

# تأثیر هندسه موانع بر روی تغییرات دمای سیال جاری در کانال روباز - بررسی تجربی و مدلسازی عددی

نادر رهبر<sup>۱\*</sup>، مهدی حمزه ای<sup>۲</sup>، سیاوش ضابطی جهرمی<sup>۳</sup>

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\* سمنان، صندوق پستی: ۱۷۹-۳۵۱۴۱، rahbar@semnaniau.ac.ir

## چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر قرار دادن موانع مختلف بر روی انتقال حرارت انجام شده بین آب و هوا در کانال روباز پرداخته شده است. برای این کار با قرار دادن ۷ مانع مختلف در آب، همچنین هوادهی در زیر آب و ایجاد جابجایی اجباری هوا بر روی آب، دمای ورودی و خروجی از کانال در ۱۱ دبی مختلف اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از آزمایشات نشان دهنده تأثیر مثبت قرار گیری مانع بر روی انتقال حرارت بین آب و هوا می‌باشند. در بین موارد فوق بیشترین انتقال حرارت برای جابجایی اجباری هوا از روی آب مشاهده گردیده است. همچنین در این تحقیق به مدلسازی عددی کانال روباز در نرم‌افزار فلونت و مقایسه نتایج حل با آزمایشات پرداخته شده است. نتایج نشان دهنده دقت حل عددی در مدلسازی جریان در کانال روباز می‌باشند.

## کلیدواژگان

کانال روباز، تأثیر مانع بر انتقال حرارت، افزایش ضریب انتقال حرارت، مدلسازی عددی

## Effect of Obstacles Geometry on Temperature Variations of a Flowing Fluid in an Open Channel - Experimental Investigation and Numerical Modelling

Nader Rahbar<sup>1\*</sup>, Mahdi Hamzei<sup>2</sup>, Siavash Zabeti-Jahromi<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

\* P.O.B. 123456789 Semnan, Iran, nrahbar@gmail.com

## Abstract

In this paper the effect of placing various obstacles on heat transfer between the air and water in an open channel was investigated. For this purpose, seven different obstacles were placed into the water while incorporating underwater aeration and forced air movement on the water, to measure input and output water temperatures at eleven different flow rates. The results indicated that placing an obstacle in the channel is associated with an increase in heat transfer from the water. Furthermore, the highest rate of heat transfer was achieved when there was a forced convection of air on water. Under natural convection, the highest rate of heat transfer was observed for the turbulent flow up to middle of the channel, while under forced convection, it was observed in forced air movement on water surface. Also in this research, open channel flow was numerically simulated in Fluent software via RSM model. A Comparison between the numerical results and experimental data may indicate the ability of Fluent software in accurate flow simulation in the open channel.

## Keywords

Open channel flow, Temperature variation, Heat transfer, VOF, obstacle geometries

موانع و یا تغییر سطح مقطع آن می‌باشد. با این کار تبدیل انرژی گرمایی به انرژی جنبشی و افزایش سطح تماس آب با هوا، باعث کاهش دمای آب خواهند گردید. در این راستا پژوهشهای بسیاری صورت گرفته است. فریز و همکاران [۱] به بررسی تجربی تأثیر جریان مغشوش فوق بحرانی بر روی انتقال حرارت کانال روباز پرداختند. در تحقیقی دیگر آنان [۲] گزارش نمودند که افزایش عدد فرود باعث افزایش انتقال حرارت در سطح آزاد کانال خواهد گردید. آقای وانگ و همکاران [۳] به بررسی انتقال حرارت در جریان توربولانس کانال با

## ۱- مقدمه

امروزه در صنایع مستقر در کنار رودخانه‌ها و آبهای آزاد، استفاده از آب برای خنک کاری فرایندهای صنعتی بسیار متداول می‌باشد. چون بازگرداندن آب گرم شده به طبیعت اثرات مخرب زیست محیطی را در بر خواهد داشت، باید با روشهای مناسب اقدام به خنک کاری مجدد آب نمود. با توجه به اینکه پروسه خنک کاری آب گرم به خصوص استفاده از چیلر یا پکیج های خنک کننده هزینه بر می‌باشد، تلاشهای بسیاری در زمینه دستیابی به روشهای جایگزین و کم هزینه صورت گرفته است. یکی از روشهای پیشنهاد شده تغییر هندسه کانال، قرار دادن

به منظور تحلیل جریان در کانال روباز، ابتدا کانالی با طول ۴/۵ متر و ارتفاع ۲۰cm توسط پیش پردازنده Gambit طراحی و در تعیین هندسه مسئله از شبکه بندی منظم چهار گوش مربع شکل در اندازه ۲mm استفاده شده است. شرط مرزی دیواره برای کف و توابع دیواره مختلفی در تحلیل میدان مد نظر بوده است. شرط مرزی فشار صفر در قسمت خروجی میدان جریان و قسمت فوقانی میدان جریان اعمال شده است. در قسمت ورودی آب و هوا شرط جریان جرمی ورودی مورد استفاده قرار گرفته است. دبی جرمی ورودی در این حالت با بیشترین دبی جرمی آزمایش کانال عادی و در قسمت ورودی هوا، دبی صفر اعمال شده است.

در حل میدان جریان به منظور تعیین سطح آزاد از روش VOF و الگوی ضمنی<sup>۲</sup> استفاده شده است. همچنین در نرم افزار فلوئنت (نسخه 6.3) گزینه ی جدید با نام کانال روباز<sup>۳</sup> در قسمت چندفازی وجود دارد که فعال گشته است. برای مرز ورودی جریان مقدار ارتفاع آب داده شده و برای مرز خروجی از حالت فشار نسبی استفاده شده است. به منظور تحلیل میدان جریان، پارامترهای آشفتگی براساس مقادیر سرعت معین شده، در نهایت جریان در حالت آشفتگی با اعمال شرایط مرزی مناسب و سایر پارامترهای آشفتگی حل گردیده است.

با استفاده از حالت های مختلف تابع دیواره و مشاهده نتایج، تفاوتی در کانتورهای مختلف دیده نشده و بنابراین تابع دیواره استاندارد به عنوان انتخاب معمول خود برنامه مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین مشاهده نتایج این امر را روشن می سازد که حساسیت نتایج به نوع مدل آشفتگی بسیار بیشتر است. از میان مدل های مختلف آشفتگی همانگونه که سایر تحقیقات نشان داده اند به ترتیب مدل های RNG, Realizable, RSM و استاندارد به ترتیب نتایج بهتری در مورد کانال روباز بدست می دهند. در اینجا برای رسیدن به دقت بیشتر، از مدل RSM (مدل تنش رینولدز) استفاده شده است. در انفعال معادلات حاکم و آشفتگی بنابر پیشنهاد خود نرم افزار برای مدل VOF، از روش پرستو<sup>۴</sup> برای فشار استفاده شده است. برای سایر معادلات از روش بالادست<sup>۵</sup> مرتبه اول و برای کوپل کردن میدان سرعت و فشار از الگوی پیرو<sup>۶</sup> بهره گرفته شده است.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- بررسی تجربی

پس از انجام آزمایشات نتایج در ابتدا به دو دسته خنک کاری طبیعی و خنک کاری اجباری دسته بندی شده و در انتها به مقایسه دو دسته فوق با یکدیگر پرداخته شده است. شکل های ۱ و ۲ نمودار اختلاف

استفاده از مدل مغشوش LES پرداختند. در این زمینه علاوه بر موارد فوق می توان به کارهای ابدو [۴]، کیم [۵] و سارکر [۶] نیز اشاره نمود.

در این مقاله با قرار دادن موانع مختلف به بررسی تجربی میزان انتقال حرارت از داخل کانال پرداخته و تاثیر قرار گرفتن هریک از موانع نسبت به حالت بدون موانع مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها با مدلسازی کانال روباز در نرم افزار فلوئنت به مقایسه نتایج حل عددی با آزمایشگاهی خواهیم پرداخت.

#### ۲- روش انجام آزمایشات

مجموعه آزمایشگاهی مورد نظر از یک سیستم راه اندازی کانال باز که با یک آبگرمکن سری شده، تشکیل شده است. این سیستم متشکل از یک پمپ و یک شیر کنترل دبی، مخزن فرعی، مخزن اصلی و کانال روباز می باشد. مخزن فرعی برای اندازه گیری دبی به کار می رود. آبگرمکن سری شده در مجموعه جهت بالا بردن دمای آب هنگام آزمایشات می باشد و یک پمپ فرعی آب مخزن را به درون آبگرمکن فرستاده و آب گرم خروجی دوباره وارد مخزن اصلی می شود. یک شیر بعد از پمپ اصلی قرار داده شده است و به کمک باز و بسته کردن آن میزان آب ورودی به کانال تنظیم می شود. سیستم طوری تنظیم گردیده است که دمای آب در ۴۰ درجه سانتیگراد ثابت بماند. کانال به طول ۴/۵ متر و عرض ۸ سانتی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی متر بوده و دیواره های آن از جنس پلکسی گلس می باشد.

وسیله اندازه گیری دما، دماسنج تستو ۶۵۰ با ترموکوپل Pt100 RTD می باشد که دارای تفکیک پذیری<sup>۱</sup> ۰/۱ درجه سانتیگراد است. با قرار دهی این دماسنج در ابتدا و انتهای کانال، بعد از ثابت شدن دما در یک محدوده خاص، این دمای میانگین خوانده می شود. دمای هوا در طول آزمایشات اندازه گیری شده است که البته چون محیط بسته می باشد مقدار آن در یک محدوده مشخص تقریباً ۲۴ درجه سانتیگراد ثابت می ماند.

برای شروع آزمایش در ابتدا اطلاعات مورد نظر از کانال عادی بدون موانع خوانده شده و سپس موانع مختلف ذکر شده به ترتیب در کانال قرار گرفته و در ۱۱ دبی مختلف اطلاعات حاصل از انجام آزمایش شامل دمای ورودی آب به کانال، دمای خروجی آب از کانال، دبی آب ورودی، ارتفاع آب در کانال و دمای هوای محیط ثبت گردیده اند. موانع قرارگرفته در کانال عبارتند از: دریچه کشویی، سرریز، سرریز به همراه پله و شیب مثلثی. همچنین با برداشتن آرام کننده های ابتدای کانال، تاثیر توربولانس بودن جریان در کل و نیمی از کانال، بر روی انتقال حرارت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در حالتی دیگر با قراردادی فینهای مسی و گالوانیزه، هوادهی در آب و ایجاد جریان هوا از روی سطح آب کانال تاثیر هر یک از عوامل ذکر شده نیز بر روی انتقال حرارت بررسی شده است.

#### ۳- مدل سازی هندسی

<sup>2</sup> Implicit

<sup>3</sup> open channel

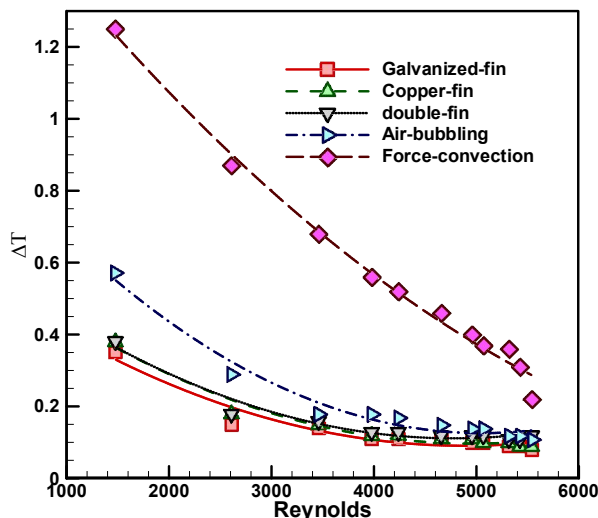
<sup>4</sup> Presto

<sup>5</sup> Upwind

<sup>6</sup> Piso

<sup>1</sup> Resolution

- هر یک از چهار حالت ذکر شده به این دلیل تأثیر بیشتری در کاهش دما دارند که باعث اختلاط بهتر و بیشتر آب و هوا می‌شوند. از طرفی در حالت توربولانس تا میانه کانال به این دلیل نسبت به سایر حالات تأثیر بیشتری دارد چرا که تا میانه کانال حالت توربولانس و اختلاط با هوا وجود دارد واز میانه تا انتها با وجود آرام‌کننده‌ها، سرعت جریان کم شده و تبادل بین هوا و آب بیشتر می‌شود. نکته قابل توجه این است که هرچه اختلاط هوا و آب بیشتر باشد، نوع خنک‌کاری مؤثرتر خواهد بود و این امر در حالت توربولانس نسبت به سرریز دیده می‌شود. اختلاط بعد از خنک‌آب: لوله، ابتدا، کانال، به علت عدم



شکل ۳ - نسبت دمای ورودی و خروجی بر حسب عدد رینولدز در جابجایی اجباری

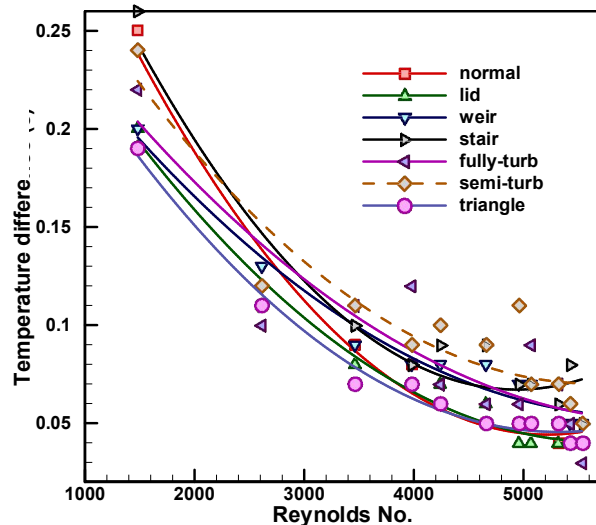
همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد، در حالت جابجایی اجباری بیشترین انتقال حرارت در حالت جابجایی اجباری هوا بر روی آب مشاهده گردیده است. این امر تأثیر سرعت هوای روی سطح را بر تبادل گرما بین دو سیال بیان می‌کند. بعد از حالت جابجایی اجباری، هوادهی درون آب بیشترین تأثیر را در خنک‌کاری آب درون کانال دارا می‌باشد چرا که حبابهای هوا در طول مسیر از زیر آب تا سطح کانال، مستقیم با آب در ارتباط بوده و تبادل گرما هر چه بهتر صورت می‌پذیرد. در بین دو حالت جابجایی طبیعی و اجباری نیز بیشترین انتقال حرارت در جابجایی اجباری مشاهده می‌شود.

#### ۴-۲- بررسی عددی

در این تحقیق همچنین با استفاده از نرم افزار فلونت به مدلسازی جریان در کانال روباز در سه حالت بدون مانع، با دریچه و با پله پرداخته شده و توانایی نرم افزار در مدلسازی جریان در کانال روباز با استفاده از نتایج تجربی سنجیده شده است. شکلهای ۴ و ۵ کانتور سرعت را برای جریان گذرنده از زیر دریچه و روی پله نشان می‌دهند.

دمای ورودی و خروجی بر حسب عدد رینولدز را برای دو دسته فوق نشان می‌دهند. همانطور که از شکلهای پیداست در تمامی حالتها با افزایش عدد رینولدز که به علت افزایش دبی آب ورودی می‌باشد، چون زمان انتقال حرارت آب با هوا کم می‌شود، اختلاف دمای آب ورودی و خروجی کانال نیز کم خواهد شد. این در حالیست که در اکثر موارد انتقال حرارت به علت افزایش دبی بیشتر خواهد بود. (شکل ۳)

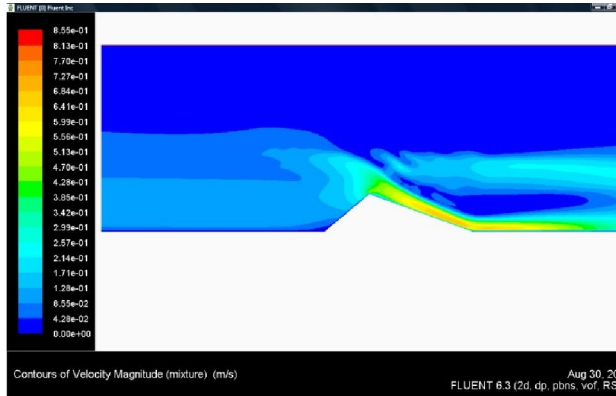
نتایج حاصل از آزمایشات همچنین نشان می‌دهند که در حالت جابجایی طبیعی بیشترین انتقال حرارت برای حالتی است که در آن تا میانه کانال بر اثر توربولانس سطح تماس آب با هوا بیشتر و از میانه به بعد به علت وجود آرام‌کننده‌ها زمان انتقال حرارت آب با هوا زیادتیر است. بعد از آن، حالت سرریز به همراه پله و حالت سرریز بیشترین کاهش دما در طول کانال را ایجاد کرده‌اند و سپس حالت توربولانس کامل در کانال مطرح می‌شود. نکته قابل ذکر این است که نسبت به حالت عادی و بدون هیچ تغییر فیزیکی، این چهار حالت میانگین گرمای مبادله شده بیشتری دارند. بدین ترتیب که درصد گرمای تبدالی نسبت به حالت عادی برای توربولانس تا میانه ۲۸٪ و در استفاده از سرریز و پله ۲۳٪ و سرریز ۲۲٪ و توربولانس کامل ۱۳٪ افزایش داشته است. این میزان، با استفاده از، درجه ۸ و ۹ به مثلاً، ۹٪ با کاهش



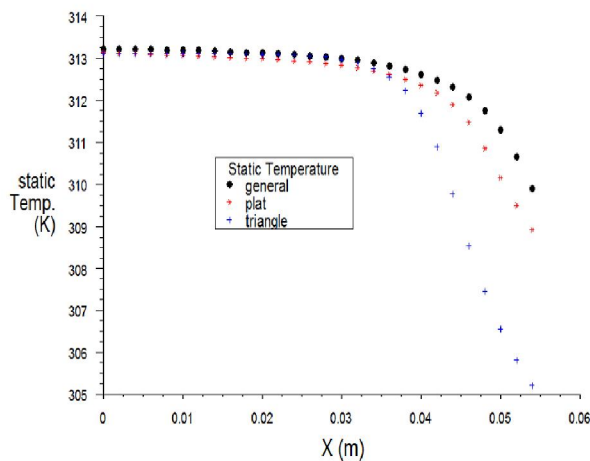
شکل ۴ - نسبت دمای ورودی و خروجی بر حسب عدد رینولدز در جابجایی طبیعی

لذا قرار دادن دریچه کشویی و پله مثلثی نه تنها اثر مثبتی نسبت به حالت عادی بر کاهش دما نداشته بلکه اثر عکس گذاشته و کاهش دما را کمتر می‌کنند. برای توجیه این مشاهدات و نتایج می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- قرار دادن دریچه کشویی و پله مثلثی هر دو باعث بالا رفتن سرعت آب جاری در کانال می‌شوند و لذا این افزایش سرعت، کاهش تبادل گرما بین هوا و آب را به همراه داشته و نسبت به حالت عادی کاهش دمای کمتری را شاهد هستیم.



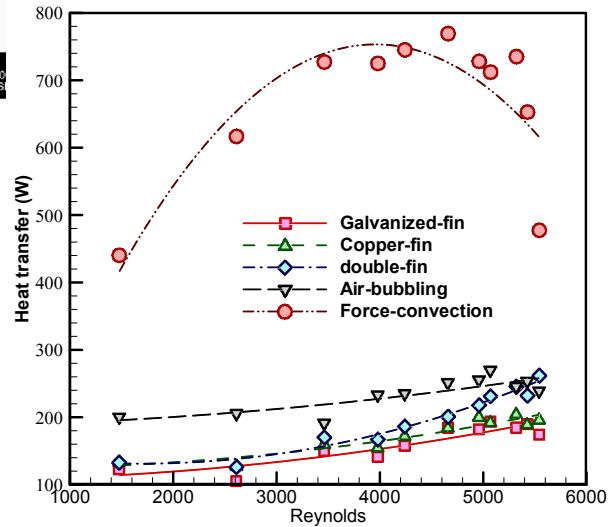
شکل ۵ نمودار کانتور سرعت جریان گذرنده از روی پله



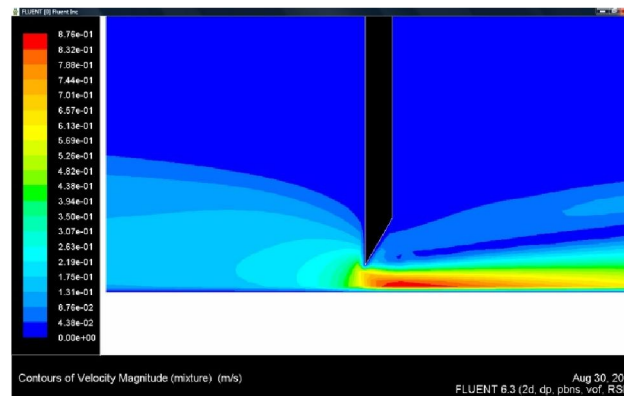
شکل ۶ نمودار دمای استاتیک بر حسب ارتفاع از کف کانال در خروجی از کانال

جدول ۱ نتایج حاصل از حل عددی با نرم‌افزار فلوئنت و نتایج حاصل از آزمایش در کانال روباز در سه حالت کانال عادی، کانال با دریچه و حالت کانال با قرار دادن شیب مثلثی را با یکدیگر مقایسه نموده است. همانطور که از نتایج جدول مشخص است، حل عددی مورد نظر قادر است با دقتی بسیار خوب دمای خروجی از کانال را در سه حالت ذکر شده محاسبه نماید. همچنین مشاهده می‌شود که در هر سه حالت ذکر شده، دمای پیش‌بینی شده در حل عددی کمی پایینتر از نتایج آزمایش است. این بدان معنی است که حل عددی افت دما را بیشتر پیش‌بینی می‌کند. علت این امر آنست که فرضیات استفاده شده در مدل کمی با واقعیت متفاوت است. به عنوان مثال در حل عددی برای ورودی هوا شرط مرزی فشار ورودی در نظر گرفته شده است در حالی که در واقعیت و در آزمایش در این مکان دیواره کانال وجود دارد.

شکل ۶ نمودار دمای استاتیک بر حسب ارتفاع از کف کانال در خروجی برای سه مدل نام برده شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تقریباً تا ارتفاع  $y = 0.035m$  کاهش دما برای سه حالت تقریباً یکی است، هرچند استفاده از دریچه کاهش دمای بیشتری نسبت به سه حالت دیگر دارد. اما از  $y = 0.035m$  به بالا، افت دمای حالت مانع مثلثی، به شدت زیاد شده و بیش از دو برابر افت دمای حالت‌های دیگر



شکل ۷ نمودار انتقال حرارت بر حسب رینولدز در حالت‌های تجربی



شکل ۴ نمودار کانتور سرعت جریان گذرنده از زیر دریچه

جدول ۱ مقایسه نتایج حل عددی با آزمایش

نوع کانال	دمای ورودی $^{\circ}K$	دمای خروجی حل عددی $^{\circ}K$	دمای خروجی آزمایش $^{\circ}K$	خطای عددی نسبت به آزمایش %
عادی	۳۱۳/۴	۳۱۲/۷	۳۱۳/۳	۰/۲
با دریچه	۳۱۳/۴۲	۳۱۲/۴	۳۱۳/۴	۰/۳
با شیب مثلثی	۳۱۳/۴۵	۳۱۱/۷	۳۱۳/۳	۰/۵

#### ۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر قرار دادن موانع مختلف در کانال روباز بر روی انتقال حرارت بین آب و هوا پرداخته شده است. نتایج حاصل از آزمایشات نشان می‌دهند که با قرار دادن مانع در کانال انتقال حرارت از آب افزایش می‌یابد. این در حالی است که اگر جابجایی هوا از روی آب به صورت اجباری باشد انتقال حرارت در بیشترین مقدار خود خواهد بود. در جابجایی طبیعی بیشترین انتقال حرارت برای جریان توربولانس تا میانه کانال و در جابجایی اجباری بیشترین انتقال حرارت در مدل جابجایی اجباری هوا از روی آب مشاهده گردید. همچنین در این تحقیق به مدلسازی عددی جریان در کانال روباز با نرم افزار فلوئنت و مدل RSM پرداخته شده است. مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با آزمایشات نشان دهنده قدرت نرم افزار فلوئنت در مدلسازی دقیق جریان در کانال روباز می‌باشد.

#### ۶- مراجع

- [1] B. Freeze, M. Dagher, T. Sketchley, N. Morley, S. Smolentsev, M. Abdou, FliHy experimental facilities for studying open channel turbulent flows and heat transfer, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 63-64, pp. 391-395, 2002.
- [2] B. Freeze, S. Smolentsev, N. Morley, M. Abdou, Characterization of the effect of Froude number on surface waves and heat transfer in inclined turbulent open channel water flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 20, pp. 3765-3775, 2003.
- [3] L. Wang, Y.-H. Dong, X.-Y. Lu, An investigation of turbulent open channel flow with heat transfer by large eddy simulation, *Computers & Fluids*, Vol. 34, No. 1, pp. 23-47, 2005.
- [4] S. Smolentsev, M. Abdou, N. Morley, A. Ying, T. Kunugi, Application of the "k-[var epsilon]" model to open channel flows in a magnetic field, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 40, No. 6, pp. 693-711, 2002.
- [5] H.-M. Kim, K.-Y. Kim, Design optimization of rib-roughened channel to enhance turbulent heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 23, pp. 5159-5168, 2004.
- [6] A. Sarker, D. G. Rhodes, 3D free surface model of laboratory channel with rectangular broad-crested weir, *Proceedings of the 28th IAHR Congress*, pp. 7, 1999.