

ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر رژیم های همرفت طبیعی، ترکیبی و اجباری بر نرخ تبخیر از سطوح موج آب

امین جودت*

دانشکده مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران،

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۰۶

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۶/۲۹

کلمات کلیدی:

امواج گرانشی
تبخیر
همرفت طبیعی
همرفت ترکیبی
همرفت اجباری

خلاصه: در این مطالعه با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در دامنه گسترده‌ای از نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، دمای آب و سرعت هوا در حالتی که نسبت عدد گراشف به مربع عدد رینولدز بین ۰/۰۱ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده است، نرخ تبخیر در رژیم‌های همرفت طبیعی، ترکیبی و اجباری با هم مقایسه شده است. نتایج اندازه‌گیری شده نرخ تبخیر برای سطوح موج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت هوا، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، نرخ تبخیر رفتار متفاوتی را با تغییرات رژیم جریان همرفت نشان می‌دهد. در رژیم همرفت طبیعی، با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، سطح تماس آب و هوا و القای آشفتگی به لایه مرزی بخار افزایش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می‌شود و نسبت‌های ارتفاع به دوره تناوب موج بالاتر از ۰/۱۵ متر بر ثانیه، باعث افزایش بیشتر نرخ تبخیر می‌گردد. در حالی که در رژیم‌های همرفت ترکیبی و اجباری، علاوه بر وجود مناطقی مشابه رژیم همرفت طبیعی که سبب افزایش نرخ تبخیر می‌شود در ترکیب خاصی از سرعت جریان هوا و پارامترهای سطح موج، کاهش غیرمنتظره نرخ تبخیر دیده می‌شود.

۱- مقدمه

روابط زیادی جهت تخمین نرخ تبخیر برای رژیم‌های مختلف همرفت پیشنهاد شده است [۱۲-۲]. با وجود آنکه به ندرت می‌توان حجمی از آب در معرض اتمسفر را یافت که موجی در سطح آن تشکیل نشود ولی تاکنون مطالعه جامعی جهت بررسی اثر پارامترهای موج سطح بر نرخ تبخیر در رژیم‌های مختلف همرفت انجام نگرفته است. فرآیند تبخیر از سطوح موج در بسیاری از صنایع نظیر تاسیسات پالایشگاهی، تاسیسات هسته‌ای، سیستم‌های تبخیری و صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اثر امواج هیدرودینامیکی بر نرخ تبخیر در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. جودت و همکاران [۸]، اثر امواج گرانشی بر نرخ تبخیر را برای رژیم‌های مختلف جریان بررسی کردند و نشان دادند که وجود امواج در سطح آب موجب افزایش نرخ تبخیر شده و اثر افزایش القای آشفتگی در فاز

پدیده تبخیر آب در هوا که شامل فرایندهای انتقال حرارت و انتقال جرم است کاربرد وسیعی در فرآیندهای صنعتی و طبیعی دارد. تبخیر آب، به دو صورت می‌تواند محقق شود: الف) تبخیر اجباری که در اثر مکانیزم همرفت اجباری ایجاد می‌شود. ب) تبخیر آزاد (تبخیر درون هوای ساکن) که در اثر اختلاف چگالی رطوبت، بین هوایی که روی سطح آب است و هوای محیط اطراف، ایجاد می‌شود [۱]. در بسیاری از سیستم‌ها، تبخیر در اثر ترکیبی از دو فرآیند بالا (همرفت طبیعی و همرفت اجباری) ایجاد می‌شود.

تاکنون، تحقیقات قابل ملاحظه‌ای، جهت بررسی فرآیند تبخیر از سطوح ساده آب برای رژیم‌های مختلف جریان انجام گرفته و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amin.jodat@yahoo.com



دو حالت را معادل فرض نموده‌اند [۱۶ و ۱۷]، اما تحقیقات رثول [۱۸] نشان می‌دهد که ساختار حرکت جریان در مرز متحرک هوا و سطح آب^۲ با حرکت روی سطح جامد مرطوب متفاوت می‌باشد. با وجود تمام این مطالعات، در بسیاری از منابع بر لزوم انجام مطالعات جامع‌تری در زمینه اثر امواج بر نرخ تبخیر تاکید شده است [۹ و ۱۰]. گرچه هندسه سطح آب به شدت بر نرخ تبخیر اثر می‌گذارد، تاکنون اثرات پارامترهای متفاوت موج‌های گرانشی در رژیم‌های مختلف جابجایی بر نرخ تبخیر مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این پژوهش مدت زمان طولانی برای انجام هر آزمایش و روش اندازه‌گیری نرخ تبخیر، این امکان را فراهم نموده که از بستر تستی با ابعاد بزرگتر استفاده شود. اگر چه عدد رینولدز استفاده شده در این پژوهش با عدد رینولدز محققان گذشته مشابهت دارد، ولی ابعاد بزرگتر و دامنه گسترده تغییرات سرعت هوا سبب شده است که علاوه بر اثر همرفت اجباری، اثر همرفت ترکیبی و آزاد نیز بر نرخ تبخیر بررسی گردد. همچنین با توجه به تجهیزات در نظر گرفته شده در بستر تست، امکان کنترل و ثبت اثر پارامترهای مختلف سطوح موج بر نرخ تبخیر نیز فراهم شده است. هدف از انجام این پژوهش مطالعه اثر رژیم‌های مختلف جابجایی آزاد، ترکیبی و اجباری بر نرخ تبخیر از امواج گرانشی سطح آب است که می‌تواند موجب پیش‌بینی دقیق‌تری از تعیین نرخ تبخیر در صنایع مختلف گردد.

۲- اعداد بی‌بعد و معادلات حاکم

برای تعیین مکانیزم همرفت غالب در یک شرایط خاص، از گروه بدون بعد زیر استفاده می‌شود [۱]:

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\text{Strength of natural convection flow}}{\text{Strength of forced convection flow}} \quad (1)$$

Gr و Re ، به ترتیب اعداد گراشف و رینولدز هستند که به صورت زیر بیان می‌گردند:

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

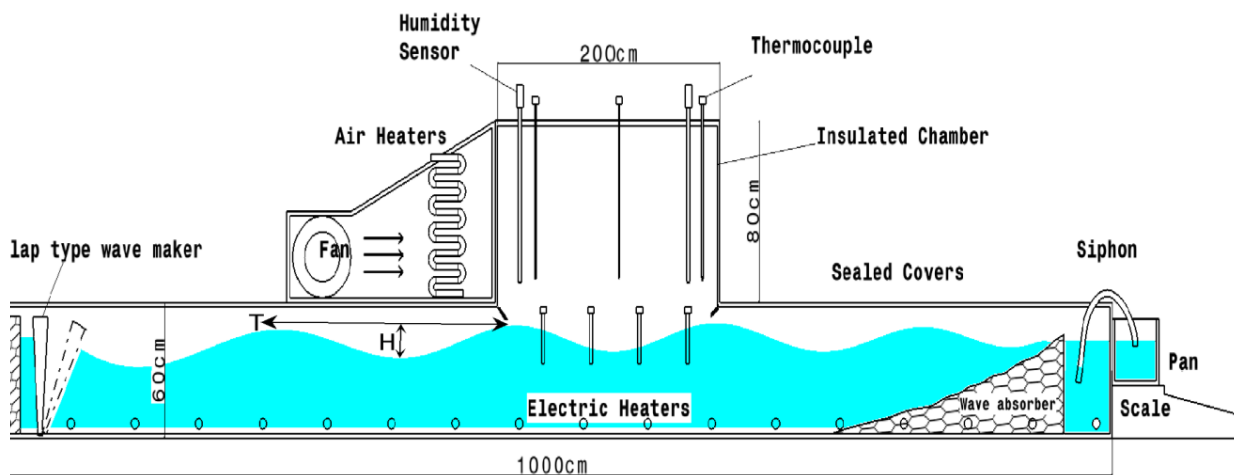
$$Re = \frac{\bar{\rho}_g V L}{\mu_g} \quad (3)$$

$\rho_{g,s}$ و $\rho_{g,\infty}$ به ترتیب، چگالی هوای مرطوب در سطح آب و در

بخار به مراتب بیشتر از اثر افزایش مساحت در نرخ تبخیر است. جانگ [۹]، جابجایی ترکیبی را برای سطوح موج قائم به صورت عددی مطالعه کرد. مطالعات او نشان می‌دهد این نوع جریان‌ها، دارای عدد ناسلت کمتری در مقایسه با جریان روی سطح بدون موج می‌باشد. سیمون [۱۰]، نرخ تبخیر در رژیم همرفت ترکیبی برای یک دیواره موج با پروفیل سینوسی را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت نرخ تبخیر از سطوح موج در رژیم همرفت ترکیبی به مراتب بیشتر از نرخ تبخیر از سطوح بدون موج می‌باشد. فریز و هاپفینگر [۱۱]، اثر موج‌های هیدرودینامیکی مویین را بر نرخ تبخیر و انتقال حرارت مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده نمودند با افزایش عدد فرود نرمال، دامنه و فرکانس افزایش یافته و انتقال حرارت و انتقال جرم نیز افزایش می‌یابد. تعدادی از مقالات موجود نیز اثر امواج گرانشی بر نرخ تبخیر را مطالعه نموده‌اند. ایستبروک [۱۳] به مطالعه اثر امواج گرانشی و سرعت جریان هوا بر نرخ تبخیر پرداخته است. او در یک تونل باد به ابعاد ۱۲/۵ متر طول، ۱/۲ متر عرض و ۰/۷۵ متر ارتفاع که کاملاً درز بند شده بود به مطالعه پرداخت و تغییرات رطوبت را نسبت به زمان ثبت نمود و متوجه شد که در شرایط خاصی از سرعت باد، جدایی جریان هوا در سمت باد پناه^۱ قله موج، سبب تشکیل جریان‌های گردابه‌ای خواهد شد که در مقابل انتقال جرم مقاومت نموده و سبب کاهش نرخ تبخیر می‌شوند. داس [۱۴] به بررسی نرخ تبخیر، توسط موج‌های گرانشی در یک محفظه استوانه‌ای به قطر ۱۰/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱/۶ سانتی‌متر پرداخت و نتیجه گرفت که موج‌های سطحی، موجب افزایش نرخ انتقال جرم و حرارت می‌شود و نرخ تبخیر به عدد جاکوب، گرادیان دما در سطح مایع و شکست موج در سطح مایع بستگی دارد. زکوئر [۱۵] اثر دامنه و فرکانس موج‌های گرانشی دایره‌ای بر نرخ انتقال جرم را در یک محفظه استوانه‌ای به قطر ۱۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ سانتی‌متر به صورت آزمایشگاهی مطالعه کرده و مشاهده نموده‌است با افزایش دامنه، عدد شروود به طور پیوسته افزایش می‌یابد در حالی که افزایش فرکانس تا مقدار ۶ هرتز عدد شروود را افزایش داده و بیشتر از آن موجب کاهش عدد شروود می‌گردد.

تعدادی از مراجع، فرآیند تبخیر از سطوح موج آب را مشابه تبخیر از سطوح جامد مرطوب دانسته‌اند و ضخامت زیر لایه پخش^۲ برای این

- 1 Lee Side
- 2 Diffusion Sub Layer



شکل ۱: نمای بستر تست به همراه جزئیات

Fig. 1: Experimental test chamber with details

پوشش داده شده است، این امر سبب کاهش انتقال حرارت تابشی و کاهش جذب بخار آب در بدنه تونل باد خواهد شد. برای آن که مشاهده امواج در داخل استخر امکان پذیر باشد یکی از دیوارهای طولی از شیشه دوجداره ساخته شده و مابقی بدنه به خوبی عایق گردیده است. در شکل ۱ بستر مورد آزمایش نمایش داده شده است. 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 پی.ای.دی^۱ کنترلر، استفاده شده که این گرمکن‌های الکتریکی در نزدیکی کف استخر نصب گردیده‌اند. گرمکن‌ها از سیم نیکروم ساخته و توسط لوله‌های پی.تی.اف.ای^۲ پوشانده شده‌اند. برای ایجاد سرعت‌های مختلف هوا روی سطح آب و مطالعه اثر مکش و دمش هوا بر نرخ تبخیر از یک تونل باد به همراه یک فن محوری و اینورتر کنترل دور با دقت 1 rpm، استفاده شده است.

شرایط هوای محیط، V سرعت باد، μ لزجت هوا، L طول مشخصه و $\bar{\rho}_g$ چگالی متوسط هوای مرطوب می‌باشند. اگر $\frac{Gr}{Re^2}$ هم‌مرتبه با یک باشد، رژیم جریان، ترکیبی از هر دو مکانیزم همرفت (طبیعی و اجباری) است. برای رژیم‌های جریان با همرفت اجباری، نسبت $\frac{Gr}{Re^2}$ خیلی کوچک‌تر از مرتبه یک و برای رژیم‌های جریان با جابجایی طبیعی، این نسبت بسیار بزرگ‌تر از مرتبه یک است [۱]. تجهیزات در نظر گرفته شده در بستر تست، با امکان ایجاد دامنه گسترده‌ای از سرعت هوا و دمای آب، سبب شده است که شرایط اندازه‌گیری اثر رژیم‌های مختلف جریان همرفت بر نرخ تبخیر امکان پذیر شود.

۳- شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش تبخیر در استخری به ابعاد داخلی $10 \times 0.5 \text{ m}^2$ و عمق ۰/۶ متر انجام شده است. قسمت بالایی استخر از یک تونل باد تشکیل شده که سطح داخلی این تونل به وسیله نوارهای آلومینیومی به خوبی

1 Proportional-Integral-Derivative (PID)

2 Polytetrafluoroethylene (PTFE)

نرخ تبخیر بر اساس روش اندازه‌گیری شمیمیری [۱۲] انجام گرفته است. در این روش بستر تست، توسط لوله‌ای 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. ترازو مورد استفاده دارای ظرفیت ۶ کیلوگرم و دقت ۰/۱ گرم می‌باشد. اطلاعات حاصل از ترازو توسط کامپیوتر در بازه زمانی ۱۰ دقیقه برای هر آزمایش ثبت می‌شود. از آنجا که تغییرات ارتفاع آب باعث ایجاد نوسان در عدد ترازو می‌شود جهت کاربرد این روش در اندازه‌گیری نرخ تبخیر برای سطوح موج، وجود یک سیستم جاذب یا دمپ کننده امواج^۲ نیز ضروری است. سیستم جاذب طراحی شده در بستر تست، دو نقش اصلی را ایفا می‌نماید: الف- باعث جذب نوسانات شده و امکان استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم نرخ تبخیر در بستر تست را فراهم می‌نماید ب- از اثرات غیر خطی نامطلوب برگشت امواج جلوگیری می‌کند. در فرآیند انجام آزمایش برای سطوح موج، دیده می‌شود امواجی که در بخش اصلی محفظه تست پایدار هستند پس از رسیدن به ساحل جاذب موج، ارتفاع آن‌ها افزایش یافته و ناپایدار می‌گردند. ناپایداری امواج در ساحل با افزایش ارتفاع موج‌های تولید شده به فرآیند شکست موج^۳ منجر می‌شود. به منظور حذف اثرات نامطلوب ناپایداری در نتایج تبخیر مشابه روش پیشنهادی ایستربروک [۱۳]، سطح آب در مناطق امواج ناپایدار، با سه لایه پلی‌اتیلن، پلاستیک و شیشه کاملاً هوا بند گردیده است. قطرات بخار تقطیر شده که در زیر لایه پلاستیک مشاهده می‌شود گواه حجم رطوبت زیاد محبوس شده در این مناطق (شرایط اشباع رطوبت) و اصلاح اثرات نامطلوب ناپایداری است. جهت تولید موج از یک دستگاه موج‌ساز نوع لولایی^۴ استفاده شده است که این دستگاه قابلیت تولید موج با دامنه و فرکانس متفاوت را داراست. جهت اندازه‌گیری ارتفاع موج از دستگاه استاندارد تست خازنی استفاده شده که این دستگاه قابلیت ثبت ۱۰۰ داده ارتفاع موج در یک ثانیه را داراست.

جهت بررسی صحت نتایج آزمایشگاهی عدم قطعیت بررسی شده

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، ۴، ۵ و ۶ متر بر ثانیه انتخاب شده تا رژیم‌های مختلف همرفت پوشش داده شود. سرعت هوای درون محفظه تست با استفاده از بادسنج حرارتی اندازه‌گیری می‌شود. در این روش اندازه‌گیری، ابتدا منطقه تست به ۹ مساحت مساوی تقسیم‌بندی گردیده و سرعت هوا در مرکز هر یک از ۹ منطقه به فاصله ۱۵ میلی‌متر بالای سطح آب اندازه‌گیری شده است. میانگین سرعت‌های اندازه‌گیری شده به عنوان سرعت متوسط روی سطح آب در نظر گرفته شده است. ماکزیمم انحراف مشاهده شده، بین سرعت در نقاط مختلف کمتر از ۱۰ درصد بود. دمای متوسط آب از میانگین دمای ۸ عدد ترموکوپل نوع تی^۱ با دقت $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 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°C تا 55°C با افزایش تقریبی $2/5^{\circ}\text{C}$ در نظر گرفته شده است. رطوبت نسبی هوا بوسیله دو عدد سنسور که در ورودی و خروجی تونل باد و به فاصله ۲۵ سانتی‌متر بالای سطح آب قرار گرفته اندازه‌گیری شده است.

جهت اندازه‌گیری دمای هوا از سه عدد ترموکوپل نوع تی با دقت $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ استفاده گردیده که دو عدد از این ترموکوپل‌ها در ورودی و خروجی تونل باد و یکی از آن‌ها دقیقاً در مرکز تونل باد قرار گرفته است. فاصله تمام ترموکوپل‌ها ۲۵ سانتی‌متر بالای سطح آب می‌باشد. ترموکوپل قرار گرفته در مرکز تونل باد جهت اندازه‌گیری دمای هوا و دو ترموکوپل دیگر به همراه سنسورهای 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 گرفته‌اند استفاده گردیده است. گرمکن‌ها از سیم نیکروم ساخته شده و توسط لوله‌های پی‌تی‌اف‌ای پوشانده شده‌اند. جهت تنظیم دقیق دمای هوا به مقدار دلخواه از مدار پی‌آی‌دی کنترلر استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات لوازم اندازه‌گیری بکار رفته در سامانه تست تبخیر به همراه دامنه کاربرد، تعداد و دقت آنها آمده است.

- 2 Wave Absorber
- 3 Wave Breaking
- 4 Flap Wave Maker

- 1 T-type Thermocouple

جدول ۱: مشخصات لوازم اندازه‌گیری بکار رفته در سامانه تست تبخیر

Table 1: Specifications of the experimental apparatus in test chamber

دقت	تعداد	دامنه	نوع	دستگاه آزمایشگاهی
$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	11	-45 تا 135 درجه سنتی‌گراد	ترموکوپل نوع تی	سنسورهای دما
$\pm 1\%$	2	1 تا 99 درصد	HS Series	سنسورهای رطوبت
$\pm 0.04\text{m/s}$	1	0 تا 10 متر بر ثانیه	Testo 400	بادسنج حرارتی
$\pm 0.1\text{g}$	1	0 تا 6 کیلوگرم	Ultra-Mark 6000	ترازوی دیجیتال
پی.آی.دی	6	0 تا 2500 وات	PTFE	هیترهای مستغرق
پی.آی.دی	3	0 تا 2000 وات	PTFE	هیترهای هوا
$\pm 1\text{mm}$	2	200 نمونه بر ثانیه	Capacitance	موج سنج
۱ rpm	2	0 تا 3000 دور بر دقیقه	LS	مبدل تغییر فرکانس

پوشش داده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت هوا نرخ تبخیر افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، (H/T) ، نرخ تبخیر رفتار متفاوتی را با تغییرات سرعت جریان هوا نشان می‌دهد. در ادامه، نتایج این شکل برای ارزیابی نرخ تبخیر در رژیم‌های مختلف جریان به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

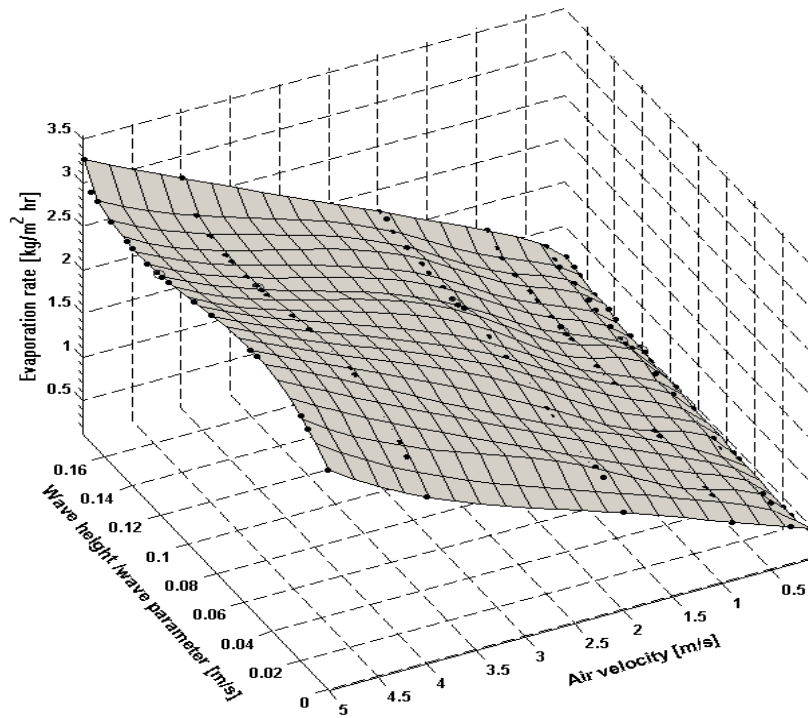
۴-۱- نرخ تبخیر از سطح موج آب در رژیم همرفت طبیعی

شکل ۳، بیانگر نرخ تبخیر از سطح موج آب برای سرعت جریان هوای کمتر از 0.1 متر بر ثانیه و $(\frac{Gr}{Re^2} \geq 90)$ است. مشاهده می‌شود با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد و شیب افزایش نرخ تبخیر در $\frac{H}{T} \geq 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ بصورت ناگهانی بیشتر می‌شود. این رفتار در رژیم‌های دیگر جریان نیز برای مقادیر بزرگتر H/T ، قابل مشاهده است. بررسی نتایج آزمایشگاهی در این ناحیه نشان می‌دهد با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، سطح تماس آب و هوا و القای آشفتگی به لایه مرزی بخار افزایش می‌یابد و این موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می‌شود. اما در مقادیر $\frac{H}{T} \geq 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ با توجه به نزدیک شدن موج‌ها به ناحیه شکست، امواج ناپایدار شده که این موضوع، سبب ایجاد حباب در سطح آب، پاشش قطرات آب به فاز بخار در نتیجه افزایش نرخ تبخیر می‌گردد. علت پراکندگی برخی نتایج تجربی نسبت به رگرسیون‌های رسم شده را می‌توان ناشی از خطاهای اندازه‌گیری و وجود پاشش قطرات و ایجاد حباب در سطح آب، در ترکیب خاصی از شرایط سطح موج و سرعت هوا بر

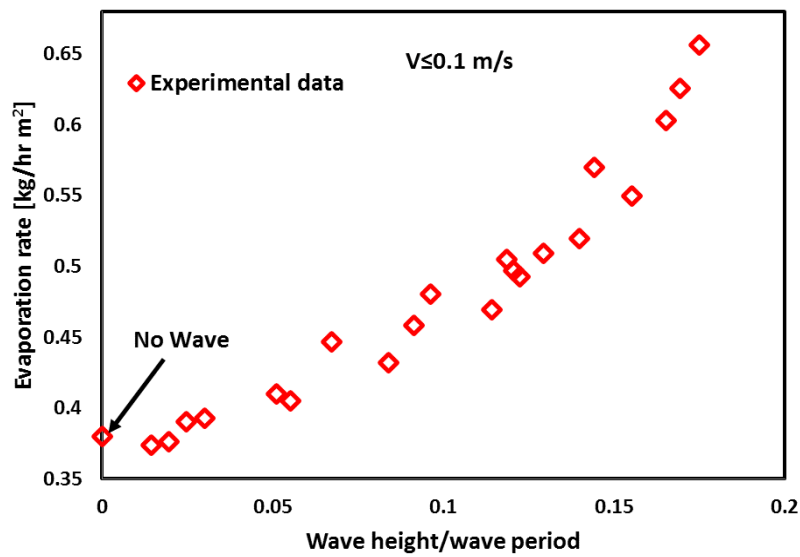
است قطعیت به علت دقت وسایل اندازه‌گیری (ترازو، خط‌کش، کرنومتر، ترموکوپل و...) به شکل توزیع مربعی فرض شده و عدم قطعیت به علت تکرار آزمایش و پراکندگی داده‌ها به شکل توزیع گوسین فرض شده عدم قطعیت در فرآیند اندازه‌گیری نرخ تبخیر $\pm 5/5 \text{ g/m}^2\text{h}$ بدست آمده است که این مقدار در نتیجه عدم قطعیت در ثابت تناسب بین ترازو و افت آب در بستر تست، اندازه‌گیری سطح تبخیر شونده و دقت ترازو برای یک دوره ۷ ساعته انجام آزمایش می‌باشد. عدم قطعیت در محاسبه اختلاف فشار بخار بدلیل رابطه غیر خطی فشار و دما، ثابت نبوده و این عدم قطعیت از مقدار $\pm 0.1 \text{ kpa}$ در دمای 20°C به مقدار $\pm 0.16 \text{ kpa}$ در دمای 55°C افزایش می‌یابد. عدم قطعیت بدلیل اندازه‌گیری سرعت جریان هوا $\pm 10\%$ محاسبه شده است. تمامی سنسورهای دما و رطوبت، بادسنج حرارتی و ترازو قبل از شروع آزمایش کالیبره شده و مطابق دستورالعمل سازنده محافظت و نگهداری شده است. چگونگی کنترل هر وسیله با توجه به دفترچه راهنمای آن صورت می‌گیرد. قبل از انجام هر مجموعه از آزمایش‌ها، بادسنج حرارتی و تمامی سنسورهای دما و رطوبت با سیستم چندکاره موجود در آزمایشگاه کالیبره شده و برای سه شرایط دما، رطوبت و سرعت هوا کنترل شده است.

۴-نتایج

در شکل ۲، اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، (H/T) و سرعت جریان هوا بر نرخ تبخیر نشان داده شده است. نتایج این شکل کلیه سرعت‌های جریان هوا که در این پژوهش مطالعه شده را



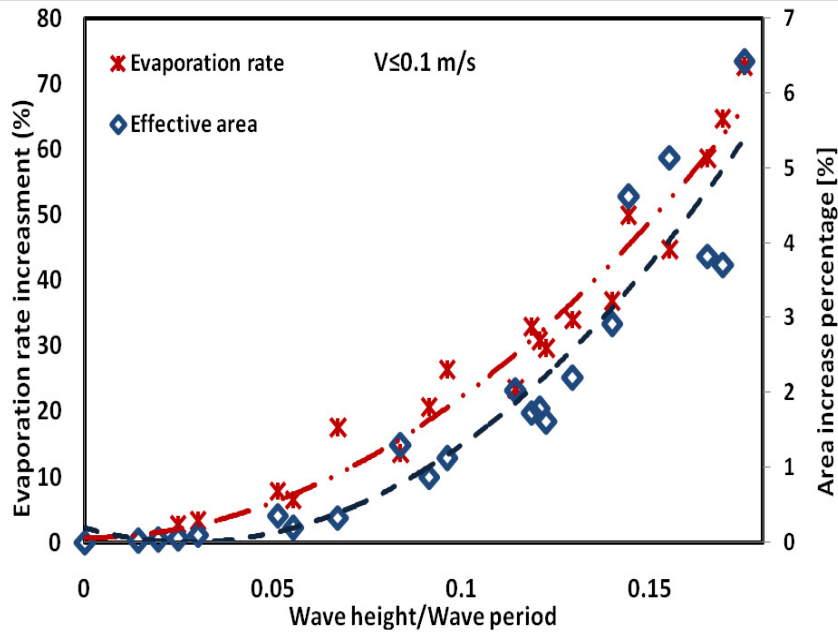
شکل ۲: اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج (H/T) و سرعت هوا بر نرخ تبخیر
 Fig. 2: Effect of vapor pressure difference and air velocity on water surface evaporation rate



شکل ۳: اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت طبیعی $(\frac{Gr}{Re^2} \geq 90)$
 Fig. 3: The effect of height to wave interval on evaporation rate in free convective regime $(\frac{Gr}{Re^2} \geq 90)$

همرفت طبیعی نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود در بیشترین مقدار پارامتر سطح موج $\frac{H}{T} \geq 0.118 \frac{m}{s}$ ، حداکثر افزایش نرخ تبخیر حدود ۷۵ درصد است. در حالی که در این نقطه، سطح

روی سطح دانست. در شکل ۴، درصد افزایش نرخ تبخیر و درصد افزایش سطح تماس آب و هوا در مقابل تغییرات پارامتر سطح موج برای رژیم



شکل ۴: درصد افزایش مساحت و نرخ تبخیر در مقابل پارامترهای سطح موج

Fig. 4: The percentage of area increase and evaporation rate against wavy surface parameters

بخار شیب افزایش نرخ تبخیر بیشتر می‌شود.

شکل ۶، بیانگر اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج بر نرخ تبخیر در سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه است. این شکل به سه ناحیه تقسیم شده و در هر ناحیه، یک خط به نتایج آزمایشگاهی برازش گردیده است. با توجه به شیب خطوط، این نواحی با شماره‌های I، II و III مشخص شده‌اند. در ناحیه III (بیشترین شیب تغییرات)، رفتاری مشابه مابقی رژیم‌های جریان مشاهده می‌گردد. بررسی نتایج آزمایشگاهی در این ناحیه نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع موج (افزایش زاویه حرکت باله موج‌ساز)، کاهش دوره تناوب (افزایش سرعت حرکت باله موج‌ساز) و با نزدیک شدن موج‌ها به ناحیه شکست امواج ناپایدار می‌شوند. در نتیجه، این امر، موجب ایجاد حباب در سطح آب و پاشش قطرات آب به فاز بخار می‌شود. این موضوع، سبب افزایش نرخ تبخیر در ناحیه III می‌گردد. در ناحیه II که شیب تغییرات کمتر از ناحیه III و بیشتر از ناحیه I می‌باشد، با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، سطح تماس آب و هوا و القای آشفتگی به لایه مرزی بخار افزایش می‌یابد و این موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می‌شود.

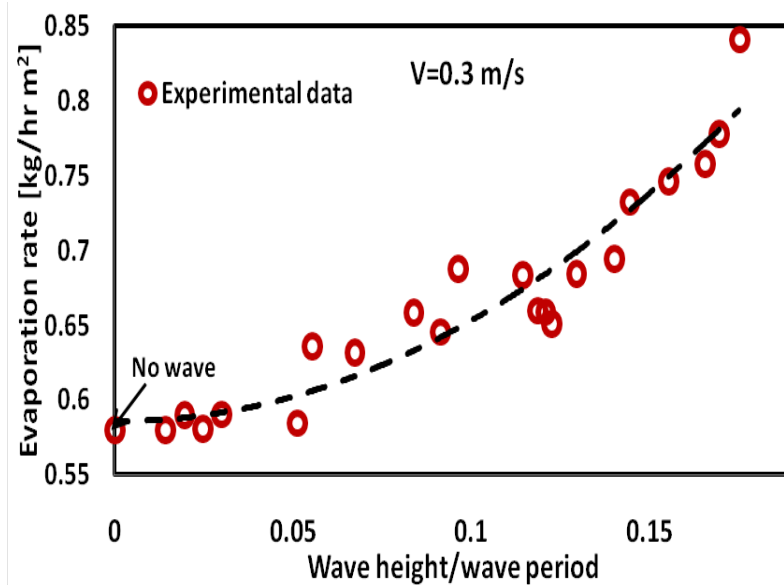
در ناحیه I شیب تغییرات نرخ تبخیر کمترین مقدار را داراست. این کاهش غیرمنتظره نرخ تبخیر، توسط تعدادی از محققان نظیر ایستبروک [۱۳] هارمز [۲۰] نیز گزارش شده است. علت این کاهش

تماس آب و هوا، تنها حدود ۷ درصد، نسبت به سطح صاف افزایش می‌یابد. از این شکل می‌توان استنباط نمود که اثر افزایش آشفتگی در افزایش نرخ تبخیر برای سطوح موج به مراتب بزرگتر از اثر افزایش مساحت است. این نتایج با تحقیقات مسالدی و همکاران [۱۹] و وازکیوز و همکاران [۱۵] که در آزمایش‌های خود اثر القای آشفتگی در لایه مرزی فاز گاز را در افزایش انتقال جرم، بیشتر از چهار برابر اثر افزایش مساحت دانسته‌اند، همخوانی دارد.

۲-۴- نرخ تبخیر از سطح موج آب در رژیم همرفت ترکیبی

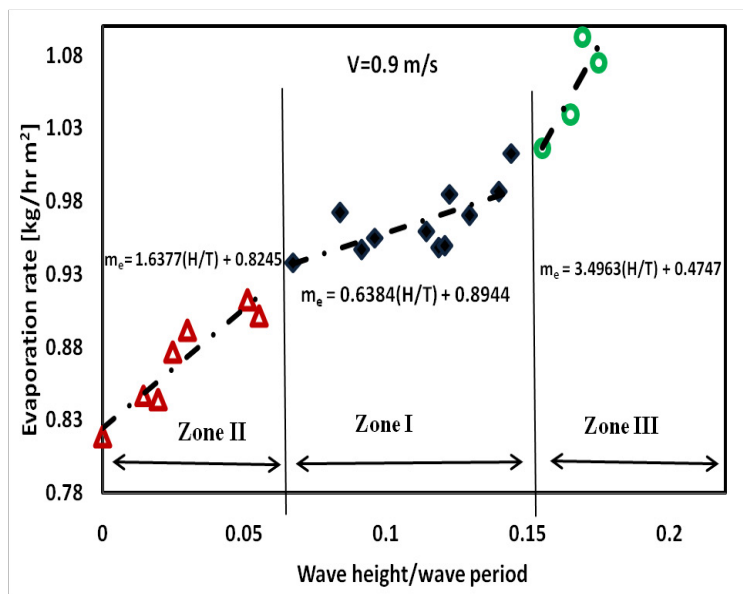
$$\left(0.12 \leq \frac{Gr}{Re^2} \leq 12\right)$$

شکل ۵، اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج $\left(\frac{H}{T}\right)$ بر نرخ تبخیر برای $V = 0.3 \text{ m/s}$ و $\frac{Gr}{Re^2} = 12$ را نشان می‌دهد. نسبت عدد $\frac{Gr}{Re^2}$ در این سرعت، بیانگر غلبه اثر همرفت طبیعی بر همرفت اجباری می‌باشد. در این شکل، رفتار تغییرات نرخ تبخیر، مشابه رژیم همرفت طبیعی بوده و با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، در اثر افزایش سطح تماس آب و هوا و القای آشفتگی به لایه مرزی بخار نرخ تبخیر نیز افزایش می‌یابد. همچنین، مانند رژیم همرفت طبیعی (شکل ۳) در $\frac{H}{T} \geq 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ، با توجه به ناپایدار شدن امواج در ناحیه شکست، به سبب ایجاد حباب در سطح آب و پاشش قطرات آب به فاز



شکل ۵: اثر پارامتر سطح موج بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت ترکیبی $\left(\frac{Gr}{Re^2} = 12, V = 0.3 \text{ m/s}\right)$

Fig. 5: The effect of height to wave interval on evaporation rate in mixed convective regime $\left(\frac{Gr}{Re^2} = 12, V = 0.3 \text{ m/s}\right)$

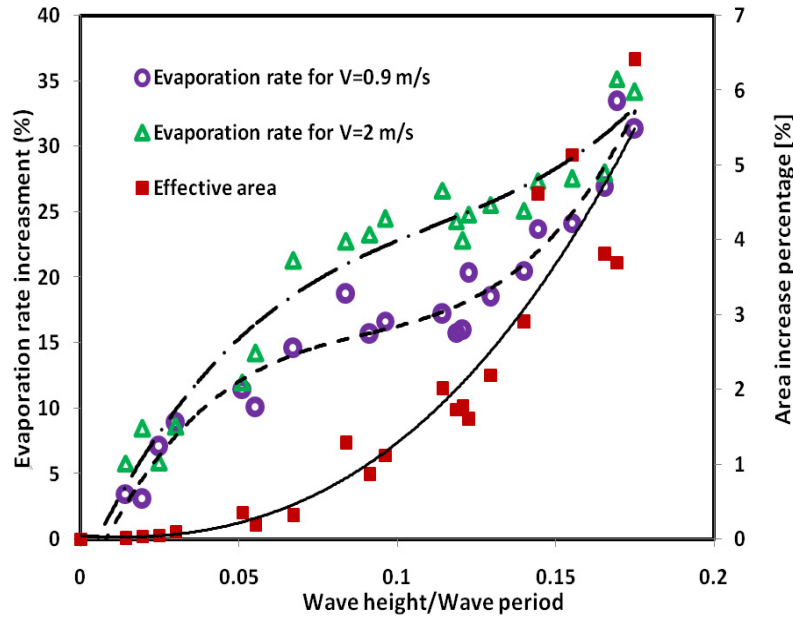


شکل ۶: اثر پارامتر سطح موج بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت ترکیبی $\left(\frac{Gr}{Re^2} = 1.2, V = 0.9 \text{ m/s}\right)$

Fig. 6: The effect of height to wave interval on evaporation rate in mixed convective regime $\left(\frac{Gr}{Re^2} = 1.2, V = 0.9 \text{ m/s}\right)$

آن‌ها در شرایط خاص می‌تواند موجب کندی افزایش نرخ تبخیر و حتی در مواردی موجب کاهش آن شود. شکل ۷، درصد افزایش نرخ تبخیر و درصد افزایش سطح تماس آب و هوا در مقابل تغییرات پارامتر سطح موج، برای رژیم همرفت ترکیبی $\left(V = 2 \text{ m/s}, V = 0.9 \text{ m/s}\right)$ را نشان می‌دهد. در بیشترین

غیرمنتظره را می‌توان ناشی از گردابه‌هایی دانست که می‌توانند در ترکیب خاصی از سرعت جریان هوا و پارامترهای سطح موج در سمت باد پناه قله موج بوجود آیند. محققانی مانند سیمون [۱۰]، توسط تکنیک‌های آزمایشگاهی پیشرفته توانسته‌اند این گردابه‌ها را در سطوح موج نمایش دهند. حبس رطوبت در این گردابه‌ها و پایداری



شکل ۷: مقایسه اثر پارامتر سطح موج بر درصد افزایش نرخ تبخیر و درصد افزایش مساحت برای رژیم همرفت ترکیبی ($V=2\text{ m/s}$, $V=0.9\text{ m/s}$)
Fig. 7: Comparison of the effect of wavy surface parameter on the increase percentage of evaporation rate and increase percentage of area for mixed convective regimes ($V=2\text{ m/s}$, $V=0.9\text{ m/s}$)

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در دامنه گسترده‌ای از نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، دمای آب و سرعت هوا برای $100 \leq \frac{Gr}{Re^2} \leq 0.1$ ، نرخ تبخیر از سطوح موج آب، در رژیم‌های همرفت طبیعی، ترکیبی و اجباری با هم مقایسه شده است. نتایج اندازه‌گیری شده نرخ تبخیر برای سطوح موج نشان می‌دهد نرخ تبخیر در این حالت بیشتر از سطوح بدون موج بوده و افزایش القای آشفته‌گی در فاز بخار به مراتب اثر بیشتری از مساحت، بر نرخ تبخیر دارد.

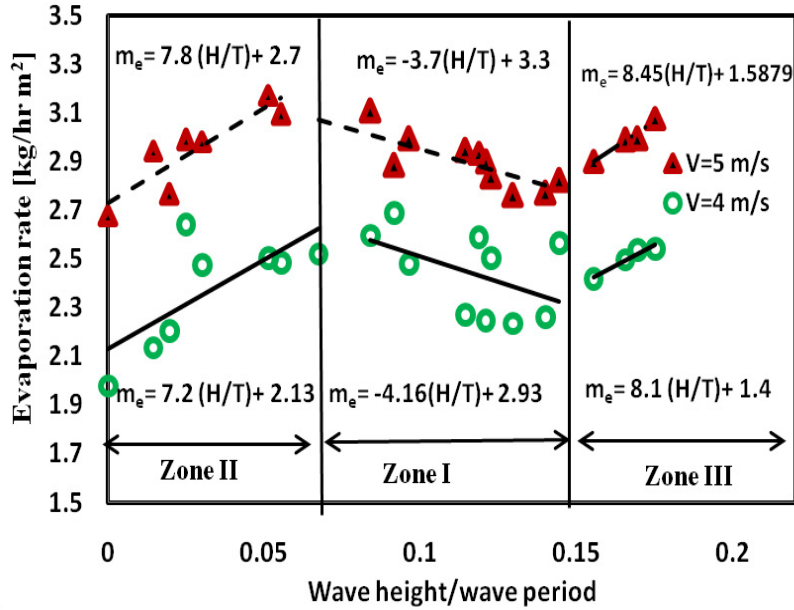
- در رژیم همرفت طبیعی، با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، سطح تماس آب و هوا و القای آشفته‌گی به لایه مرزی بخار افزایش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می‌شود اما در مقادیر $\frac{H}{T} \geq 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ با توجه به نزدیک شدن موج‌ها به ناحیه شکست، وجود امواج ناپایدار، سبب ایجاد حباب در سطح آب، پاشش قطرات آب به فاز بخار در نتیجه افزایش بیشتر نرخ تبخیر می‌گردد.

- در رژیم‌های همرفت ترکیبی و اجباری، علاوه بر وجود مناطقی مشابه رژیم همرفت طبیعی که افزایش سطح تماس آب و هوا، القای

مقدار نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج $\left(\frac{H}{T} = 0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ ، حداکثر افزایش نرخ تبخیر حدود ۳۵ درصد است. در حالی که در این نقطه، سطح تماس آب و هوا در حدود ۷ درصد، نسبت به سطح صاف افزایش یافته‌است. در نتیجه در این شرایط رژیم همرفت ترکیبی، القای آشفته‌گی در لایه مرزی فاز گاز، در حدود پنج برابر در مقایسه با اثر افزایش مساحت، بر نرخ تبخیر تاثیر می‌گذارد.

۳-۴- نرخ تبخیر از سطح موج آب در رژیم همرفت اجباری

در شکل ۸، اثر نسبت ارتفاع موج به دوره تناوب آن، بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت اجباری $\left(\frac{Gr}{Re^2} \leq 0.05\right)$ و برای سرعت‌های هوای ۴ و ۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در شکل ۸ نتایج آزمایشگاهی به سه ناحیه تقسیم شده و در هر ناحیه، یک خط به نتایج اندازه‌گیری شده، برازش گردیده است. همانند رژیم‌های همرفت طبیعی و ترکیبی، وجود پاشش قطرات و ایجاد حباب در سطح آب، باعث افزایش نرخ تبخیر در ناحیه III شده است. از طرفی، ناحیه II نیز رفتاری، مشابه رژیم‌های همرفت ترکیبی و طبیعی را داراست. کاهش ناگهانی نرخ تبخیر در ناحیه I را می‌توان ناشی از پایداری بیشتر گردابه‌هایی دانست که در رژیم همرفت ترکیبی توضیح داده شد.



شکل ۸: اثر پارامتر سطح موج بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت اجباری برای دو سرعت ($v = 4 \frac{m}{s}$, $v = 5 \frac{m}{s}$)

Fig. 8: The effect of height to wave interval on evaporation rate in forced convective regime for air velocity of 4 and 5 m/s

$\left(\frac{W}{mK}\right)$ ضریب هدایت حرارت	k	آشفتگی به لایه مرزی بخار و پاشش قطرات آب به فاز بخار سبب افزایش نرخ تبخیر می‌شود در ترکیب خاصی از سرعت جریان هوا و نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج در بازه $0.08 \frac{m}{s} \leq H/T \leq 0.14 \frac{m}{s}$ ، حبس رطوبت در گردابه‌های سمت باد پناه قله موج، می‌توانمی تواند موجب کندی نرخ افزایش و کاهش نرخ تبخیر گردد.
طول (m)	L	- نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد با کاهش نسبت عدد $\frac{Gr}{Re^2}$ در بازه $0.08 \frac{m}{s} \leq H/T \leq 0.14 \frac{m}{s}$ ، شیب افزایش نرخ تبخیر کاهش یافته به گونه ای که در رژیم جابجایی اجباری حبس رطوبت در گردابه‌های سمت باد پناه قله موج سبب کاهش نرخ تبخیر می‌گردد.
$\left(\frac{kg}{m^2h}\right)$ نرخ تبخیر آب	\dot{m}_e	
کسر جرمی بخار آب	$m_{f H_2O}$	
عدد ناسلت	Nu	
فشار (Pa)	P	
عدد پرناتل	Pr	
فشار بخار اشباع در سطح آب (Pa)	P_{H_2O}	
عدد رینولدز	Re	
عدد اشمیت	Sc	
عدد شروود	Sh	g شتاب گرانش $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
دوره تناوب موج (s)	T	g_{mH_2O} ضریب انتقال جرم
دمای سطح آزاد (K)	T_s	Gr_m عدد گراشف انتقال جرم
زمان (hr)	t	H ارتفاع موج (m)

فهرست علائم

- Journal of Heat and Fluid Flow, 29(1) (2008) 94-106.
- [11] E.J. Hopfinger, S. Das, Mass transfer enhancement by capillary waves at a liquid–vapor interface, *Experiments in fluids*, 46(4) (2009) 597-605.
- [12] M. Al-Shammiri, Evaporation rate as a function of water salinity, *Desalination*, 150(2) (2002) 189-203.
- [13] C.C. Easterbrook, A study of the effects of waves on evaporation from free water surfaces, US Bureau of Reclamation, 1969.
- [14] S. Das, E.J. Hopfinger, Mass transfer enhancement by gravity waves at a liquid–vapour interface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(5-6) (2009) 1400-1411.
- [15] G. Vazquez-Una, F. Chenlo-Romero, M. Sanchez-Barral, V. Perez-Munuzuri, Mass transfer enhancement due to surface wave formation at a horizontal gas–liquid interface, *Chemical engineering science*, 55(23) (2000) 5851-5856.
- [16] R. Roberts, H.-C. Chang, Wave-enhanced interfacial transfer, *Chemical Engineering Science*, 55(6) (2000) 1127-1141.
- [17] S. Pretot, B. Zeghmami, P. Caminat, Influence of surface roughness on natural convection above a horizontal plate, *Advances in Engineering Software*, 31(10) (2000) 793-801.
- [18] N. Reul, H. Branger, J.-P. Giovanangeli, Air flow separation over unsteady breaking waves, *Physics of Fluids*, 11(7) (1999) 1959-1961.
- [19] H. Massaldi, J. Gottifredi, J. Ronco, Effect of interfacial waves on mass transfer during evaporation of water from a free surface, *Lat. Am. J. Chem. Eng. Appl. Chem*, 6 (1976) 161-170.
- [20] D.W. Harms, The effect of wind and wave characteristics on evaporation, Michigan State University. Department of Civil and Environmental Engineering, 1987.
- [21] M.M. Shah, Improved method for calculating evaporation from indoor water pools, *Energy and Buildings*, 49 (2012) 306-309.
- [1] J.H. Lienhard, A heat transfer textbook, Dover Publications, 2019.
- [2] E. Sartori, A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces, *Solar energy*, 68(1) (2000) 77-89.
- [3] J. Dalton, Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation and on the expansion of gases by heat, *Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester*, 5(2) (1802) 535-602.
- [4] H.-J. Steeman, C. T'Joel, M. Van Belleghem, A. Janssens, M. De Paepe, Evaluation of the different definitions of the convective mass transfer coefficient for water evaporation into air, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(15-16) (2009) 3757-3766.
- [5] M. Moghiman, Experimental investigation of water evaporation in indoor swimming pools, *International Journal of Heat and Technology*, (2007).
- [6] M. Moghiman, A. Jodat, Effect of air velocity on water evaporation rate in indoor swimming pools, *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, (2007).
- [7] A. Jodat, M. Moghiman, M. Anbarsooz, Experimental comparison of the ability of Dalton based and similarity theory correlations to predict water evaporation rate in different convection regimes, *Heat and Mass Transfer*, 48(8) (2012) 1397-1406.
- [8] Jodat, M. Moghiman, G. Shirkhani, An experimental investigation on the effects of surface gravity waves on the water evaporation rate in different air flow regimes, *Heat and Mass Transfer*, 49(12) (2013) 1823-1830.
- [9] J.-H. Jang, W.-M. Yan, Mixed convection heat and mass transfer along a vertical wavy surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(3) (2004) 419-428.
- [10] S. Kuhn, P.R. von Rohr, Experimental investigation of mixed convective flow over a wavy wall, *International*

