

## بررسی آزمایشگاهی نرخ انتقال جرم از سطوح ساده آب برای رژیم های همرفت اجباری، ترکیبی و طبیعی

امیر رضا معموری

عضو هیات علمی، گروه مهندسی مکانیک، موسسه غیر انتفاعی اشراق بجنورد، بجنورد، ایران

امین جودت\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

### چکیده

در این مطالعه با استفاده از اندازه گیری های آزمایشگاهی نرخ تبخیر از سطح ساده آب برای تاثیر عوامل گوناگون نظیر: اختلاف فشار بخار، سرعت جریان هوا، پارامترهای بدون بعد، در بازه گسترده ای از رژیم های همرفت اجباری، ترکیب طبیعی و اجباری و همرفت طبیعی، در دامنه  $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 100$  بررسی شده است. این دامنه از  $\frac{Gr_m}{Re^2}$  با استفاده از سرعت های میانگین (۰/۱، ۰/۳، ۰/۹، ۲، ۴، ۵، ۶ متر بر ثانیه و دمای آب از ۲۰ °C تا ۵۵ °C تولید شده است. تحقیقات نشان می دهد نرخ تبخیر به شدت به رژیم جریان وابسته است. در رژیم همرفت اجباری ( $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 0.1$ ) و رژیم همرفت ترکیبی ( $0.15 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 25$ ) با افزایش اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا، نرخ تبخیر افزایش یافته اما آهنگ افزایش آن در رژیم همرفت اجباری کاهش یافته طوریکه در این رژیم نرخ تبخیر به صورت تابع توانی با اختلاف فشار بخار تغییر می نماید. در رژیم همرفت ترکیبی با افزایش سرعت جریان هوا، توان اختلاف فشار بخار کاهش می یابد. نتایج نشان می دهد در رژیم همرفت طبیعی ( $\frac{Gr_m}{Re^2} > 25$ ) هر دو پارامتر اختلاف فشار بخار و اختلاف چگالی بخار، بر نرخ تبخیر اثر می گذارد و علاوه بر اختلاف فشار بخار، اختلاف چگالی نیز بر نرخ تبخیر موثر است. **واژه های کلیدی:** نرخ تبخیر، رژیم جریان، جابجایی اجباری، جابجایی ترکیبی، جابجایی آزاد.

## An experimental study of mass transfer rate from the simple levels of water surface for forced and mixed convection regimes

A. R. Mamouri  
A. Jodat

Engineering Faculty, Eshragh Institute of higher Education, Bojnourd, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Bojnourd University, Bojnourd, Iran

### Abstract

In the present study, a series of experimental measurements are carried out over a wide range of water temperatures and air velocities. This relatively wide range of  $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 100$  was produced using air average velocities of, 0.1, 0.3, 0.9, 2, 4, 5, and 6 m/s and the water temperatures from 20 to 55 °C. The Investigations show that the evaporation rate strongly depends on the flow regimes. The results show that the evaporation rate increases with the difference in vapor pressures over both forced convection ( $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 0.1$ ), and turbulent mixed convection regimes ( $0.15 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 25$ ). However, the escalation rate of evaporation, decreases with  $\frac{Gr_m}{Re^2}$  in the forced convection regime, whereas in the turbulent mixed convection it increases. In addition, over the range of the free convection regime ( $\frac{Gr_m}{Re^2} > 25$ ), the evaporation rate is affected not only by the vapor pressure difference but also by the density variation.

**Keywords:** vapor rate, flow regime, forced convection, mixed convection, free convection.

پژوهش های انجام شده در زمینه تبخیر در محدوده ی خاصی از یک رژیم همرفت بوده است که این موضوع سبب پراکندگی روابط موجود و عدم ارائه ی رابطه ای جامع برای پیش بینی نرخ تبخیر شده است.

تبخیر آب، به دو صورت می تواند محقق شود: الف) تبخیر اجباری<sup>۱</sup> که در اثر مکانیزم همرفت اجباری ایجاد می شود. ب) تبخیر آزاد<sup>۲</sup> (تبخیر درون هوای ساکن) که در اثر اختلاف چگالی رطوبت ایجاد می شود [۸]. در بسیاری از سیستم ها، تبخیر در اثر ترکیبی از دو فرآیند بالا ایجاد می شود [۹ و ۱۰]. برای تعیین مکانیزم همرفت غالب دو گروه

### ۱- مقدمه

فرآیند تبخیر که در بسیاری از صنایع نظیر تاسیسات پالایشگاهی، تاسیسات هسته ای، سیستم های تبخیری، آب شیرین کن های خورشیدی و صنایع غذایی مورد استفاده قرار می گیرد، همواره مورد توجه محققین بوده است. در فرآیند تبخیر پارامترهای مختلفی از جمله رژیم جریان هوا، مکانیزم همرفت، اختلاف فشار بخار در سطح و دور از سطح آب نقش مهمی دارند. ارائه ی رابطه ای برای تعیین نرخ تبخیر از سطح آزاد آب، همواره مورد توجه و چالش پژوهشگران بوده است [۷-۱]. اغلب

<sup>1</sup> Forced evaporation

<sup>2</sup> Free evaporation

طبیعی، این نسبت بسیار بزرگ تر از مرتبه یک است. تاکنون، تحقیقات قابل ملاحظه‌ای، جهت بررسی فرآیند تبخیر در محدوده خاص از یک رژیم همرفت انجام گرفته است. این موضوع سبب شده پراکندگی زیادی در روابط ارائه شده به منظور تخمین نرخ تبخیر، درون هوای ساکن و در حال حرکت بوجود آید. در جدول ۱ خلاصه ای از روابط، شرایط آزمایشگاهی و بازه  $\frac{Gr}{Re^2}$  تعدادی از محققانی که بر روی نرخ تبخیر مطالعه نموده اند، ارائه شده است.

## ۲- نظریه و مدل ریاضی

بررسی و تحلیل پارامترهای بدون بعد در فرآیند تبخیر نشان می‌دهد معادله بقای انتقال جرم، مشابه معادله بقای انتقال گرما می‌باشد [۱۳] و [۱۲]. بنابراین، اگر شرایط مرزی مشابه باشد، حل این معادلات مشابه خواهد بود. معادلات حاکم بدون بعد به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$\rho^* \frac{DT^*}{Dt} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \nabla^* \cdot (k^* \nabla^* T^*) \quad (۶)$$

$$\rho^* \frac{DC^*}{Dt} = \frac{1}{Re \cdot Sc} \nabla^* \cdot (D^* \nabla^* C^*) \quad (۷)$$

در روابط بالا  $\rho^*$ ،  $k^*$ ،  $D^*$  و  $T^*$  به ترتیب چگالی، رسانایی گرمایی، پخشندگی گرمایی، دما و غلظت بدون بعد می‌باشند. عدد اشمیت و Pr عدد پراختل است که به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (۸)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{H_2O,air}} \quad (۹)$$

بدون  $\frac{Gr}{Re^2}$  و  $\frac{(GrSc)^{\frac{1}{4}}}{Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}}$  معرفی شده است [۱۱]. در این گروه‌های بدون بعد  $Gr$ ،  $Re$  و  $Sc$  به ترتیب اعداد گراشف، رینولدز و اشمیت هستند که به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$Gr = \frac{\bar{\rho}_g (\rho_{g,s} - \rho_{g,\infty}) g L^3}{\mu_g^2} \quad (۱)$$

$$Re = \frac{\bar{\rho}_g V L}{\mu_g} \quad (۲)$$

$$Sc = \frac{\mu_g}{\bar{\rho}_g D} \quad (۳)$$

$\rho_{g,s}$  و  $\rho_{g,\infty}$  به ترتیب، چگالی هوای مرطوب در سطح آب و در شرایط هوای محیط،  $V$  سرعت باد،  $\mu_g$  لزجت هوا،  $L$  طول مشخصه و  $\bar{\rho}_g$  چگالی متوسط هوای مرطوب و  $D$  ضریب پخش بخار در هوا می‌باشند.

گروه‌های بدون بعد معرفی شده توسط رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می‌گردند:

$$\frac{Gr}{Re^2} = \left( \frac{(GrSc)^{\frac{1}{4}}}{Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}} \right)^4 Pr^{\frac{1}{3}} \quad (۴)$$

با توجه به آنکه عدد اشمیت در این پژوهش تقریباً ثابت می‌باشد ( $Sc = 0.6$ ) و معیار  $\frac{Gr}{Re^2}$  بازه تغییرات گسترده‌تری ( $0.01 \leq \frac{Gr}{Re^2} \leq 100$ ) را نسبت به معیار  $\left( \frac{(GrSc)^{\frac{1}{4}}}{Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}} \right)$  ( $0.35 \leq \frac{(GrSc)^{\frac{1}{4}}}{Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}} \leq 3.5$ ) داراست به این دلیل برای تعیین مکانیزم همرفت غالب در این پژوهش از گروه بدون بعد  $\frac{Gr}{Re^2}$  استفاده شده است.

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\text{Strength of natural convection flow}}{\text{Strength of forced convection flow}} \quad (۵)$$

اگر  $\frac{Gr}{Re^2}$  هم مرتبه با یک باشد، رژیم جریان، ترکیبی از هر دو مکانیزم همرفت است. برای رژیم‌های جریان با همرفت اجباری، نسبت خیلی کوچک تر از مرتبه یک و برای رژیم‌های جریان با جابجایی

جدول ۱- خلاصه‌ای از روابط، شرایط آزمایشگاهی و بازه  $\frac{Gr}{Re^2}$  مطالعه شده توسط تعدادی از محققان

Gr/Re <sup>2</sup>	روابط پیشنهاد شده	شرایط آزمایشگاهی			محققان
		سرعت (m/s)	دمای هوا (°C)	دمای آب (°C)	
Gr/Re <sup>2</sup> < 0.05	$\dot{m}_e = 3370(95 + 83.7V) \frac{(P_{v,s} - \phi P_{v,\infty})}{h_{fg}}$	۰-۷٫۱	-----	-----	کریر (۱۹۱۸)
Gr/Re <sup>2</sup> < 0.02	$\dot{m}_e = (0.2325 + 0.101V) \left( \frac{P_{v,s} - \phi P_{v,\infty}}{1000} \right)$	۰٫۹۵-۵٫۸	-----	۲۰-۷۰	هینچلی (۱۹۲۴)
Gr/Re <sup>2</sup> < 10	$\dot{m}_e = (0.125 + 0.0755V) \left( \frac{P_{v,s} - \phi P_{v,\infty}}{1000} \right)$	۰-۰٫۶۷	۷-۱۶٫۵	۶-۱۷٫۲	روهور (۱۹۳۱)
Gr/Re <sup>2</sup> > 50	$\dot{m}_e = 0.074 \left( \frac{P_{v,s} - \phi P_{v,\infty}}{1000} \right)^{1.22}$	۰	۱۸٫۷-۲۴٫۷	۲۰-۹۰	بویتر (۱۹۴۶)
0.1 < Gr/Re <sup>2</sup> < 10	$\dot{m}_e = 0.035(C_s - C_a)^{1.237}$	۰٫۱-۰٫۱۵	۲۰	۲۵-۵۰	پاوکان (۲۰۰۰)
Gr/Re <sup>2</sup> < 0.1	$\dot{m}_e = (0.120836V^{1.478}) \left( \frac{P_{v,s} - \phi P_{v,\infty}}{1000} \right)^{0.654}$	۲-۴	دمای اتاق	۲۵-۶۰	شمیری (۲۰۰۲)
Gr/Re <sup>2</sup> < 0.1	$\dot{m}_e = 3600(0.2253 + 0.24644V) \frac{(P_{v,s} - \phi P_{v,\infty})^{0.82}}{h_{fg}}$	۰٫۵-۱٫۵	۱۸-۴۰	۱۸-۴۰	تانگ (۲۰۰۴)

$\frac{Gr}{Re^2} > 70$	$\dot{m}_e = \left(\frac{X}{X_\infty}\right)^{\frac{1}{2}} K(P_{v,s} - \phi P_{v,\infty})$	۰٫۰۸-۰٫۱۷	۲۲-۳۲	۲۰-۳۰	اسروبالی (۲۰۰۸)
------------------------	--	-----------	-------	-------	-----------------

$$Sh = 0.54(Gr_m Sc)^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

زمانی که در اثر بهم زدن لایه مرزی بالادست، جریان متلاطم شود یا وسایل محرک لایه مرزی، باعث القاء مصنوعی آشفتگی<sup>۳</sup> شوند، عدد شروود برای رژیم همرفت اجباری عبارت است از [۱۴].

$$Sh = 0.036 Sc^{\frac{1}{3}} Re^{0.8} \quad (20)$$

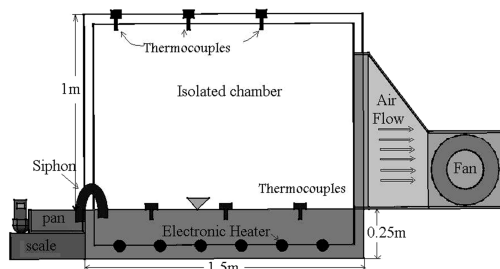
عدد شروود برای رژیم همرفت ترکیبی ( $Gr_m/Re^2 \cong 1$ ) به وسیله رابطه غیر خطی زیر بیان می‌گردد [۱۴]:

$$Sh_{mixed} = Sh_{free}(1 + \left(\frac{Sh_{forced}}{Sh_{free}}\right)^a)^{\frac{1}{a}} \quad (21)$$

در رابطه (۲۱) توان  $a$  مقداری بین ۱ و ۲ را داراست [۱۷].

### ۳- شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش تبخیر در استخری به ابعاد داخلی  $150 \times 100 \times 100$  سانتی متر و عمق ۲۵ سانتیمتر انجام شده است. در شکل (۱) نمای بستر آزمایش نشان داده شده است. قسمت بالایی استخر از یک تونل باد تشکیل شده که سطح داخلی این تونل به وسیله نوارهای آلومینیومی به خوبی پوشش داده شده است، این امر سبب کاهش انتقال گرمای تابشی و کاهش جذب بخار آب در بدنه تونل باد خواهد شد جهت افزایش دمای آب به شرایط مورد نظر کاربر، از ۶ عدد گرمکن الکتریکی ۲۵۰۰ وات با قابلیت تنظیم و کنترل دما به همراه دستگاه PID کنترلر، استفاده شده که این گرمکن‌های الکتریکی در نزدیکی کف استخر نصب گردیده‌اند. گرمکن‌ها از سیم نیکروم ساخته و توسط لوله‌های PTFE<sup>۴</sup> پوشانده شده‌اند.



شکل ۱- نمای بستر آزمایش

برای ایجاد سرعت‌های مختلف هوا روی سطح آب از یک تونل باد به همراه یک فن محوری و اینورتر کنترل دور با دقت ۱ دور بر دقیقه، استفاده شده است. جهت یکنواخت کردن جریان هوا روی سطح آب و متلاطم ساختن جریان هوای ورودی از یک صفحه مشبک در دهانه تونل باد استفاده شده است. سرعت‌های هوای میانگین مورد استفاده در این پژوهش، ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۹، ۲٫۰، ۴٫۵، ۶ متر بر ثانیه انتخاب شده تا رژیم‌های مختلف همرفت پوشش داده شود. سرعت هوای درون محفظه تست با استفاده از باد سنج گرمایی<sup>۵</sup> اندازه‌گیری می‌شود. در این روش اندازه‌گیری ابتدا منطقه تست به ۹ مساحت مساوی تقسیم بندی گردیده و سرعت هوا در مرکز هر یک از ۹ منطقه به فاصله ۱۵ میلی متر

$\nu$ ،  $\alpha$  و  $D_{H_2O,air}$  به ترتیب لزجت سینماتیکی، پخشندگی گرمایی و پخشندگی بخار آب در هوا است. پارامترهای بدون بعد که در روابط (۸) و (۹) ذکر شده‌اند نقش مهمی در فرآیند تبخیر آب دارند. اعداد ناسلت و شروود که برای ارزیابی انتقال گرما و جرم به صورت گسترده استفاده می‌گردند به عنوان تابعی از رینولدز، پراتل و اشمیت به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$Nu = \frac{hL}{k} = f(Re, Pr) \quad (10)$$

$$Sh = \frac{g_{mH_2O}L}{k} = g(Re, Sc) \quad (11)$$

در روابط بالا  $L$  طول مشخصه سطحی که از آن تبخیر صورت می‌گیرد،  $h$  و  $g_{mH_2O}$  به ترتیب ضریب انتقال گرما و جرم و  $D_{H_2O,air}$  پخشندگی بخار آب در هوا می‌باشد که توسط رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

$$D_{H_2O,air} = 1.87 \times 10^{-10} \left(\frac{T^{2.072}}{P}\right) \quad (12)$$

for  $282K \leq T \leq 450K$

به منظور محاسبه ضریب انتقال جرم با استفاده از شبیه‌سازی انتقال گرما و جرم می‌توان نوشت:

$$g_{mH_2O} = \frac{\dot{m}_e}{m_{fH_2O,S} - m_{fH_2O,\infty}} \quad (13)$$

در رابطه اخیر  $m_{fH_2O,S}$  و  $m_{fH_2O,\infty}$  به ترتیب کسر جرمی بخار آب در شرایط هوای محیط و در روی سطح آب می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$m_{fH_2O,\infty} = \frac{18.02X_{H_2O,\infty}}{(18.02X_{H_2O,\infty} + 28.96(1 - X_{H_2O,\infty}))} \quad (14)$$

$$m_{fH_2O,S} = \frac{18.02X_{H_2O,S}}{(18.02X_{H_2O,S} + 28.96(1 - X_{H_2O,S}))} \quad (15)$$

در رابطه فوق  $X_{H_2O}$  کسر مولی بخار می‌باشد که به عنوان تابعی از فشار بخار ( $P_{H_2O}$ ) و فشار هوای محیط ( $P_{atm}$ ) به شکل زیر است:

$$X_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{atm}} \quad (16)$$

به منظور محاسبه فشار بخار به عنوان تابعی از دما، رابطه زیر که توسط بوکادیدا و همکاران [۱۴] پیشنهاد گردیده، استفاده شده است. در این رابطه،  $T_s$  دمای سطح آب است.

$$P_{H_2O} = 10^5 \exp(65.832 - 8.2 \ln(T_s) + 5.717 \times 10^{-3} T_s - \frac{7235.46}{T_s}) \quad (17)$$

نرخ تبخیر با استفاده از عدد شروود توسط رابطه زیر می‌تواند محاسبه گردد [۱۵].

$$\dot{m}_e = Sh \frac{\rho D_{H_2O,air}}{L} (m_{fH_2O,S} - m_{fH_2O,\infty}) \quad (18)$$

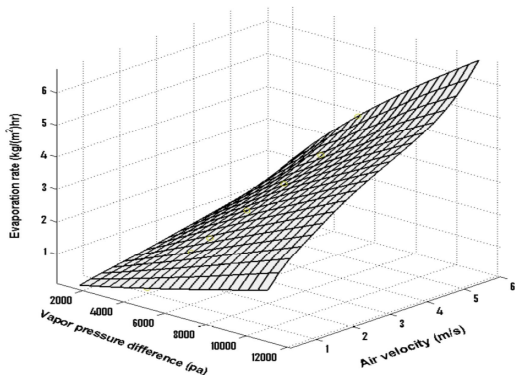
برای استفاده از روش شبیه‌سازی انتقال گرما و انتقال جرم، جهت تخمین نرخ تبخیر عدد شروود برای هر رژیم تبخیری، باید مشخص گردد. به همین منظور در ادامه، عدد شروود برای شرایط مختلف تبخیر تعریف می‌شود.

برای رژیم آشفته همرفت آزاد ( $Gr_m Sc > 2 \times 10^7$ ) عدد شروود به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

<sup>3</sup> Induced Turbulent

<sup>4</sup> Protec Fluoropolymer Heaters

<sup>5</sup> Thermal anemometer



شکل ۲- اثر اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا بر نرخ تبخیر در بازه  $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 100$

#### ۴-۱- رژیم همرفت اجباری

شکل ۳ اثر اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا را بر نرخ تبخیر برای رژیم همرفت اجباری  $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 0.1$  نشان می‌دهد. نتایج، بیانگر این موضوع است که با افزایش اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد، اما نرخ تبخیر به صورت تابع توانی با اختلاف فشار بخار تغییر می‌نماید. از منحنی برازش شده به نتایج آزمایشگاهی در شکل ۳، می‌توان نتیجه گرفت که مشتق اول تغییرات نرخ تبخیر، نسبت به اختلاف فشار بخار مثبت می‌باشد از طرفی با توجه به تقعر منحنی مشتق دوم این تغییرات، بایستی مقدار منفی را دارا باشد. اگر برای محاسبه نرخ تبخیر از مدل اصلاح شده رابطه دالتون [۱۰] استفاده نماییم می‌توان نوشت:

$$\frac{dm_e}{d\Delta P} = n(C_1 + C_2 V) \Delta P^{n-1} > 0 \quad (22)$$

$$\frac{d^2 m_e}{d\Delta P^2} = n(n-1)(C_1 + C_2 V) \Delta P^{n-2} < 0 \quad (23)$$

با حل دو رابطه بالا می‌توان نتیجه گرفت که  $0 < n < 1$  است. در واقع، توان  $n$  کمتر از یک بیانگر این موضوع است که با افزایش اختلاف فشار بخار، نرخ افزایش تبخیر کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به این صورت بیان نمود که در رژیم جابجایی اجباری با افزایش نرخ تبخیر، لایه مرزی غلظت بخار روی سطح آب ضخیم تر از مقداری است که انتظار می‌رود و همچنین گرادیان غلظت بخار، درون لایه مرزی با افزایش اختلاف فشار بخار به خاطر افزایش خاصیت انتشار آن کاهش می‌یابد. این امر موجب شده است تا توان اختلاف فشار بخار به مقداری کمتر از یک کاهش یابد. این نتایج با نتایج پژوهشگرانی نظیر: تانی [۱]، سارتوری [۹] و شمیمیری [۱۶] که در روابط پیشنهادی خود مقداری کمتر از یک را ارائه نموده اند، همخوانی دارد.

بالای سطح آب اندازه گیری شده است. میانگین سرعت‌های اندازه‌گیری شده به عنوان سرعت متوسط روی سطح آب در نظر گرفته شده است. بیشینه انحراف مشاهده شده، بین سرعت در نقاط مختلف کمتر از ۱۰٪ بود. دمای متوسط آب از میانگین دمای ۸ عدد ترموکوپل نوع T با دقت  $\pm 0.2^\circ C$  که دقیقاً زیر سطح آب قرار گرفته‌اند بدست می‌آید، بدین صورت که سطح استخر به ۸ منطقه مربعی مساوی تقسیم شده و در مرکز هر منطقه یک ترموکوپل تعبیه گردیده است. بازه تغییرات دمای آب در این تحقیق از  $20^\circ C$  تا  $55^\circ C$  با افزایش تقریبی  $2.5^\circ C$  در نظر گرفته شده است.

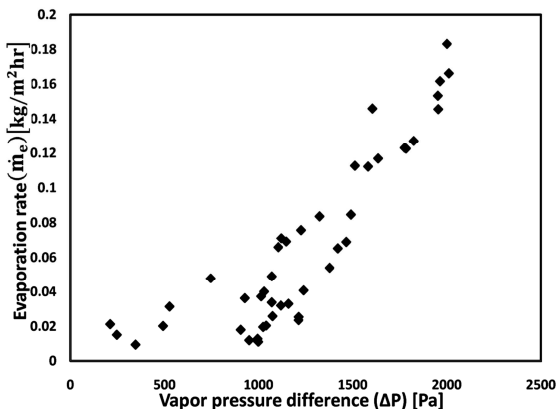
رطوبت نسبی هوا بوسیله دو عدد حسگر که در ورودی و خروجی تونل باد و به فاصله ۲۵ سانتی متر بالای سطح آب قرار گرفته اندازه گیری شده است. جهت اندازه گیری دمای هوا از سه عدد ترموکوپل نوع T با دقت  $\pm 0.2^\circ C$  استفاده گردیده که دو عدد از این ترموکوپل ها در ورودی و خروجی تونل باد و یکی از آنها دقیقاً در مرکز تونل باد قرار گرفته است. فاصله تمام ترموکوپل ها ۲۵ سانتی متر بالای سطح آب می‌باشد. ترموکوپل قرار گرفته در مرکز تونل باد جهت اندازه گیری دمای هوا و دو ترموکوپل دیگر به همراه حسگر های رطوبت جهت تعیین رطوبت مطلق استفاده می‌گردد.

جهت افزایش دمای هوا از سه عدد المنت پره دار به توان مجموعاً ۶۰۰۰ وات که در ورودی تونل باد قرار گرفته اند استفاده گردیده است. گرمکن ها از سیم نیکروم ساخته شده و توسط لوله های PTFE<sup>۶</sup> پوشانده شده اند. جهت تنظیم دقیق دمای هوا به مقدار دلخواه از یک عدد اتوترانس و مدار PID کنترلگر استفاده گردیده که ترکیب موجود امکان تغییر دقیق دمای هوا در یک بازه گسترده را فراهم می‌آورد. نرخ تبخیر بر اساس روش اندازه گیری شمیمیری [۱۶] و پاوکان [۱۷] انجام گرفته است. در این روش بستر تست، توسط لوله ای به شکل سیفون به یک ظرف آب مرتبط شده است و ظرف آب بر روی یک ترازو قرار دارد. از آنجا که افت آب در بستر تست، متناسب با تغییر جرم آب در ظرف است در نتیجه تبخیر، سطح آب در بستر تست پایین آمده و باعث کاهش فشار در لوله مرتبط می‌شود که این کاهش فشار توسط مکش آب ظرف قرار گرفته روی ترازو، جبران خواهد شد.

#### ۴-۲ نتایج

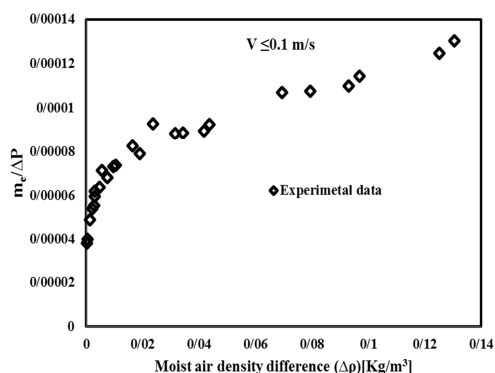
در این بخش نرخ تبخیر از سطح ساده آب برای بازه گسترده‌ای از رژیم های همرفت طبیعی، ترکیبی و اجباری در دامنه  $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 100$  مطالعه شده است این دامنه از  $\frac{Gr_m}{Re^2}$  با استفاده از سرعت‌های میانگین ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۹، ۲، ۴، ۵، ۶ متر بر ثانیه و دمای آب از  $20^\circ C$  به  $55^\circ C$  تولید شده است. در شکل ۲، اثر اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا بر نرخ تبخیر نمایش داده شده است. نتایج این شکل، کلیه رژیم های همرفت طبیعی، ترکیبی و اجباری که در این پژوهش مطالعه شده را پوشش داده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد. در ادامه، نتایج این شکل برای ارزیابی نرخ تبخیر در رژیم‌های مختلف جریان به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

<sup>6</sup> Protec Fluoropolymer Heaters



شکل ۵- تغییرات نرخ تبخیر در مقابل اختلاف فشار بخار برای رژیم همرفت طبیعی

از آنجا که در رژیم جابجایی آزاد، جمله اختلاف چگالی به عنوان عاملی مهم در مکانیزم همرفت مطرح است در شکل ۶، برای مشاهده اثر هر دو عامل اختلاف فشار بخار و اختلاف چگالی بخار، پارامتر  $\dot{m}_e/\Delta p$ ، نسبت به اختلاف چگالی نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهد که  $\dot{m}_e/\Delta p$  با افزایش پارامتر اختلاف چگالی به شکل تابع توانی افزایش می یابد. در نتیجه در رژیم جابجایی آزاد هر دو پارامتر اختلاف فشار بخار و اختلاف چگالی بخار، بین هوای موجود در مجاورت سطح آب و هوای محیط بر نرخ تبخیر اثر می گذارد. وابستگی نرخ تبخیر به اختلاف چگالی بخار توسط محققانی نظیر استیمن [۳]، پاول [۱۹] و شاه [۲۰] نیز گزارش شده است.

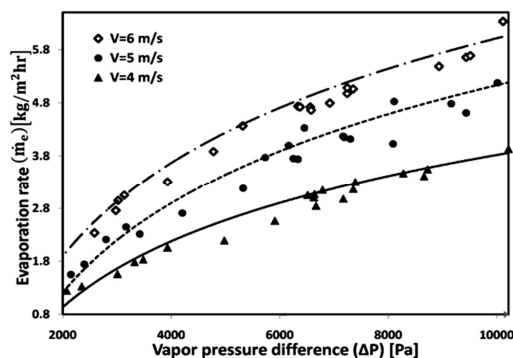


شکل ۶- اثر اختلاف چگالی هوای مرطوب بر رابطه اصلاح شده نرخ تبخیر در رژیم همرفت طبیعی

#### ۵- رابطه بدون بعد برای استفاده در رژیم های همرفت

##### طبیعی، ترکیبی و اجباری

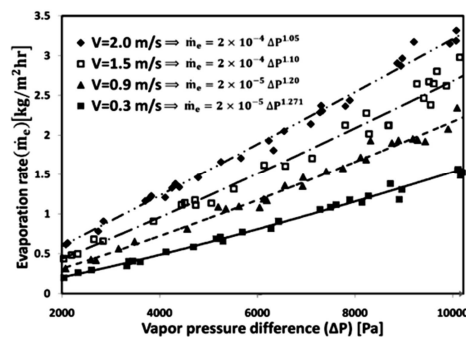
برای آن که بتوان نتایج حاصل از این پژوهش را به شرایط تبخیری دیگر، نظیر تغییر در شرایط هندسی سطح و شرایط جریان، گسترش داد، رابطه ای بدون بعد برای تمام رژیم های تبخیری مورد بررسی در این تحقیق ارائه شده است. این مدل تبخیری با استفاده از آنالیز رگرسیون غیر خطی از تمام نتایج اندازه گیری شده به صورت زیر پیشنهاد می گردد:



شکل ۳- اثر اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا بر نرخ تبخیر برای رژیم همرفت اجباری  $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 0.1$

#### ۴-۲- رژیم همرفت ترکیبی (دوگانه)

شکل ۴، بیانگر اثر اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت ترکیبی ( $0.15 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 25$ )، است. در این شکل مشاهده می شود که توان اختلاف فشار بخار برای منحنی های که به نتایج آزمایشگاهی برازش شده اند مقداری بزرگتر از یک را داراست. این موضوع نشان می دهد که با افزایش اختلاف فشار بخار، افزایش نرخ تبخیر به آهستگی انجام می یابد، اما نکته دیگری که از این شکل استنباط می گردد این است که با افزایش سرعت جریان هوا، توان اختلاف فشار بخار در این رژیم کاهش می یابد. توان بزرگتر از یک در روابط پیشنهادی شماری از محققان نظیر: پاوکان [۱۷]، بوتلر [۱۸] نیز مشاهده می گردد.



شکل ۴- اثر اختلاف فشار بخار و سرعت جریان هوا بر نرخ تبخیر برای رژیم همرفت ترکیبی  $0.15 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 25$

#### ۵-۲- رژیم همرفت طبیعی

شکل ۵، اثر اختلاف فشار بخار بر نرخ تبخیر برای رژیم همرفت طبیعی را نشان می دهد. نتایج آزمایشگاهی این شکل برای  $V \leq 0.1$  و  $\frac{Gr_m}{Re^2} \geq 25$  بدست آمده است. مشاهده می شود که داده های آزمایشگاهی در این رژیم، روند تغییرات مشخصی ندارند. پراکندگی نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که نرخ تبخیر در رژیم جابجایی آزاد نمی تواند تابع ساده ای از اختلاف فشار بخار باشد و پارامتر دیگری به غیر از اختلاف فشار بخار در این رژیم تاثیر گذار است.

عدد ناسلت  
فشار (Pa)  
عدد پراتل  
فشار بخار اشباع در سطح آب (Pa)  
عدد رینولدز  
عدد اشمیت  
عدد شروود  
دما (K)  
دمای سطح آزاد (K)  
زمان (hr)  
سرعت هوا ( $\frac{m}{s}$ )  
رطوبت مطلق  
کسر مولی بخار  
چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )  
لزجت دینامیکی ( $\frac{Ns}{m^2}$ )  
چگالی متوسط هوای مرطوب ( $\frac{kg}{m^3}$ )  
رطوبت نسبی

هوای مرطوب شامل هوای خشک و بخار آب  
رژیم همرفت آزاد  
رژیم همرفت اجباری  
رژیم همرفت ترکیبی  
خواص در سطح آب  
خواص میانگین در شرایط محیط

Nu  
P  
Pr  
$$\frac{Sh_{total}}{Sh_{free}} = 1.441 - 0.345 \ln\left(\frac{Gr_m}{Re^2}\right) + 0.22 \left(\ln\left(\frac{Gr_m}{Re^2}\right)\right)^2 - 0.037 \left(\ln\left(\frac{Gr_m}{Re^2}\right)\right)^3 \quad (24)$$
  
P<sub>H<sub>2</sub>O</sub>  
Re  
Sc  
Sh  
T  
T<sub>s</sub>  
t  
V  
w  
X<sub>H<sub>2</sub>O</sub>  
ρ  
μ  
 $\bar{\rho}_g$   
φ  
پا نویس ها  
g  
Free  
Forced  
Mixed  
s  
∞

این رابطه برای رژیم های همرفت طبیعی، ترکیبی و اجباری در دامنه  $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 100$  قابل استفاده است.

### ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از اندازه گیری های آزمایشگاهی نرخ تبخیر از سطح ساده آب برای تاثیر عوامل گوناگون نظیر: اختلاف فشار بخار، سرعت جریان هوا، پارامترهای بدون بعد، در بازه گسترده ای از رژیم های همرفت اجباری، ترکیب طبیعی و اجباری و همرفت طبیعی در دامنه  $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 100$  بررسی شده است. این دامنه از  $\frac{Gr_m}{Re^2}$  با استفاده از سرعت های میانگین ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۶، ۱٫۰، ۲٫۰، ۴٫۰ و ۵ متر بر ثانیه و دمای آب از ۲۰ °C تا ۵۵ °C تولید شده است. بر اساس اندازه گیری های آزمایشگاهی می توان نتایج مهم زیر را بیان نمود:

- نرخ تبخیر به شدت به رژیم جریان وابسته بوده و به طور غیر خطی با اختلاف فشار بخار تغییر می کند به نحوی که در رژیم همرفت اجباری ( $0.01 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 0.1$ ) با افزایش اختلاف فشار بخار، آهنگ افزایش تبخیر کاهش یافته و در رژیم همرفت ترکیبی ( $0.15 \leq \frac{Gr_m}{Re^2} \leq 25$ ) افزایش می یابد. در رژیم همرفت طبیعی ( $\frac{Gr_m}{Re^2} > 25$ ) علاوه بر اختلاف فشار بخار، اختلاف چگالی نیز بر نرخ تبخیر موثر است.
- در رژیم همرفت ترکیبی و اجباری هیچکدام از نظریه های مرسوم نظیر شبیه سازی و روابط پایه دالتون، بدون اصلاح قادر به پیش بینی تغییرات غیر خطی نرخ تبخیر و اختلاف فشار بخار نیستند.
- در نظر گرفتن توان اختلاف فشار بخار به عنوان تابعی از سرعت هوا و توان a عدد شروود رژیم همرفت ترکیبی به عنوان تابعی از گروه بدون بعد  $\frac{Gr_m}{Re^2}$ ، موجب می شود روابط شبیه سازی نرخ دقیقتر از تبخیر را ارائه دهند.

### ۸- مراجع

[1] Tanny J., Cohen S., Assouline S. and Lange F., Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates, Journal of Hydrology, Vol. 351, pp. 218-229, 2008.  
[2] Iskra C. R. and Simonson C. J., Convective mass transfer coefficient for a hydro dynamically developed airflow in a short rectangular duct, Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 50, pp. 2376-2393, 2007.  
[3] Steeman H. J. T'Joel C., Van Belleghem M., Janssens A., and De Paepe M., Evaluation of the different definitions of the convective mass transfer coefficient for water evaporation into air, Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 52, pp. 3757-3766, 2009.  
[4] Moghiman M. and Jodat A., Experimental investigation of water evaporation in indoor swimming pools, International Journal Heat Mass Technol., Vol. 25(2), pp. 43-47, 2007.  
[5] Moghiman M., and Jodat A., Effect of air velocity on water evaporation rate in indoor swimming pools, The Iranian Society of Mechanical Engineers, Vol. 8, pp. 19-30, 2007.  
[6] Jodat A. and Moghiman M., Experimental comparison of the ability of Dalton based and similarity theory correlations to predict water evaporation rate in different flow regimes, Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 1397-1406, 2012.  
[7] Jodat A. and Moghiman M., An experimental investigation on the effects of surface gravity waves on the water evaporation rate in different air flow regimes, Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 1823-1830, 2013.  
[8] Chilton T.H. and Colbum A.P., Mass transfer (absorption) coefficients Prediction from Data on Heat Transfer and Fluid

### ۷- نمادها

ضریب نفوذ جرم بین آب و هوا ( $\frac{m^2}{s}$ )  
شتاب گرانش ( $\frac{m}{s^2}$ )  
ضریب انتقال جرم  
عدد گرافش انتقال جرم  
رسانایی گرمایی ( $\frac{W}{mk}$ )  
طول (m)  
نرخ تبخیر آب ( $\frac{kg}{m^2 hr}$ )  
کسر جرمی بخار آب

D<sub>H<sub>2</sub>O,air</sub>  
g  
g<sub>mH<sub>2</sub>O</sub>  
Gr<sub>m</sub>  
k  
L  
ṁ<sub>e</sub>  
m<sub>fH<sub>2</sub>O</sub>

- Friction, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 26, pp. 1183-1187, 1934.
- [9] Sartori E., Critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces, Solar Energy, Vol. 68, pp. 77-89, 2000.
- [10] Dalton J., Experimental essays on the constitution mixed gases; on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, on evaporation and on the expansion of gases by heat, Mem. Manchester Liter. Phil. Soc., Vol. 11, pp. 535-602, 1802.
- [12] ASHRAE, ASHRAE Handbook- Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2005.
- [13] Lienhard J. H. and Lienhard V.J.H., A Heat Transfer Text Book, 3th ed., Phlogiston Press, New York, 2005.
- [14] Boukadida N. and Nasrallah S., Mass and heat transfer during water evaporation in laminar flow inside a rectangular channel—validity of heat and mass transfer analogy, International Journal Thermal Science, Vol. 40, pp. 67-81, 2001.
- [15] Incropera F.P. and Dewitt D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley and Sons, New York, 2002.
- [16] Al-Shamimiri M., Evaporation rate as a function of water salinity, Desalination, Vol. 150, pp. 189-203, 2002.
- [17] Pauken M.T., An Experimental Investigation of Combined Turbulent Free and Forced Evaporation, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 18, pp. 334-340, 1998
- [18] Boetler L. M. K., Gordon H. S. and Griffin J. R. Free evaporation into air of water from a free horizontal quiet surface, Industrial & Engineering Chemistry, Vol. 38, pp. 596-600, 1946.
- [19] Powell R.W., Evaporation of water from saturated surfaces engineering, Vol. 239, pp. 278-280, 1940.
- [20] Shah M. M., Rate of evaporation from undisturbed water pools to quiet air: evaluation of available correlations, International Journal of HVAC & R, Vol. 8, pp. 125-131, 2002