در اثر میعان کل سطح پره تر شده باشد را به صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، با زیاد شدن دما و رطوبت نسبی هوا، نرخ میعان و انتقال گرما افزایش و بازده پره کاهش می‌یابد. کانی و همکارانش [۳] به صورت عددی بازده تک پره را در شرایطی که انتقال گرما به صورت جابجایی اجباری و همراه با میعان لایه‌ای باشد، مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل، با افزایش سرعت، دما و رطوبت نسبی جریان هوا، نرخ انتقال گرما و ضخامت لایه مایع تشکیل شده روی سطح پره در اثر میعان افزایش یافته اما بازده پره کاهش می‌یابد. کانی و همکارانش [۴] در ادامه مطالعات خود، به صورت تجربی نیز انتقال گرمای جابجایی اجباری برای تک پره مستقیم که به پایه‌ای سرد متصل بوده و در مسیر جریان‌های هوای خشک و مرطوب قرار گرفته را مورد مطالعه قرار دادند. اندازه‌گیری‌های این پژوهش تاییدی بر نتایج عددی حاصل از مطالعه پیشین آنها [۳] می‌باشد. وو و بانگ [۵] به صورت تحلیلی بازده پره‌های مستقیم در حالتی که سطح پره در اثر میعان لایه‌ای نیمه تر و کاملاً تر شده باشد را بررسی کردند. هدف از این پژوهش مطالعه تأثیر رطوبت نسبی هوا و پارامترهای هندسی پره بر بازده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر در مقدار رطوبت نسبی در حالتیکه سطح پره کاملاً خشک باشد، تأثیری بر بازده نداشته اما اگر سطح پره نیمه تر و یا کاملاً تر باشد، با افزایش رطوبت نسبی بازده پره کاهش خواهد یافت. البته این کاهش برای حالت کاملاً تر بسیار اندک می‌باشد. کاظمی‌نژاد [۶] به صورت عددی انتقال گرمای جابجایی آزاد همراه با میعان لایه‌ای را برای پره‌های مستقیم کاملاً تر بررسی کرد. بر اساس نتایج حاصل، زمانیکه میعان رخ دهد مقدار انتقال گرما بیشتر از حالتی است که سطح خشک باشد و این به دلیل انتقال گرمای نهان در طی فرآیند میعان می‌باشد. همچنین با افزایش دما و رطوبت نسبی هوا و کاهش دمای سیال سرد، مقدار انتقال گرما افزایش می‌یابد. صلاح‌الدین [۷] انتقال گرما و عملکرد پره‌های مستقیم که در اثر میعان لایه‌ای نیمه تر و کاملاً تر شده باشند را به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضریب رسانایی گرمایی پره موجب زیاد شدن کارایی پره و طول ناحیه تر می‌شود. رساریو و رحمان [۸] پژوهشی مشابه با پژوهش کانی و همکارانش [۳] انجام دادند با این تفاوت که در این پژوهش پره مورد مطالعه حلقوی می‌باشد. در این مطالعه آنها به صورت عددی بازده کلی پره‌های حلقوی در حالتی که تمام سطح پره در اثر میعان لایه‌ای تر شده باشد را مورد بررسی قرار دادند. رساریو و رحمان [۹] در ادامه

پژوهش قبلی خود [۸]، انتقال گرما همراه با میعان روی پره‌های حلقوی در شرایطی که سطح پره نیمه تر شده باشد را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش تأثیر تغییرات سه پارامتر دمای سیال سرد، رطوبت نسبی و دمای هوای مرطوب بر گرمای مبادله شده بین محیط و لوله پره‌دار بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش رطوبت نسبی هوا، سبب گسترش سطح تر پره می‌شود. همچنین با کاهش دمای سیال سرد و افزایش دما و رطوبت نسبی هوا، میزان انتقال گرما افزایش می‌یابد. نافن [۱۰] در پژوهشی جامع عوامل مؤثر بر انتقال گرمای جابجایی اجباری همراه با میعان لایه‌ای روی لوله پره‌دار را در حالتی که سطح پره کاملاً خشک، نیمه تر و کاملاً تر باشد، به صورت عددی مورد مطالعه قرار داد. وی نتیجه گرفت که با افزایش عدد بایوت داخلی ( $Bi_i$ ) و خارجی ( $Bi_o$ ) دمای پره به ترتیب به دمای سیال سرد و گرم نزدیکتر می‌شود. شرقاوی و زبیر [۱۱] به صورت تحلیلی انتقال گرمای جابجایی اجباری همراه با میعان لایه‌ای روی پره حلقوی در حالتیکه تمام سطح پره تر شده باشد را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی تأثیر فشار محیط روی بازده پره نشان داده است که با افزایش فشار محیط، بازده پره افزایش می‌یابد. کاندو و بارمان [۱۲] پره‌های حلقوی با دو نوع پروفیل (مستطیلی و مثلثی) را در شرایطی که انتقال گرما همراه با پدیده میعان باشد، به صورت تحلیلی و عددی بررسی کردند. در این پژوهش انتقال گرما و میعان به ترتیب از نوع جابجایی اجباری و لایه‌ای فرض شده است و هدف بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و محیطی بر میزان انتقال گرما، بازده و کارایی پره می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد بایوت ( $Bi$ )، بازده پره و مقدار انتقال گرما افزایش و کارایی پره کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر شرقاوی و همکارانش [۱۳] انتقال گرما همراه با انتقال جرم روی پره‌های حلقوی با پروفیل‌های گوناگون را به صورت عددی مطالعه کردند. آنها با تعریف پارامتر پره، تأثیر پروفیل‌های مختلف را بررسی و نتیجه گرفتند که تغییرات بازده با این پارامتر در مقادیر کم بسیار شدید و با افزایش این پارامتر، تغییرات به تدریج ملایم‌تر می‌شود. معین‌الدین و همکارانش [۱۴] در ادامه پژوهش انجام شده توسط شرقاوی و همکاران [۱۳] به صورت عددی انتقال گرما همراه با انتقال جرم روی پره‌های حلقوی با سطح مقطع متغیر را بررسی کردند.

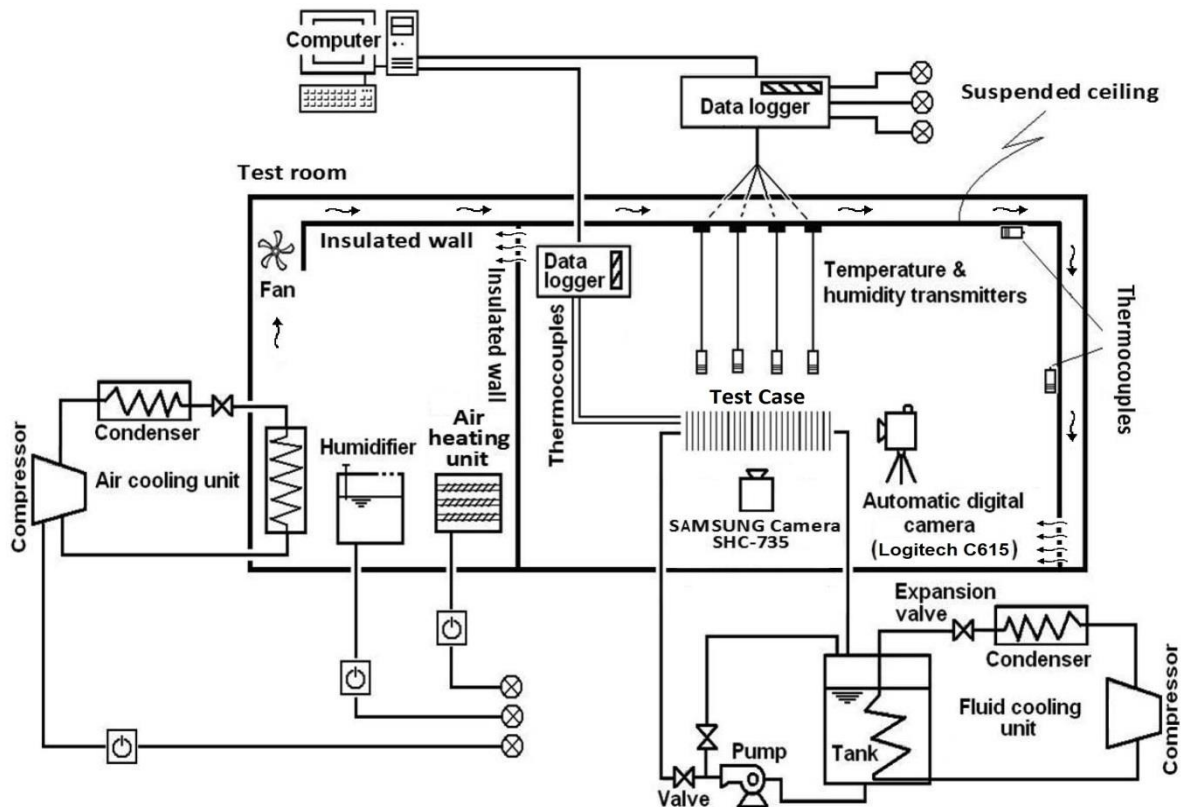
هدف از این مطالعه بهینه‌سازی پارامترهای هندسی لوله پره‌دار در شرایطی که سطح پره در اثر میعان لایه‌ای کاملاً تر شده باشد است. نبوتی و یعقوبی [۱۵] میعان رطوبت هوا روی لوله‌های افقی و مایل را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقدار انتقال گرما و جرم شدیداً وابسته به رطوبت نسبی هوا، اختلاف دمای سطح و محیط و زاویه قرارگیری لوله می‌باشند. اخیراً یعقوبی و مهدوی [۱۶] برای لوله با پره‌های فشرده انتقال گرمای جابجایی آزاد را به صورت عددی بررسی و با مطالعات مشابه دیگر مقایسه و رابطه‌ای جهت پیش‌بینی انتقال گرما ارائه کرده‌اند.

براساس مطالعات انجام شده، پژوهش‌های تجربی، تحلیلی و عددی بسیاری در زمینه بررسی انتقال گرمای جابجایی آزاد و اجباری روی لوله‌های پره‌دار انجام شده که تنها در تعدادی از آنها انتقال گرما همراه با پدیده میعان مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان، بررسی میعان بخار آب اشباع و مبردها بیشترین توجه را به خود معطوف کرده است. همچنین پژوهش‌های انجام شده در مورد میعان رطوبت هوا روی سطوح، اکثراً به صورت تحلیلی و عددی بوده و در چند مطالعه تجربی نیز پره‌ها از نوع مستقیم می‌باشند. بنابراین تاکنون پژوهشی تجربی در مورد میعان رطوبت هوا روی لوله پره‌دار فشرده انجام نشده است. از این

جهت در این پژوهش به صورت تجربی فرآیند میعان رطوبت هوا روی یک لوله پره‌دار در حالت جابجایی طبیعی بررسی و چگونگی تغییر فاز و میعان روی پره‌ها و همچنین تأثیر رطوبت نسبی هوا روی مقدار انتقال گرما و جرم مطالعه شده است.

## ۲- تجهیزات آزمایش

برای بررسی تجربی تأثیر عوامل مختلف محیطی مانند رطوبت نسبی بر انتقال گرمای جابجایی آزاد بین لوله پره‌دار و محیط زمانی که روی سطح میعان اتفاق می‌افتد، نیاز است آزمایشات در شرایط کنترل شده از نظر دمایی و رطوبتی انجام گیرند. بدین منظور از یک اتاق کنترل برای تنظیم کردن دما و رطوبت نسبی هوای محیط و یک سیستم سرمایش برای کنترل دمای سیال سرد عبوری از داخل لوله پره‌دار استفاده شده است. در شکل (۱) به صورت شماتیک اتاق کنترل و تجهیزات اندازه‌گیری نشان داده شده است.



شکل ۱- شمایی از اتاق کنترل و تجهیزات اندازه‌گیری

دما و رطوبت نسبی اتاق کنترل توسط نرم‌افزار کنترلی لوک‌اوت<sup>۱</sup> تنظیم می‌شود. این نرم‌افزار به کمک چهار سنسور مدل TMH-1 نصب شده در اتاق کنترل، دما و رطوبت نسبی هوا را خوانده و با مقادیر تعیین شده توسط کاربر مقایسه می‌کند. سپس با توجه به نتایج حاصل از این مقایسه به سیستم‌های سرمایش، گرمایش و رطوبت‌زن که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند، دستورات متناسب را صادر می‌کند.

<sup>1</sup> LookOut

دقت سنسورهای دما و رطوبت نصب شده در اتاق کنترل به ترتیب برابر با  $\pm 0.1$  درجه سانتیگراد و  $\pm 1$  درصد می‌باشد. برای تنظیم دمای سطح لوله پره‌دار نیز از واحد سرمایش سیال که در شکل (۱) مشخص شده است، استفاده می‌شود. سیال کاری در این سیکل محلول اتیلن گلیکول و آب می‌باشد. در شکل (۲) قطعه آزمایش نشان داده شده است. این قطعه یک لوله پره‌دار از نوع اکستروژن<sup>۱</sup> با طول ۳۰ سانتیمتر می‌باشد که در هر اینچ آن ۱۱ پره قرار گرفته است. لوله و پرها به ترتیب از جنس کربن استیل SA-516 با ضریب رسانایی گرمایی  $20 \text{ W/m.K}$  و آلومینیوم با ضریب رسانایی گرمایی  $200 \text{ W/m.K}$  می‌باشند.



شکل ۲- لوله پره‌دار مورد آزمایش

سایر مشخصات هندسی لوله پره‌دار در جدول (۱) مشخص شده است.

جدول ۱- خصوصیات هندسی لوله پره‌دار

گام پرها	ضخامت پرها	قطر خارجی پرها	قطر داخلی پرها	ضخامت لوله	قطر داخلی لوله	خصوصیات مقادیر (mm)
۲/۳	۰/۴	۵۶/۰	۲۵/۴	۲/۲	۲۱/۰	

پس از نصب سنسورهای دمایی درون قطعه آزمایش که در بخش اندازه‌گیری‌ها توضیح داده خواهد شد، لوله پره‌دار به صورت افقی در اتاق کنترل نصب شده است. نحوه قرارگیری قطعه آزمایش در اتاق کنترل در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

<sup>1</sup> Extruded finned-tube



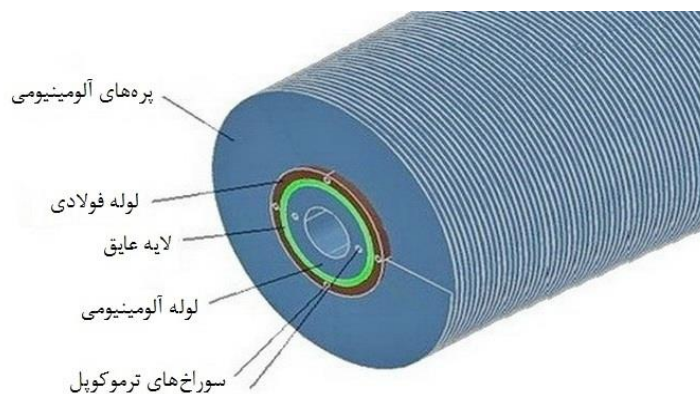
شکل ۳- نحوه قرارگیری لوله پره‌دار در اتاق کنترل

### ۳- اندازه‌گیری‌ها

یکی از اهداف این پژوهش، محاسبه مقدار گرمای منتقل شده بین پره و محیط اطرافش است. برای محاسبه این گرما، از مفهوم مقاومت گرمایی استفاده می‌شود. بر این اساس هرگاه اختلاف دما ( $\Delta T$ ) و مقاومت گرمایی ( $R$ ) بین دو نقطه مشخص باشد، می‌توان شار گرمایی منتقل شده بین آن دو نقطه را با معادله (۱) محاسبه کرد.

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_2 - T_1}{R} \quad (1)$$

بنابراین بایستی بتوان دمای دو نقطه از لوله پره‌دار که در شعاع‌های مختلف قرار دارند را اندازه‌گیری کرد. بدین منظور یک لوله آلومینیومی با قطر خارجی ۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۴/۵ میلی‌متر در مرکز لوله پره‌دار قرار داده شده است و برای ایجاد اختلاف دمای بیشتر (به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری)، فاصله بین لوله آلومینیومی و لوله فولادی با عایق حرارتی که ضریب رسانایی گرمایی آن  $0.17 \text{ W/m.K}$  می‌باشد، پر شده است. در شکل (۴) لوله پره‌دار به همراه لوله آلومینیومی و لایه عایق مشاهده می‌شوند.



شکل ۴- لوله پره‌دار به همراه لوله آلومینیومی، لایه عایق و سوراخ‌های ترموکوپل

برای اندازه‌گیری دمای دو نقطه در شعاع‌های مختلف، در لوله فولادی ۸ عدد و در لوله آلومینیومی ۴ عدد سوراخ به قطر ۱/۲ میلی‌متر در زوایا و عمق‌های مشخص مطابق با شکل (۴) ایجاد شده و درون این سوراخ‌ها ۱۲ عدد ترموکوپل نوع T (کنستانتین/مس) با دقت  $\pm 0.1$  درجه سانتیگراد قرار داده شده است. توجه شود

که دمای دو نقطه مورد نیاز برابر با میانگین دماهای اندازه‌گیری شده توسط ۴ ترموکوپل درون لوله آلومینیومی و ۸ ترموکوپل درون لوله فولادی خواهد بود. موقعیت ترموکوپل‌ها در شکل (۵) دیده می‌شود.



شکل ۵ - موقعیت ترموکوپل‌ها در قطعه آزمایش از نمای جانبی

به منظور محاسبه مقدار گرمای منتقل شده به کمک رابطه (۱) بایستی مقاومت گرمایی بین دو نقطه را نیز داشته باشیم. مقاومت گرمایی بین سوراخ‌های ایجاد شده در قطعه آزمایش برابر با مجموع مقاومت‌های رسانایی لوله آلومینیومی ( $R_1$ )، لوله فولادی ( $R_2$ )، لایه عایق ( $R_3$ ) و مقاومت تماسی ( $R_c$ ) بین این سه لایه می‌باشد.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_c \quad (2)$$

$$R_j = \frac{\ln(r_o/r_i)_j}{2k_j \pi L}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

که در رابطه (۳)  $L$  و  $k$  و  $r_o$ ،  $r_i$  و  $j$  به ترتیب نشان دهنده شعاع داخلی، شعاع خارجی، ضریب رسانایی، طول و لایه‌های مختلف قطعه آزمایش می‌باشند.

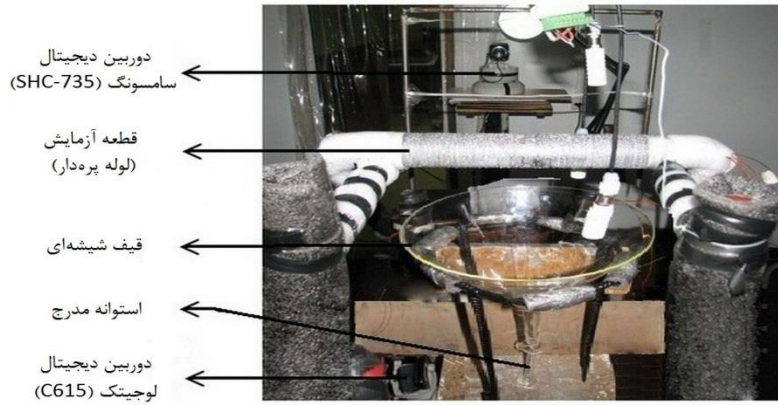
در این مطالعه برای اندازه‌گیری مقاومت گرمایی ( $R$ ) آزمایش خاصی طراحی و پس از تکرار آن به تعداد مناسب در شرایط پایدار، مقاومت گرمایی بین سوراخ‌های ایجاد شده در لوله‌های آلومینیومی و فولادی  $K/W$  ۰/۳۵ با حداکثر عدم قطعیت  $\pm 0.02 K/W$  اندازه‌گیری شده است.

برای اندازه‌گیری شارش گرمی میعان از روش اپتیکی استفاده شده است. بدین صورت که در زیر قطعه آزمایش یک کیف شیشه‌ای با سطحی آب‌گریز شده با مواد سیلیکونی قرار داده شده است. این کیف تمام قطرات چکیده شده از قطعه آزمایش را به داخل یک استوانه مدرج که گنجایش و دقت آن به ترتیب برابر با ۲۵ و  $\pm 0.2$  میلی‌لیتر می‌باشد، هدایت می‌کند. از این استوانه مدرج هر ۱۰ دقیقه به کمک دوربین دیجیتال (Logitech C615) عکسبرداری اتوماتیک شده و عکس‌ها توسط نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> آنالیز و مقدار ریزش گرمی تعیین شده است.

برای مشاهده فرآیند میعان روی لوله پره‌دار، با استفاده از یک دوربین دیجیتال دیگر که در شکل (۱) نشان داده شده است (SAMSUNG camera SHC-735) در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای از قطعه آزمایش عکس گرفته شده و سپس با بررسی این عکس‌ها تشکیل، رشد و حرکت قطرات مشاهده گردید. در شکل (۶) مجموعه جمع‌آوری قطرات بخار آب چگالیده شده و همچنین موقعیت دوربین‌ها مشاهده می‌شوند.

<sup>1</sup> Matlab





شکل ۶- قطعه آزمایش، تجهیزات جمع‌آوری و اندازه‌گیری قطرات و موقعیت دوربین‌ها

#### ۴- شرایط آزمایش

از آنجا که هدف این پژوهش، بررسی فرآیند میعان و تأثیر تغییرات رطوبت نسبی هوا روی مقدار انتقال گرما و جرم می‌باشد، دمای محیط و دمای سطح لوله پره‌دار ثابت و به ترتیب برابر با ۳۰ و ۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده و آزمایشات برای رطوبت‌های نسبی ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد انجام شده است. در جدول (۲) دمای نقطه شبنم برای این رطوبت‌های نسبی و در ارتفاع شهر شیراز از سطح دریا (۱۴۸۶ متر) آورده شده است.

جدول ۲- نقطه شبنم در دمای ۳۰°C و رطوبت‌های نسبی مختلف

رطوبت نسبی هوا (%)	۲۵	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
دمای نقطه شبنم (°C)	۷/۷	۱۴/۷	۱۸/۲	۲۱/۴	۲۳/۷

همانطور که ملاحظه می‌شود، دمای نقطه شبنم در رطوبت نسبی ۲۵ درصد زیر دمای سطح لوله پره‌دار (۸°C) و در سایر رطوبت‌های نسبی بالای دمای سطح می‌باشد. انتخاب این رطوبت‌های نسبی برای ایجاد امکان مقایسه مقدار انتقال گرما در حالت جابجایی طبیعی بدون حضور میعان و در حضور میعان می‌باشد. در کلیه آزمایشات تلاش گردید دمای سطح بیرونی لوله فولادی یا همان دمای پایه پره‌ها در طول لوله ثابت نگاه داشته شود. این شرایط با عبور سریع جریان سیال سرد با اختلاف حداکثر ۰/۲ درجه سانتیگراد در طول لوله حاصل شده است. بایستی توجه داشت که در هر آزمایش برای تامین دمای ۸ درجه سانتیگراد روی سطح بیرونی لوله یعنی  $T_2$ ، لازم است دمای سیال سرد یعنی  $T_1$  متناسب انتخاب و کنترل شود. دمای  $T_1$  تابع پارامترهای محیطی و خصوصیات فیزیکی و هندسی پره است. در جدول (۳) دمای مناسب سیال سرد برای تامین دمای ۸ درجه سانتیگراد در سطح بیرونی لوله در شرایط مختلف آورده شده است.

جدول ۳- دمای سیال سرد برای تامین دمای ۸°C در سطح بیرونی لوله در رطوبت‌های مختلف و دمای محیط ۳۰°C

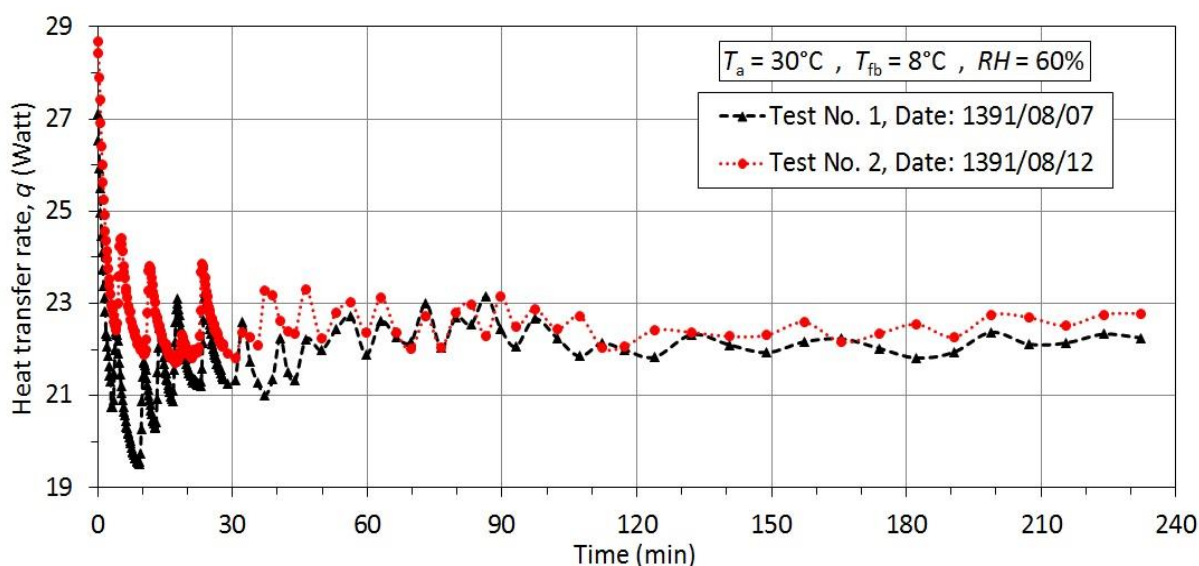
رطوبت نسبی هوا (%)	۲۵	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
دمای سیال سرد (°C)	۴/۱	۲/۲	۱/۸	۰/۴	-۱/۱



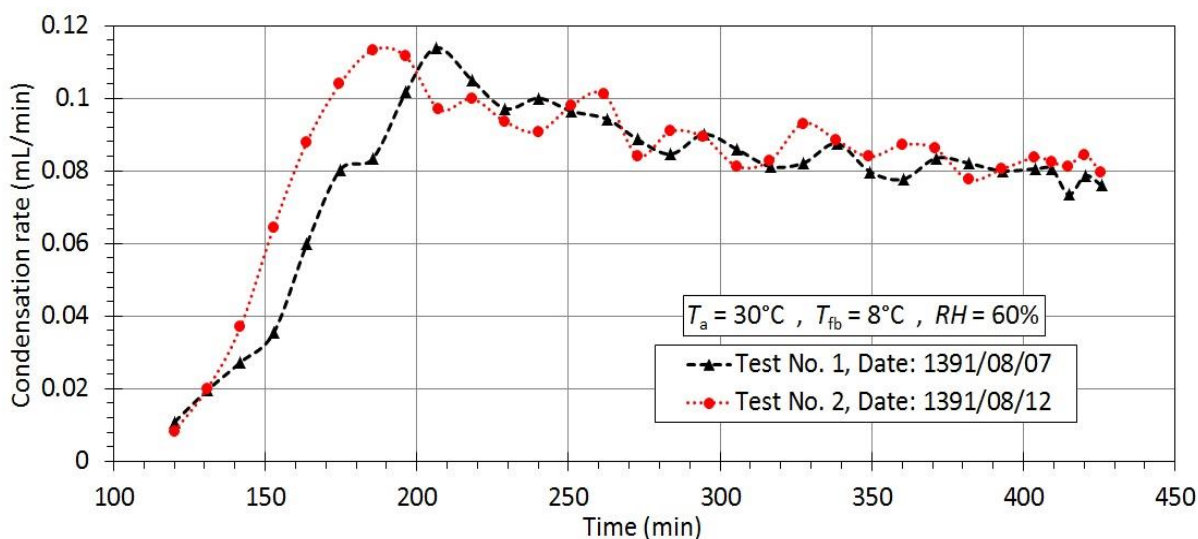
## ۵- نتایج

یکی از نکات مهم که در مطالعات تجربی برای بررسی صحت آزمایشات بایستی ابتدا مدنظر قرار گیرد، تکرارپذیر بودن آزمایشات است. از این جهت یکی از آزمایشات به صورت تصادفی انتخاب و تکرار شده است. در این آزمایش دمای محیط، دمای پایه پره و رطوبت نسبی هوا به ترتیب برابر با  $30^{\circ}\text{C}$ ،  $8^{\circ}\text{C}$  و  $60\%$  می‌باشد. در شکل (۷) مقدار گرمای منتقل شده بر حسب زمان برای این شرایط از شروع آزمایش تا رسیدن به حالت پایدار آن که حدود ۲۴۰ دقیقه است، مشاهده می‌شود.

شایان ذکر است که گرمای منتقل شده بین لوله پره‌دار و محیط به کمک معادله (۱) محاسبه گردیده است. شکل (۸) مقدار ریزش جرمی برای دو آزمایش انجام شده تا زمان رسیدن به حالت پایدار ریزش جرمی که حدود ۴۲۰ دقیقه است را نشان می‌دهد.



شکل ۷- مقایسه نرخ انتقال گرما برای بررسی تکرارپذیری آزمایشات

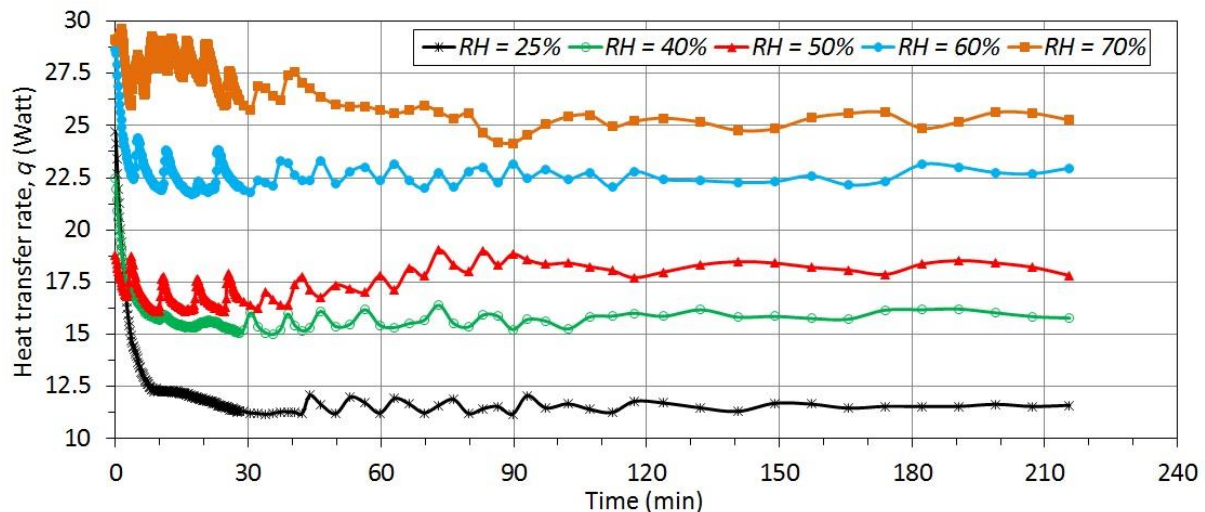


شکل ۸- مقایسه نرخ ریزش جرمی برای بررسی تکرارپذیری آزمایشات

همانطور که در شکل‌های (۷) و (۸) ملاحظه می‌شود، تکرار آزمایش تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نکرده و حداکثر اختلاف بین نرخ انتقال گرما و نرخ ریزش جرمی در این دو آزمایش به ترتیب ۸ و ۱۳ درصد می‌باشد. بنابراین با توجه به پیچیدگی فرآیند میعان روی لوله پره‌دار و مقدار خطاها می‌توان نتیجه گرفت که آزمایشات انجام شده از کیفیت مطلوبی برخوردار هستند.

در شکل (۹) نرخ انتقال گرما بین لوله پره‌دار و محیط برای مقادیر مختلف رطوبت نسبی نشان داده شده است. بر اساس این شکل، زمان رسیدن به وضعیت پایدار از نظر گرمایی برای آزمایشاتی که میعان رخ داده (رطوبت‌های نسبی ۰.۴۰، ۰.۵۰، ۰.۶۰ و ۰.۷۰) حدود ۱۱۰ دقیقه و برای حالت بدون میعان (رطوبت نسبی ۰.۲۵) حدود ۹۰ دقیقه می‌باشد. از دیگر نکات مهم این شکل می‌توان به این نکته اشاره کرد که با افزایش رطوبت نسبی هوا، مقدار انتقال گرما زیاد می‌شود. این افزایش از رطوبت نسبی ۰.۲۵ که روی سطح میعان شکل نمی‌گیرد به ۰.۴۰ بیشتر از سایر موارد است (حدود ۰.۴۵).

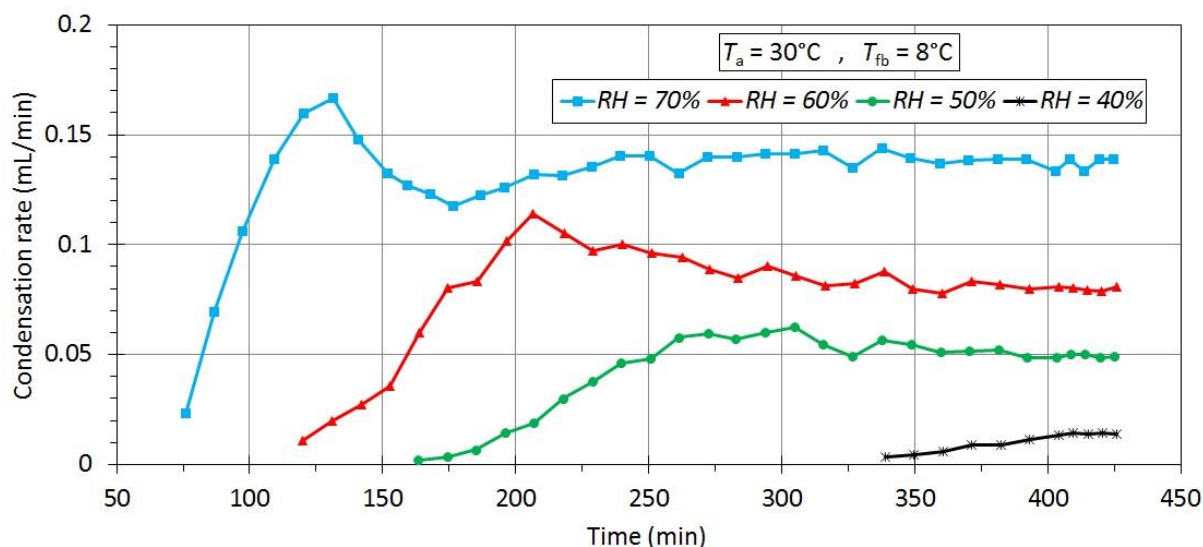
تغییرات شدید و زیاد بودن نرخ انتقال گرما در شروع آزمایش ناشی از ناپایداری توزیع دما در لایه‌های مختلف قطعه آزمایش (لوله آلومینیومی، لایه عایق و لوله فولادی) و زیاد بودن نرخ انتقال جرم بوده و سایر نوسانات به علت حرکت قطرات و تناوبی شدن میعان و انتقال گرما می‌باشد.



شکل ۹- تأثیر رطوبت نسبی هوا بر مقدار نرخ انتقال گرما ( $T_{fb} = 8^{\circ}\text{C}$ ,  $T_a = 30^{\circ}\text{C}$ )

با توجه به دقت دماهای اندازه‌گیری شده و مقاومت گرمایی که به ترتیب  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  و  $\pm 0.02 \text{ K/W}$  می‌باشد، دقت نرخ انتقال گرمای بدست آمده به کمک رابطه (۱) حدود ۱ وات است که حداکثر ۱۰ درصد خطا ایجاد می‌کند.

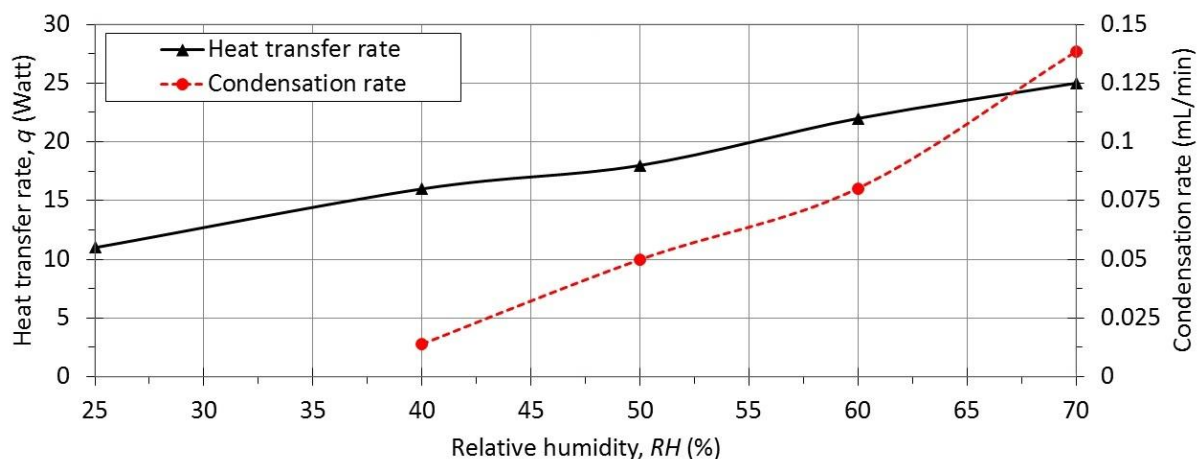
در شکل (۱۰) مقدار ریزش جرمی از لوله پره‌دار در شرایط مختلف مشاهده می‌شود. در زمان‌های اولیه سطح خشک بوده و قطرات روی سطح در حال تشکیل و رشد می‌باشند و در نتیجه ریزش جرمی از سطح صورت نمی‌گیرد. با گذشت زمان ریزش قطرات از سطح شروع شده و این ریزش افزایش یافته تا در نهایت به مقدار ثابتی می‌رسد. با توجه به بالا بودن ضریب انتقال گرما در لبه‌های بالایی، تشکیل و رشد قطرات در آن نواحی به مراتب از نواحی دیگر بیشتر است.



شکل ۱۰- تأثیر رطوبت نسبی بر میزان نرخ ریزش میعان از ابتدای آزمایش تا فاصله دور از حالت پایدار

شکل (۱۰) همچنین نشان می‌دهد که با زیاد شدن رطوبت نسبی، زمان رسیدن به حالت پایدار برای ریزش کاهش و نرخ میعان افزایش می‌یابد که این افزایش با افزایش نرخ انتقال گرما در شکل (۹) هماهنگی دارد.

لازم به ذکر است حداکثر خطا برای اندازه‌گیری شارش جرمی ۸ درصد است. این خطا با توجه به دقت استوانه مدرج (۰/۲ میلی‌لیتر)، تبخیر سطحی و اتلاف قطرات در حین جمع‌آوری بدست آمده است. در شکل (۱۱) نرخ انتقال گرما و جرم در شرایط پایدار برای رطوبت‌های نسبی مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که شیب افزایش نرخ میعان از شیب افزایش نرخ انتقال گرما بیشتر است. همچنین برای شرایط آزمایش شده، تقریباً تغییرات مذکور خطی می‌باشند.



شکل ۱۱- نرخ انتقال گرما و جرم بر حسب رطوبت نسبی هوا

انتقال گرمای مبادله شده بین لوله پره‌دار و محیط شامل دو بخش گرمای محسوس و نهان می‌باشد. گرمای محسوس در اثر اختلاف دمای سطح با محیط و گرمای نهان بدلیل تغییر فاز منتقل می‌شود. مقدار

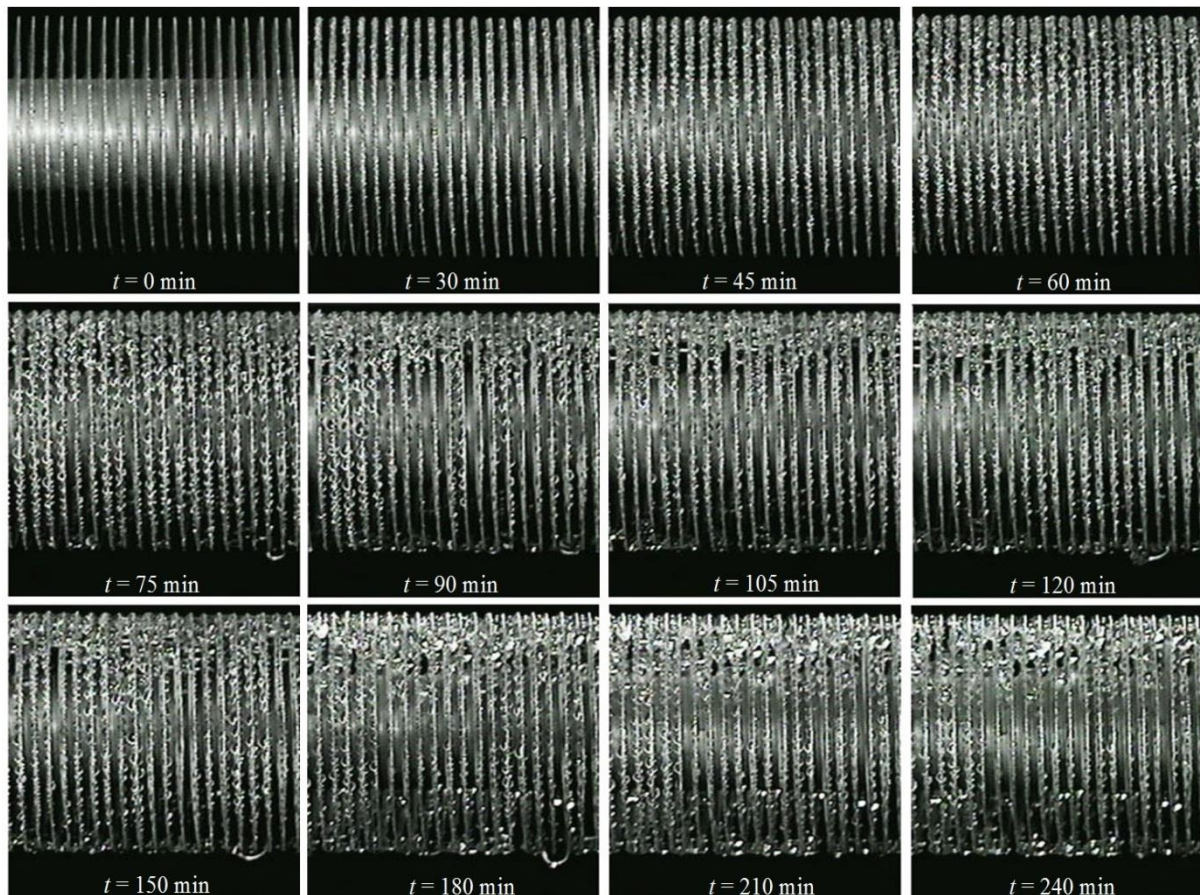


این دو گرما برای آزمایشات انجام شده در جدول (۴) آورده شده است. در این جدول همچنین نسبت گرمای محسوس به گرمای کل منتقل شده بین لوله پره‌دار و محیط اطرافش مشخص شده است.

**جدول ۴-** مقدار گرمای محسوس و نهان در آزمایشات انجام شده ( $T_{fb} = 8^{\circ}\text{C}$ ,  $T_a = 30^{\circ}\text{C}$ )

۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۲۵	رطوبت نسبی هوا (%)
۱۹/۲۷	۱۷/۹۱	۱۵/۵۴	۱۴/۷۷	۱۱/۰۰	گرمای محسوس (W)
۵/۷۳	۴/۰۹	۲/۴۵	۱/۲۳	۰	گرمای نهان (W)
۷۷/۰۸	۸۱/۴۱	۸۶/۳۸	۹۲/۳۱	۱۰۰/۰۰	نسبت گرمای محسوس به گرمای کل (%)

با توجه به جدول (۴)، با افزایش رطوبت نسبی هوا سهم گرمای نهان در مقدار کل گرمای مبادله شده بین لوله پره‌دار و محیط اطرافش افزایش می‌یابد. اما از آنجایی که میعان تنها روی لبه پره‌ها اتفاق می‌افتد، مقدار گرمای نهان در مقایسه با گرمای محسوس اندک می‌باشد. در شکل (۱۲) روند تشکیل، رشد و ریزش قطرات روی لوله پره‌دار در زمان‌های مختلف از ابتدای آزمایش تا رسیدن به مرحله پایدار از نظر ریزش جرمی نشان داده شده است.



**شکل ۱۲-** روند تشکیل، رشد و حرکت قطرات روی سطح در زمان‌های مختلف تا رسیدن به مرحله

ریزش پایدار ( $T_{fb} = 8^{\circ}\text{C}$ ,  $T_a = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $RH = 70\%$ )

مشاهدات نشان می‌دهد که تنها روی لبه پره‌ها قطرات تشکیل و رشد کرده و این قطرات به دلیل رشد لایه مرزی، عمدتاً در لبه‌های بالا درشت و به تدریج با حرکت محیطی به سمت پایین ریزتر می‌شوند. در ابتدا سطح خشک بوده و پس از مدتی هسته قطرات روی سطح تشکیل و شروع به رشد می‌کنند. به دلیل کم بودن فاصله بین پره‌ها، انتقال گرما و جرم با مکانیزم جابجایی بین آنها همانگونه که در مرجع [۱۶] نشان داده شده، بسیار اندک است و در نتیجه تنها هسته قطرات تشکیل شده روی لبه پره‌ها قابلیت رشد دارند. قطرات پس از آنکه به اندازه کافی رشد کردند، تحت تأثیر نیروی وزن خود روی لبه پره‌ها می‌لغزند و در مسیر خود سایر قطرات را جاروب کرده و با پیوستن به آنها در پایین‌ترین نقطه پره ریزش می‌کنند. پس از این زمان مراحل تشکیل، رشد، حرکت و ریزش قطرات روی سطح به صورت تناوبی تکرار شده و همانگونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مقدار ریزش ثابت می‌گردد.

### نتیجه‌گیری

آزمایشات انجام شده در مورد انتقال گرما و جرم رطوبت زدایی از هوای مرطوب در حالت جابجایی طبیعی روی لوله پره‌دار فشرده نشان می‌دهد که:

- میعان رطوبت هوا روی لوله پره‌دار تابع نسبتاً شدیدی از مقدار رطوبت نسبی می‌باشد.
- برای شرایط آزمایش، میعان کاملاً به صورت قطره‌ای بوده و زمان نسبتاً زیادی لازم است که ریزش جرمی به حالت پایدار برسد. این زمان با کاهش رطوبت نسبی افزایش می‌یابد.
- به علت فاصله کم بین پره‌ها (۲/۳ میلیمتر) فرآیند میعان و تشکیل قطرات محدود به لبه پره‌ها شده و در بین پره‌ها و روی سطح لوله مرکزی میعان صورت نمی‌گیرد. لذا مقدار انتقال جرم نسبت به سطح پره‌ها و لوله اندک و شارش گرمایی ناشی از تغییر فاز نسبت به حالتی که فقط جابجایی آزاد انجام می‌شود خیلی شدید نیست. برای آزمایشات انجام شده در رطوبت‌های نسبی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد به ترتیب شارش گرمایی ۴۵، ۶۴، ۱۰۰ و ۱۲۷ درصد نسبت به آزمایش جابجایی آزاد (رطوبت نسبی ۲۵ درصد) افزایش داشته است.
- قطره‌هایی با قطر کمتر از ۲/۳ میلیمتر (فاصله بین پره‌ها) قبل از ترکیب با سایر قطره‌های مجاور به علت نیروی وزن، روی لبه پره لغزیده و در پایین‌ترین نقطه یا سقوط می‌کنند و یا با قطره‌های دیگر ترکیب و سپس از پره جدا شده و سقوط می‌کنند.

### تشکر و قدردانی

از حمایت‌های بنیاد ملی نخبگان سپاسگزاری می‌گردد.

## مراجع

- [1] Nusselt, W., "Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes", Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, Vol. 60, pp. 541-546, (1916).
- [2] Elmahdi, A. H., and Biggs, R. C., "Efficiency of Extended Surfaces with Simultaneous Heat and Mass Transfer", ASHREA Transactions, Vol. 89, pp. 135-143, (1983).
- [3] Coney, J. E. R., Sheppard, C. G. W., and El-Shafei, E. A. M., "Fin Performance with Condensation from Humid Air: A Numerical Investigation", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 10, pp. 224-231, (1989).
- [4] Coney, J. E. R., El-Shafei, E. A. M., and Sheppard, C. G. W., "Experimental Investigation of a Cooled Thick Fin in Dry and Humid Air Flows", International Journal of Refrigeration, Vol. 12, pp. 332-337, (1989).
- [5] Wu, G., and Bong, T. Y., "Overall Efficiency of a Straight Fin with Combined Heat and Mass Transfer", ASHREA Transactions, Vol. 100, pp. 367-374, (1994).
- [6] Kazeminejad, H., "Analysis of One-dimensional Fin Assembly Heat Transfer with Dehumidification", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 3, pp. 455-462, (1995).
- [7] Salah El-Din, M. M., "Performance Analysis of Partially-wet Fin Assembly", Applied Thermal Engineering, Vol. 18, pp. 337-349, (1998).
- [8] Rosario, L., and Rahman, M. M., "Overall Efficiency of a Radial Fin Assembly under Dehumidifying Conditions", ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol. 120, pp. 299-305, (1998).
- [9] Rosario, L., and Rahman, M. M., "Analysis of Heat Transfer in a Partially Wet Radial Fin Assembly during Dehumidification", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 20, pp. 642-648, (1999).
- [10] Naphon, P., "Study on the Heat Transfer Characteristics of the Annular Fin under Dry-surface, Partially Wet-surface, and Fully Wet-surface Conditions", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, pp. 112-121, (2006).
- [11] Sharqawy, M. H., and Zubair, S. M., "Efficiency and Optimization of an Annular Fin with Combined Heat and Mass Transfer - An Analytical Solution", International Journal of Refrigeration, Vol. 30, pp. 751-757, (2007).
- [12] Kundu, B., and Barman, D., "Analytical Study on Design Analysis of Annular Fins under Dehumidifying Conditions with a Polynomial Relationship between Humidity Ratio and Saturation Temperature", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 31, pp. 722-733, (2010).

- [13] Sharqawy, M. H., Moinuddin, A., and Zubair, S. M., "Heat and Mass Transfer from Annular Fins of Different Cross-sectional Area. Part I. Temperature Distribution and Fin Efficiency", International Journal of Refrigeration, Vol. 35, pp. 365-376, (2012).
- [14] Moinuddin, A., Sharqawy, M. H., and Zubair, S. M., "Heat and Mass Transfer from Annular Fins of Different Cross-sectional Area. Part II. Optimal Dimensions of Fins", International Journal of Refrigeration, Vol. 35, pp. 377-385, (2012).
- [15] Nabovati, B., Yaghoubi, M., and Avara, A., "Experimental Study of Free Convection Heat Transfer and Condensation of Vapor of Humid Air over an Inclined Cold Tube", Heat Transfer-Asian Research, Vol. 41, No. 7, pp. 565-579, (2012).
- [16] Yaghoubi, M., and Mahdavi, M., "An Investigation of Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Cooled Finned Tube", Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage and Conversion, Vol. 26, No. 4, pp. 343-359, (2013).

### فهرست نمادهای انگلیسی

$q$	نرخ انتقال گرما، W
$R$	مقاومت گرمایی، K/W
$R_c$	مقاومت تماسی، K/W
$RH$	رطوبت نسبی هوا، %
$t$	زمان، min
$T$	دما، K

### زیرنویس‌ها

1	لوله آلومینیومی
2	لوله فولادی
3	لایه عایق
a	محیط
fb	پایه پره (سطح بیرونی لوله مرکزی)
i	داخلی
o	خارجی



## Abstract

In this study, dehumidification of humid air over a horizontal annular finned-tube by free convection for various relative humidities is investigated experimentally. The finned-tube is placed in an isolated test room in order to perform pure natural convection. The test room ambient air temperature and relative humidity are controlled by air cooling and heating cycles and humidifying system. Measurements are carried out for an annular finned-tube with outer tube diameter 25.4 mm, fin thickness 0.4 mm, fin outer diameter 56.0 mm, and fin density 11 FPI (433 FPM). For experimental measurements, ambient air and fin base temperature are taken 30°C and 8°C, respectively and relative humidity is changed from 25% to 70%. All measurements are made from beginning of cooling until steady state condition approached. For each test, flow structure, heat transfer and condensation rate are discussed. It is found that condensation rate, drop coalescence, and heat transfer rate depend mainly on the relative humidity. When relative humidity increases, heat and mass transfer rate are increased. Also, natural dehumidification shows that the drops form mainly on the tip of the fins and no condensation is observed between the fins which is mainly due to small fin spacing and no air movement between the fins.