

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(2) (2020) 113-116 DOI: 10.22060/mej.2018.14244.5821

An Experimental Assessment on the Effects of Forced, Free and Mixed Convection Regimes on the Water Evaporation Rate in Surface Gravity Waves

A. Jodat*

Mechanical Engineering Department, University of Bojnord, Bojnord, Iran

ABSTRACT: experimental measurements have been done over a wide range of wave parameters, water temperatures and air velocities in different convection regimes. The measurements were performed on a large heated wave flume equipped with a wind tunnel. The effects of forced, free and mixed convection regimes on the water evaporation rate in surface gravity waves have been investigated. The results show that wave motion on the water surface increases the rate of evaporation for all airflow regimes. In addition, results reveal the evaporation rate increases with air velocity but increasing of the wavy surface parameter, has different effects on the evaporation rate. For the free convection regime, the evaporation rate increases by increasing the wavy parameter. For forced and mixed convection regime at medium values of wave parameters, the leeward airflow structures, which form a barrier for the vertical transport of vapor, decrease evaporation rate. Results reveal that the effect of induced turbulence at the wavy interfacial surfaces on the water evaporation increment is more than the effect of interfacial surfaces on the water evaporation increment is more than the effect of interfacial surfaces on the water evaporation increment is more than the effect of interfacial surfaces on the water evaporation increment is more than the effect of interfacial surfaces on the water evaporation increment is more than the effect of interfacial surfaces on the water evaporation increment is more than the effect of interfacial surfaces on the water evaporation increment is more than the effect of interfacial surfaces on the water evaporation increment percentage.

Review History:

Received: 26/03/2018 Revised: 14/07/2018 Accepted: 07/09/2018 Available Online: 20/09/2018

Keywords: Gravity waves Forced convection Free convection Mixed convection Evaporation

1. INTRODUCTION

Remarkable studies have been conducted to investigate the evaporation process from simple water surfaces for different flow regimes [1-5], despite numerous applications of water evaporation in many aspects of nature and industrial engineering, there exists no exact expression for the rate of water evaporation from wavy surfaces [2-3]. In some references, evaporation from wavy surfaces are seen similar to evaporation from a solid rough surface or wet surfaces and thickness of sublayer diffusion for these two are considered similar. Although the geometry of water surface severely affects evaporation rate, no studies have been made on the effect of different parameters of gravitational waves in different free, mixed, and forced convection regimes over evaporation rate. This study aims to study the effect of wind velocity, amplitude, and frequency of gravitational waves on evaporation rates for different regimes of convective flows

2. EXPERIMENTAL SETUP AND MEASUREMENTS

The experiments were performed in a wave flume equipped with a wind tunnel. The main flume to allow prescribed deep-water gravity wave generation is 10.0 m long, 0.5 m wide and 0.6 m height with two passive wave absorption zones at both ends. The wind tunnel to allow airflow on the water waves is 2 m long 0.5 m wide and 0.8 m high. The air velocity within the chamber was measured using a thermal anemometer, at nine locations across the wind tunnel above the water surface. The inlet air relative humidity was controlled using a conventional air conditioning system. Air relative humidity was measured by two sensors placed near the inlet and outlet of the wind tunnel, above the water surface. In addition, the air temperature measured by thermocouples located over the wind tunnel. Immersion heaters were installed near the bottom of the flume to elevate the bulk temperature of the flume to the desired conditions. The evaporation rate was evaluated based on two methods. First, by means of the flow rate measurement and the difference between the inlet and outlet absolute humidity. Second, by means of a small pan connected to the main flume via a siphon tube. All the measuring instruments were calibrated before the experiments were performed and the data generated by these instruments were captured using a PC data acquisition system.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Results in this study show that with an increase in air velocity, evaporation rate increases; while with an increase of wavy surface parameter, evaporation rate shows a different behavior with changes in convection regime.

1-3. Water evaporation rate of wavy surface in the free convective regime

Fig. 1 shows the effect of the wavy surface parameter on the evaporation rate in the free convective regime.

In Fig. 2, the increasing percentage of evaporation rate and air surface, against changes of the wavy surface parameter for the natural convective regime is shown.

*Corresponding author's email: amin.jodat@yahoo.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1: The effect of height to wave interval on evaporation rate in free convective regime



Fig. 2: The percentage of area increase and evaporation rate against wavy surface parameters

2-3. Water evaporation rate of wavy surface in the mixed convective regime

Fig. 3 shows the effect of the wavy surface parameter over the evaporation rate in the mixed convective regime.

Fig. 4 shows the increasing percentage of evaporation



Fig. 3: The effect of height to wave interval on evaporation rate in mixed convective regime



Fig. 4: Comparison of the effect of wavy surface parameter on the increasing percentage of evaporation rate and the increasing percentage of area for mixed convective regimes



Fig. 5: The effect of height to wave interval on evaporation rate in forced convective regime

rate and air surface, against changes in the wavy surface parameter for the mixed convective regime. In the highest value of the wavy surface parameter, the maximum increase of evaporation rate is 35 percent. While interfacial surfaces on the water and the air about 7 percent increases compared to the still water.

3-3. Water evaporation rate of wavy surface in the forced convective regime

In Fig. 3, the proportion of wave height to its interval, on evaporation rate in the forced convective regime for air velocity of 4 and 5 meters per second is shown.

4. CONCLUSIONS

In this investigation, experimental measurements have been done to quantify evaporation rate from wavy water surfaces in free, mixed and forced convection regimes. Based on the presented results, the following conclusions may be drawn:

 The effect of wave motion for pumping vortices of air flow at the wavy interfacial surfaces on the water evaporation increment is more than the effect of interfacial area increment percentage.

- In all flow regimes, the water evaporation rate increases by increasing the wavy surface parameter.
- For mixed convection regime due to higher air velocities, the evaporation rate increases when compared with that of free convection regime.
- For all flow regimes, at higher air velocities, spilling of the wave crest can occur at lower values of the wavy surface parameter.

REFERENCES

 H.-J. Steeman, C. T'Joen, 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.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] E.J. Hopfinger, S. Das, Mass transfer enhancement by capillary waves at a liquid-vapor interface, Experiments in fluids, 46(4) (2009) 597-605.
- [5] 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.

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۲، سال ۱۳۹۹، صفحات ۴۵۳ تا ۴۶۴ DOI: 10.22060/mej.2018.14244.5821



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

امين 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 اجباری

خلاصه: در این مطالعه با استفاده از اندازه گیریهای 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 ۰۱۰۱ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده است، نرخ تبخیر در رژیمهای همرفت طبیعی، ترکیبی و اجباری با هم مقایسه شده است. نتایج اندازه گیری شده نرخ تبخیر برای سطوح مواج نشان میدهد که با افزایش سرعت هوا، نرخ تبخیر افزایش میابد 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 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 افزایش مییابد که این موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر میشود و نسبتهای ارتفاع به دوره تناوب موج بالاتر از ۱۸۱۵ متر بر ثانیه، باعث افزایش نرخ تبخیر می می دد. در حالی که در رژیمهای همرفت ترکیبی و اجباری، علاوه بر وجود مناطقی مشابه رژیم همرفت طبیعی که سبب افزایش نرخ تبخیر می شود در ترکیب خاصی از سرعت جریان هوا و پارامترهای سطح مواج، کاهش غیرمنتظره نرخ تبخیر می شود در ترکیب خاصی از سرعت جریان هوا و پارامترهای سطح مواج، کاهش غیرمنتظره نرخ تبخیر می مود.

۱– مقدمه

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 رژِیمهای مختلف جریان انجام گرفته و *نویسنده عهدهدار مکاتبات: amin.jodat@yahoo.com

روابط زیادی جهت تخمین نرخ تبخیر برای رژِیمهای 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 مواج سطح بر نرخ تبخیر در رژیمهای مختلف همرفت انجام نگرفته است. فرآیند تبخیر از سطوح مواج 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

Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیر کبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) NC در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید. دو حالت را معادل فرض نمودهاند [۱۶ و ۱۷]، اما تحقیقات رئول [۱۸] نشان میدهد که ساختار حرکت جریان در مرز متحرک هوا و سطح آب^۳ 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 می گذارد، 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 اندازه گیری 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 مواج 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 می تواند موجب پیش بینی 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 می شود [۱]:

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

$$Gr = \frac{\overline{\rho}_g(\rho_{g,s} - \rho_{g,\infty})gL^3}{\mu_g^2}$$
(7)

Re =
$$\frac{\rho_g r L}{\mu_g}$$
 (۳)
 $\rho_{g,s}$ و $\rho_{g,s}$ به ترتیب، چگالی هوای مرطوب در سطح آب و در

3 Moving Boundary

بخار به مراتب بیشتر از اثر افزایش مساحت در نرخ تبخیر است. جانگ [۹]، جابجایی ترکیبی را برای سطوح مواج قائم به صورت عددی مطالعه كرد. مطالعات او نشان مي دهد اين نوع جريان ها، داراي عدد ناسلت کمتری در مقایسه با جریان روی سطح بدون موج میباشد. سیمون [۱۰]، نرخ تبخیر در رژیم همرفت ترکیبی برای یک دیواره مواج با یروفیل سینوسی را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت نرخ تبخیر از سطوح مواج 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 فركانس افزایش یافته و انتقال حرارت و انتقال جرم نیز افزایش می یابد. تعدادی از مقالات موجود نیز اثر امواج گرانشی بر نرخ تبخیر را مطالعه نمودهاند. ایستربروک [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 کاملا 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' قله موج، سبب تشکیل جریانهای گردابهای خواهد شد که در مقابل انتقال جرم مقاومت نموده و سبب كاهش نرخ تبخير مي شوند. 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 می شود و نرخ تبخیر به عدد جاکوب، گرادیان دما در سطح مایع و شکست موج در سطح مایع بستگی دارد. زکوئز [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 می یابد در حالی که افزایش فرکانس تا مقدار ۶ هرتز عدد شروود را افزایش داده و بیشتر از آن موجب کاهش عدد شروود می گردد.

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

¹ Lee Side

² Diffusion Sub Layer

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۲، سال ۱۳۹۹، صفحه ۴۵۳ تا ۴۶۴





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.آی.دی^۱ کنترلر، استفاده شده که این گرمکنهای الکتریکی ساخته و توسط لولههای پی.تی.اف.ای^۲ پوشانده شدهاند. برای ایجاد سرعتهای مختف 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 مست.

1 Proportional–Integral–Derivative (PID)

2 Polytetrafluoroethylene (PTFE)

شرایط هوای محیط، V سرعت باد، μ لزجت هوا، L طول مشخصه و $\overline{\rho}_g \ \varphi$ گالی 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 کوچک تر از مرتبه یک و برای رژیمهای جریان با رژیمهای جریان با در تومهای جدیان این نسبت بسیار بزرگ تر از مرتبه یک است از ای مرتبه یک و مرای ممرفت از مرتبه یک و مرای است. مرای مرتبه یک و مرای با محرفت اجباری، نسبت $\frac{Gr}{Re^2}$ نام محرفت از مرتبه یک و مرای است. مرای مرتبه یک و مرای محرفت از مرتبه یک و مرای محرفت از مرتبه یک و مرای محرفت از مرتبه یک و مرای مرتبه محرفت از مرتبه محرفت بر از مرتبه یک است از مرتبه یک است از ای محرفت در نظر گرفته شده در بستر تست، با مکان ایجاد دامنه گستردهای از سرعت هوا و دمای آب، سبب شده است که شرایط اندازه گیری اثر رژیم های مختلف جریان همرفت بر نرخ تبخیر امکان پذیر شود.

۳-شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش تبخیر در استخری به ابعاد داخلی ^۲ ۵m^۲ و عمق ۱۶/۰ متر انجام شده است. قسمت بالایی استخر از یک تونل باد تشکیل شده که سطح داخلی این تونل به وسیله نوارهای آلومینیومی به خوبی 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 اندازه گیری می شود. در این روش اندازه گیری، ابتدا منطقه تست به ۹ مساحت مساوی تقسیم بندی گردیده و سرعت هوا در مرکز هر یک از ۹ منطقه به فاصله15 میلیمتر بالای سطح آب اندازه گیری شده است. میانگین سرعتهای اندازه گیری 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 درصدبود. دمای متوسط آب از میانگین دمای ۸ عدد ترموکوپل نوع تی با دقت $C^{\circ}C$ که دقیقا زیر سطح Λ آب قرار گرفتهاند بدست می آید، 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 $m C^\circ C$ تا با افزایش تقریبی m C $m ^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است. رطوبت m Cنسبی هوا بوسیله دو عدد سنسور که در ورودی و خروجی تونل باد و به فاصله ۲۵ سانتیمتر بالای سطح آب قرار گرفته اندازه گیری شده است.

جهت اندازه گیری دمای هوا از سه عدد ترمو کوپل نوع تی با دقت حهت اندازه گیری دمای هوا از سه عدد از این ترمو کوپل ها در ورودی و خروجی تونل باد و یکی از آن ها دقیقا در مرکز تونل باد قرار گرفته است. فاصله تمام ترمو کوپل ها ۲۵ سانتی متر بالای سطح آب می باشد. ترمو کوپل قرار گرفته در مرکز تونل باد جهت اندازه گیری دمای هوا و مو ترمو کوپل دیگر به همراه سنسورهای رطوبت جهت تعیین رطوبت مطلق استفاده می گردد. 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 هوا به مقدار دلخواه از مدار پی آی.دی کنترلر استفاده شده است. هوا به مقدار دلخواه از مدار پی آی.دی کنترلر استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات لوازم اندازه گیری بکار رفته در سامانه تست تبخیر به همراه دامنه کاربرد، تعداد و دقت آنها آمده است.

نرخ تبخیر بر اساس روش اندازه گیری شمیمیری [۱۲] انجام

جهت بررسی صحت نتایج آزمایشگاهی عدم قطعیت بررسی شده

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 آنجاکه 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 می شود 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 می باشد. اطلاعات حاصل از ترازو توسط کامپیوتر در بازه زمانی ۱۰ دقیقه برای هر آزمایش ثبت می شود. از آنجاکه تغییرات ارتفاع آب باعث ایجاد نوسان در عدد ترازو می شود جهت کاربرد این روش در اندازه گیری نرخ تبخیر برای سطوح مواج، وجود یک سیستم جاذب یا دمپ کننده امواج^۲نیز ضروری است. سیستم جاذب طراحی شده در بستر تست، دو نقش اصلى را ايفا مىنمايد: الف- باعث جذب نوسانات شده و امکان استفاده از روش اندازه گیری مستقیم نرخ تبخیر در بستر تست را فراهم مینماید ب-از اثرات غیر خطی نامطلوب بر گشت امواج جلوگیری می کند. در فرآیند انجام آزمایش برای سطوح مواج، دیده می شود امواجی که در بخش اصلی محفظه تست پایدار هستند پس از رسيدن به ساحل جاذب موج، ارتفاع آنها افزايش يافته و ناپایدار می گردند. ناپایداری امواج در ساحل با افزایش ارتفاع موجهای توليد شده به فرآيند شكست موج^۳منجر مى شود. به منظور حذف اثرات نامطلوب ناپایداری در نتایج تبخیر مشابه روش پیشنهادی ايستربروك[١٣]، سطح آب در مناطق امواج ناپايدار، با سه لايه پلی اتیلن، پلاستیک و شیشه کاملا هوابند گردیده است. قطرات بخار تقطیر شده که در زیر لایه پلاستیک مشاهده می شود 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 لولايي[†]استفاده شده است كه اين دستگاه قابليت توليد موج با دامنه و فرکانس متفاوت را داراست. جهت اندازه گیری ارتفاع موج از دستگاه استاندارد تست خازنی استفاده شده که این دستگاه قابلیت ثبت ۱۰۰ داده ارتفاع موج در یک ثانیه را داراست.

² Wave Absorber

³ Wave Breaking

⁴ Flap Wave Maker

¹ T-type Thermocouple

دقت	تعداد	دامنه	نوع	دستگاه آزمایشگاهی
$\pm \cdot / \Upsilon^{\circ}C$	11	45- تا 135 درجه سنتیگراد	ترموکوپل نوع تی	سنسورهای دما
±1%	2	1 تا 99 درصد	HS Series	سنسورهای رطوبت
$\pm \cdot / \cdot rm/s$	1	0 تا 10 متر بر ثانیه	Testo 400	بادسنج حرارتی
±۰/۱g	1	0 تا 6 كيلوگرم	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
±۱ mm	2	200 نمونه بر ثانيه	Capacitance	موج سنج
۱ rpm	2	0 تا 3000 دور بر دقيقه	LS	مبدل تغيير فركانس

جدول ۱: مشخصات لوازم اندازه گیری بکار رفته در سامانه تست تبخیر Table 1: Specifications of the experimental apparatus in test chamber

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، $\binom{H_T}{T}$ ، نرخ تبخیر رفتار متفاوتی را با تغییرات سرعت جریان هوا نشان میدهد. در ادامه، نتایج این شکل برای ارزیابی نرخ تبخیر در رژیم های مختلف جریان به صورت مجزا مورد بررسی قرار می گیرد.

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

شکل ۳، بیانگر نرخ تبخیر از سطح مواج آب برای سرعت جریان هوای کمتر از // متر بر ثانیه و $\left(\frac{Gr}{\text{Re}^{\vee}}\right)$ است. مشاهده می شود هوای کمتر از // متر بر ثانیه و $\left(\frac{Gr}{\text{Re}^{\vee}}\right)$ است. مشاهده می شود با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، نرخ تبخیر افزایش می یابد و شیب افزایش نرخ تبخیر در $\frac{m}{r}$ اس مورت ناگهانی بیشتر می شود. این رفتار در رژیم های دیگر جریان نیز برای مقادیر بزرگتر می شود. این رفتار در رژیم های دیگر جریان نیز برای مقادیر بزرگتر انشان می دو این ناحیه می شود. این مشاهده است. بررسی نتایج آزمایشگاهی در این ناحیه نشان می دهد با افزایش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، سطح تماس $\frac{H}{T}$ و هوا و القای آشفتگی به لایه مرزی بخار افزایش می یابد و این ناحیه موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می شود. اما در مقادیر $\frac{H}{T}$ موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می شود. اما در مقادیر آب با توجه به نزدیک شدن موجها به ناحیه شکست، امواج ناپایدار شده موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می شود. اما در مقادیر آب با توجه به نزدیک شدن موجها به ناحیه شکست، امواج ناپایدار شده موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می شود. اما در مقادیر می توارا آب با توجه به نزدیک شدن موجها به ناحیه شکست، امواج تاپایدار شده ناخ به فاز بخار در نتیجه افزایش نرخ تبخیر می گردد. علت پراکندگی به فاز بخار در نتیجه افزایش نرخ تبخیر می از در سطح آب، پاشش قطرات آب باشی از خطاهای اندازه گیری و وجود پاشش قطرات و ایجاد حباب در سطح آب، در سرع شده را می توان ناشی از خطاهای اندازه گیری و وجود پاشش قطرات و ایجاد حباب در سطح آب، در می گرد. علت پراکندگی در سط آب، در ترکیب خاصی از شرایط سطح مواج و سرعت هوا بر در سط آب، در ترکیب خاصی از شرایط سطح مواج و سرعت ها بر

است قطعیت به علت دقت وسایل اندازه گیری (ترازو، خط کش، کرنومتر، ترموکوپل و…) به شکل توزیع مربعی فرض شده و عدم قطعیت به علت تکرار آزمایش و پراکندگی دادهها به شکل توزیع گوسین فرض $\pm a/a~g/m^2h$ شده عدم قطعیت در فرآیند اندازه گیری نرخ تبخیر بدست آمده است که این مقدار در نتیجه عدم قطعیت در ثابت تناسب بین ترازو و افت آب در بستر تست، اندازه گیری سطح تبخیر شونده و دقت ترازو برای یک دوره ۷ ساعته انجام آزمایش می باشد. عدم قطعیت در محاسبه اختلاف فشار بخار بدليل رابطه غير خطى فشار و دما، ثابت نبوده و این عدم قطعیت از مقدار $\pm \epsilon/1$ kpa نبوده و این عدم قطعیت از مقدار مقدار ±۰/۱۶ kpa در دمای ۵۵°C افزایش می یابد. عدم قطعیت بدلیل اندازه گیری سرعت جریان هوا %۱۰ ± محاسبه شده است. تمامی سنسورهای دما و رطوبت، باد سنج حرارتی و ترازو قبل از شروع آزمایش کالیبره شده و مطابق دستور العمل سازنده محافظت و نگهداری شده است. چگونگی کنترل هر وسیله با توجه به دفترچه راهنمای آن صورت می گیرد. 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-نتايج

در شکل ۲، اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، $\binom{H}{T}$ 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 $\binom{H/}{T}$ و سرعت هوا بر نرخ تبخیر Fig. 2: Effect of vapor pressure difference and air velocity on water surface evaporation rate





روی سطح دانست. در شکل ۴، درصد افزایش نرخ تبخیر و درصد افزایش سطح در بیشترین مقدار پارامتر سطح مواج H → ۲ × ۲ × ۲ × داکثر افزایش تماس آب و هوا در مقابل تغییرات پارامتر سطح مواج برای رژیم نرخ تبخیر حدود ۷۵ درصد است. در حالی که در این نقطه، سطح



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

تماس آب و هوا، تنها حدود ۷ درصد، نسبت به سطح صاف افزایش می یابد. از این شکل می توان استنباط نمود که اثر افزایش آشفتگی در افزایش نرخ تبخیر برای سطوح مواج به مراتب بزرگتر از اثر افزایش مساحت است. این نتایج با تحقیقات مسالدی و همکاران [۱۹] و واز کیوز 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 دانسته اند، همخوانی دارد.

F-7- نرخ تبخیر از سطح مواج آب در رژیم همرفت ترکیبی $(F-Y) = \frac{Gr}{Re^{7}} \leq 1/2$ ($rl \geq \frac{Gr}{Re^{7}} \leq 1/2$) شکل ۵، اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج $\left(\frac{H}{T}\right)$ بر نرخ شکل ۵، اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج $\frac{Gr}{Re^{7}}$ برای $\frac{Gr}{Re^{2}}$ در این سرعت، بیانگر غلبه اثر همرفت طبیعی بر همرفت اجباری می باشد. 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 می باد. همچنین، مانند رژیم همرفت طبیعی نرخ ترخ ترخ مرفت می به مرفت طبیعی نرخ تبخیر نیز افزایش می باد. همچنین، مانند رژیم همرفت طبیعی شکل ۳) در $\frac{H}{T} > 1/2$

بخار شيب افزايش نرخ تبخير بيشتر مي شود. شکل ۶، بیانگر اثر نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج بر نرخ تبخیر در سرعت ۹/۹ 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 II، II و III مشخص شدهاند. در ناحیه III (بیشترین شیب تغییرات)، رفتاری مشابه مابقی رژیم های جریان مشاهده می گردد. بررسی نتایج آزمایشگاهی در این ناحیه نشان میدهد با افزایش ارتفاع موج (افزایش زاویه حرکت باله موجساز)، كاهش دوره تناوب (افزایش سرعت حركت باله موجساز) و با نزدیک شدن موجها به ناحیه شکست ٔ امواج ناپایدار می شوند. در نتيجه، اين امر، موجب ايجاد حباب در سطح آب و پاشش قطرات آب به فاز بخار می شود. این موضوع، سبب افزایش نرخ تبخیر در ناحیه III می گردد. در ناحیه II که شیب تغییرات کمتر از ناحیه III و بيشتر از ناحيه I مى باشد، با افزايش نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، سطح تماس آب و هوا و القای آشفتگی به لایه مرزی بخار افزایش می یابد و این موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می شود.

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

1 Breaking Zone



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



 $\left(\frac{Gr}{Re^{r}}=1/r, V=\cdot/9\frac{m}{s}\right)$ شکل ۶: اثر پارامتر سطح مواج بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت ترکیبی (Gr

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

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 مواج، برای رژیم همرفت ترکیبی $\left(\frac{V}{S}, V = \frac{v}{s} \right)$ را نشان میدهد. در بیشترین غیرمنتظره را میتوان ناشی از گردابههایی دانست که میتوانند در ترکیب خاصی از سرعت جریان هوا و پارامترهای سطح مواج در سمت باد پناه قله موج بوجود آیند. محققانی مانند سیمون [۱۰]، توسط تکنیکهای آزمایشگاهی پیشرفته توانستهاند این گردابهها را در سطوح مواج نمایش دهند. حبس رطوبت در این گردابهها و پایداری



 $(V = r^{m'_{s}}, V = ./\sqrt{m'_{s}})$ شكل ۷: مقايسه اثر پارامتر سطح مواج بر درصد افزايش نرخ تبخير و درصد افزايش مساحت براى رژيم همرفت تركيبى (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 ($V = 2^{m'_{s}}, V = 0.9^{m'_{s}}$)

۵-نتىجەگىرى

در این مطالعه با استفاده از اندازه گیریهای آزمایشگاهی در دامنه گستردهای از نسبت ارتفاع به دوره تناوب موج، دمای آب و سرعت هوا برای ۲۰۱ > $\frac{Gr}{Re^{r}}$ > ۲۰/۰۱ نرخ تبخیر از سطوح مواج آب، در رژیمهای همرفت طبیعی، ترکیبی و اجباری با هم مقایسه شده است. – نتایج اندازه گیری شده نرخ تبخیر برای سطوح مواج نشان میدهد نرخ تبخیردر این حالت بیشتر از سطوح بدون موج بوده و افزایش القای آشفتگی 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 آشفتگی به لایه مرزی بخار افزایش مییابد که این موضوع باعث افزایش نرخ تبخیر می شود اما در مقادیر $\frac{m}{s} > 1.0 \frac{H}{T}$ 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 می گردد.

- در رژِیمهای 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 $\left(\frac{\mathrm{m}}{T} = ./1 \Lambda \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$ ، 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 آشفتگی در لایه مرزی فاز گاز، در حدود پنج برابر در مقایسه با اثر افزایش مساحت، بر نرخ تبخیر تاثیر میگذارد.

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

در شکل ۸، اثر نسبت ارتفاع موج به دوره تناوب آن، بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت اجباری $\left(\frac{Gr}{Re^{v}} \le 0.06\right)$ 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 اندازه گیری شده، برازش گردیده است. همانند رژیمهای همرفت طبیعی و ترکیبی، وجود پاشش قطرات و ایجاد حباب در سطح آب، باعث افزایش نرخ تبخیر درناحیه III شده است. از طرفی، ناحیه II نیز رفتاری، مشابه رژیم های 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.



 $\left(\nu = \tau m'_{s}, \nu = \omega m'_{s} \right)$ شکل ۸: اثر پارامتر سطح مواج بر نرخ تبخیر در رژیم همرفت اجباری برای دو سرعت $\left(\nu = \tau m'_{s}, \nu = \omega m'_{s} \right)$ 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}

k

L

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 $\frac{m}{s} + H/T \le H/T \le \frac{m}{s}$ ، می توانمی تواند ، حبس رطوبت در گردابههای سمت باد پناه قله موج، می توانمی تواند موجب کندی نرخ افزایش و کاهش نرخ تبخیر گردد.

 $\frac{Gr}{Re^2}$ نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد با کاهش نسبت عدد - $\frac{Gr}{Re^2}$ در بازه $\frac{m}{s} < H/T \le H/T$ در بازه $\frac{m}{s}$ مراب میب 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 می گردد.

فهرست علائم

 $\left(rac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}
ight)$ شتاب گرانش g

ضريب انتقال جرم $g_{{}_{mH_2\!O}}$

عدد گراشف انتقال جرم *Gr_m*

(m) ارتفاع موج H

$$\left(rac{W}{mK}
ight)$$
ضریب هدایت حرارت

$$(m)$$
طول

$$egin{pmatrix} rac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^2\mathrm{h}} & ext{id} & rac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^2\mathrm{h}} \end{pmatrix}$$
نرخ تبخیر آب \dot{m}_e کسر جرمی بخار آب $m_{f\,H_{2}o}$

$$(Pa)$$
فشار بخار اشباع در سطح آب P_{H_2o}

(s)
$$z_{\alpha\alpha}$$
 (s) T

$$({
m K})$$
دمای سطح آزاد T_s

t

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. Zeghmati, 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.

- 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'Joen, 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

مراجع

This page intentionally left blank