

## شبیه سازی عددی تهویه و سرمایش ساختمان با استفاده از ترکیب بادگیر و دودکش خورشیدی (دیدگاه دیفرانسیلی و دو بعدی)

ولی کلاتر

دانشکده مکانیک، دانشگاه یزد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۳/۲۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۷/۳/۱۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۴/۷

**چکیده** در حال حاضر در کشور ایران حدود چهل درصد از کل مصرف انرژی مربوط به بخش ساختمان می گردد که مقدار قابل توجهی از آن صرف گرمایش و سرمایش آن می شود؛ در نتیجه علاوه بر مصرف بی رویه سوخت های فسیلی، آلودگی محیط زیست را نیز به همراه دارد. در این مقاله جهت صرفه جویی در مصرف سوخت و کاهش مشکلات زیست محیطی با ارائه ایده استفاده از انرژی خورشیدی جهت به حرکت درآوردن خود به خودی هوا در داخل ساختمان توسط دودکش خورشیدی و استفاده از گرمای نهان تبخیر آب جهت ایجاد سرمایش که در بالای یک بادگیر انجام می گیرد بدون استفاده از نیروی محرکه یا مصرف سوخت های فسیلی می توان در مناطق گرم و خشک محیطی مطبوع با دمای مناسب و رطوبت لازم فراهم نمود، برای این منظور با معرفی ناحیه محاسباتی به صورت دو بعدی و به کارگیری معادلات حاکم بر جریان مغشوش و اعمال روش های عددی مناسب نتایج مطلوبی حاصل شده است.

واژه های کلیدی تهویه، بخار آب، جریان باد، سرمایش طبیعی، شناوری.

## Numerical Simulation of Natural Ventilation and Cooling a Building by combined windtower and Solar Chimney

V. Kalantar

Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran

**Abstract** In the present study, an attempt is made to study the cooling performance of a wind tower and a solar chimney in a hot and dry region. Also in this study the effects of parameters including wind tower height, variety of the materials used in the wind tower walls, the amount of vaporized water, the temperature of input and output air, the wind velocity and the relative humidity were investigated. Furthermore, to develop, a natural flow of air, for days without blowing a wind the role of solar chimney was considered. Finally, to investigate and take information about streamlines of airflow in wind tower (Baud-Geer), velocity, pressure, humidity, temperature and density profile of fluid, Fluent software is applied to evaluate the air flow in the wind tower in differential view for two dimensional and steady state conditions with water spraying at the top of wind tower. The results indicate that the evaporative cooling is very effective in a hot and dry region. The temperature decreases considerably, if the wind towers are equipped with the water vaporization system. This causes the air becomes heavier and a natural motion of air through downside of wind tower to be produced.

**Keywords** Ventilation, Water vapor, Wind blowing, Natural Cooling, Airflow.

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: دانشکده مکانیک، دانشگاه یزد.

تلفن: -، دورنگار: -، پیام نگار: v.kalantar@yazduni.ac.ir

## ۱- مقدمه

خودبخودی ساختمان‌ها بدون استفاده از انرژی‌های فسیلی بیفتند. در این راستا بناهای برج مانند باریک و بلند چهار پهلو و شش پهلو یا هشت پهلو به نام بادگیر [۲] را ساخته است. این سازه‌ها بر فراز بام‌ها احداث می‌شوند که در عین زیبایی و زینت بخشیدن به ساختمان نقش تهویه خودبخودی فضای داخل آن را نیز به عهده دارند. امروزه به دلیل مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی و افزایش چشمگیر آلودگی محیط زیست فکر بازسازی و احیاء و برطرف نمودن معایب بادگیرهای سنتی معقول و منطقی به نظر می‌رسد. از طرفی در این مناطق تعداد ساعات آفتابی در طول سال زیاد بوده می‌توان از این تابش خورشید به عنوان یک منبع انرژی پاک استفاده نموده و با احداث دیوارهای ترومبی یا دودکش خورشیدی جریان خودکار هوا را داخل ساختمان برقرار نماییم. در داخل بادگیر با ایجاد شناوری منفی (هوای سرد و سنگین) جریان هوا به سمت پایین و در داخل دیوار ترومبی (دود کش خورشیدی) با گرم شدن هوا شناوری مثبت به وجود آمده هوا به سمت بالا به حرکت در می‌آید، با قراردادن سیستم‌های تبخیری مناسب در محل ورود هوا به داخل بادگیر نظیر شکل ۱ می‌توانیم فضای مطبوع و راحتی را در داخل از نظر دما و رطوبت به وجود آوریم [۳]. در این مقاله در نظر است به روش عددی ضمن به کارگیری معادلات حاکم بر حرکت سیال در حالت دوبعدی و دائم، اثرات سرعت و جهت باد، دمای هوا، ارتفاع بادگیر، جنس آن و نقش رطوبت ناشی از اضافه نمودن پاشش آب در مسیر حرکت هوا در عملکرد سرمایشی ساختمان مطالعه گردد و تأثیر دودکش خورشیدی و دبی هوای در گردش ایجاد شده توسط آن مورد ارزیابی قرار گیرد و سرانجام با ارائه راهکارهای مناسب زمینه استفاده مجدد این سازه‌ها در معماری جدید فراهم شود، گفتنی است در این راستا مقدار قابل توجهی در مصرف انرژی صرفه جویی به عمل می‌آید.

دورنمایی از اتمام ذخایر فسیلی جهان در طی چند دهه آینده و همچنین موضوع جهانی شدن و به دنبال آن افزایش رقابت بین کشورهای جهان باعث شده است تا بهینه‌سازی مصرف انرژی، به عنوان یک سیاست استراتژیک از سوی اقتصاددانان و دولتمردان کشورهای جهان مطرح گردد و با اختصاص بودجه‌هایی که صرف تحقیقات و پژوهش در زمینه جایگزین کردن انرژی‌های نو بجای سوخت‌های فسیلی می‌شود، هر ساله روش‌های جدیدی برای بهینه‌سازی انرژی در جهان مطرح می‌شود. در سال‌های اخیر، بحث استفاده از انرژی‌های نو جهت گرمایش و سرمایش ساختمان، نظر مهندسی و معماران را به خود معطوف ساخته است. با توجه به این موضوع که بخش وسیعی از کشور در ناحیه آب و هوایی گرم قرار دارد، اجرای روش‌های مناسبی جهت کاهش هزینه‌های سرمایش ساختمان قابل تأمل است. با توجه به اقلیم بیابانی شهرهای کویری نظیر یزد و داشتن تابستان‌های طولانی و گرم و خشک، به کارگیری اصول بهینه‌سازی انرژی در ساختمان ضروری است. مقاله حاضر، به طراحی یک ساختمان با سیستم سرمایشی طبیعی (استفاده از انرژی باد و خورشید) در شهرهای کویری می‌پردازد [۲ و ۱]. نتایج جالب به دست آمده حاکی از آن است که می‌توان هزینه اولیه جهت به کار بستن اصول بهینه‌سازی انرژی در ساختمان را در سال‌های بعد از طریق کاهش هزینه در مصرف سوخت و یا برق جبران نمود و با دیدی حساب شده، می‌توان ساختمان‌سازی متکی به رعایت اصول بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان را از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه دانست. گرمای طاقت فرسای تابستان در مناطق کویری ایران و عدم دسترسی راحت به منابع انرژی ناشی از سوخت‌های فسیلی در گذشته باعث شده که انسان به فکر تهویه طبیعی و

هوای خشک در هر گره، جرم حجمی کل و یا جزءهای بخار آب و هوای خشک قابل محاسبه می‌باشد [۵ و ۷].

### معادلات مومتم

معادله متوسط گیری شده ناویر استوکس و حاکم بر جریان خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i' u_j'}) + f_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

عبارت  $\overline{\rho u_i' u_j'}$  معرف تنش‌های رینولدز می‌باشد که در ارتباط با نوسانات سرعت حول مقدار متوسط با به کارگیری فرض بوزینسک حاصل شده است و  $F_i$  معرف نیروی وزن سیال در جهت مورد نظر می‌باشد [۴].

### معادله انرژی

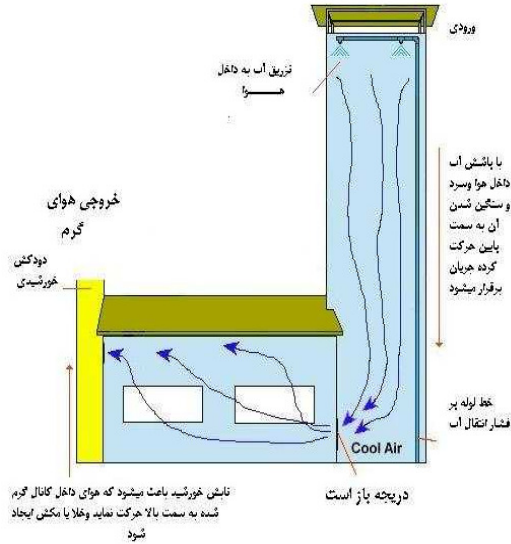
جهت محاسبه توزیع دما در داخل ساختمان به معادله انرژی نیاز می‌باشد که عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\lambda + \frac{c_p \mu_i}{Pr_i}) \frac{\partial T}{\partial x_i}] - \sum_i h_i J_i + S_h \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این معادله  $E$  عبارت است از:

$$E = \sum_i h_i Y_i + \frac{u^2}{2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$\lambda$  ضریب هدایت حرارتی سیال و  $J_i$  شار نفوذی جزء  $Z$  می‌باشد و  $S_h$  مربوط به هرگونه چشمه انرژی است.



شکل ۱. طرح اولیه به منظور تهیه طبیعی.

## ۲- معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال در داخل ساختمان به عنوان حجم کنترل یا ناحیه محاسباتی عبارتند از:

### معادله بقاء جرم

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m \quad \text{رابطه (۱)}$$

$S_m$  عبارت چشمه می‌باشد که از جریان اصلی حذف یا اضافه می‌گردد و در ارتباط با پدیده تبخیر آب یا چگالش آن می‌باشد [۴]. در رابطه فوق  $\rho$  جرم حجمی هوا می‌باشد که در ورود کمترین مقدار را دارد و با پاشش آب داخل آن افزایش می‌یابد و باعث سنگین شدن آن می‌گردد، این پدیده مطلوب بوده، یک نوع شناوری منفی ایجاد گردیده، باعث می‌گردد هوای سنگین به سمت پایین به حرکت درآید. با محاسبه رطوبت مطلق و همچنین فشار کل و فشار جزئی بخار آب و

### معادله انتقال

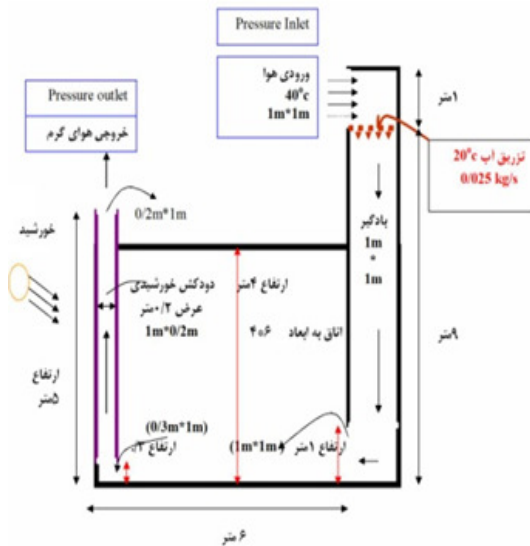
معادله انتقال برای بخار آب و پاشش آن داخل هوا

عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho Y_{H_2O} u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\rho D_{H_2O} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial x_j} \right] + S_{H_2O} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در  $S_{H_2O}$  ارتباط با مقدار آبی است که به جریان اصلی

اضافه (ناشی از تبخیر) یا کسر (ناشی از تقطیر) گردد.  $D_{H_2O}$  ضریب نفوذ بخار آب به داخل هوا می باشد که  $2.88 \times 10^{-5}$  مجذور متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.  $Sc_t$  عدد بدون بعد اشمیت مغشوش نام دارد که حدود ۰/۷ است.

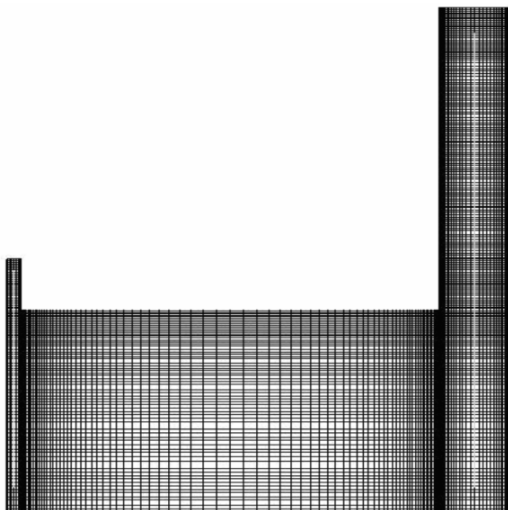


شکل ۲. نمایش هندسه و کلیات صورت مسئله به عنوان یک حجم کنترل.

### ۳- معرفی روش عددی انتخاب شده، شبکه

#### محاسباتی و شرایط مرزی

جریان در داخل حجم کنترل مغشوش و بر اساس مدل  $k-\epsilon$  با الگوریتم Simple حل گردیده است. نرم افزار مورد استفاده Fluent 6.1 بوده که شبکه انتخابی و شرایط مرزی بر اساس شکل های ۲ و ۳ می باشد. مطابق شکل ۲ کل دیواره عایق انتخاب شده اند و در داخل دودکش خورشیدی دیواره سمت راست با دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد و دیواره سمت چپ (شیشه) دمای آن ۳۵ درجه سانتیگراد انتخاب شده است. در مورد شبکه انتخابی به گونه ای اندازه ها و تعداد گره ها انتخاب شده است که حل مستقل از شبکه گردد و دقت محاسبات تا ۰/۰۰۰۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است. زمان اجرای برنامه برای رسیدن به دقت فوق با توجه به گستردگی شبکه (شکل ۳) و ریز بودن ابعاد آن با یک کامپیوتر معمولی طولانی



شکل ۳. شبکه انتخاب شده برای حل عددی.

## ۴- نتیجه گیری

مطابق با نتایجی که از اجرای برنامه در حالت‌های مختلف به دست آمده است ملاحظه می‌گردد که اضافه نمودن آب در مسیر حرکت هوا تأثیر به سزایی روی کمیت‌های مختلف از جمله دما، رطوبت نسبی، سرعت سیال، جرم حجمی و غیره می‌گذارد؛ مثلاً مقدار دما نظیر شکل‌های ۴ و ۵ به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد و رطوبت نسبی یا جرم حجمی سیال نظیر شکل ۶ افزایش می‌یابد که برای شرایط آب و هوایی شهرهای گرم و خشک نظیر یزد هر دو مناسب می‌باشد؛ چنانچه دیوارهای بادگیر عایق فرض گردند دمای هوا در محل خروجی بیشتر کاهش می‌یابد. نتایجی که از اجرای نرم افزار Fluent حاصل شده است؛ با نتایج به دست آمده از آزمایش هماهنگی دارد [۶]. مطابق با استاندارد تهویه مطبوع که توصیه می‌کند در داخل ساختمان دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد باشد [۷]. نتایج نشان می‌دهند که با مصرف معقول مقداری آب (۳۳ لیتر در ساعت) و در نظر گرفتن دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای صفحه داغ دودکش خورشیدی که به راحتی به وجود می‌آید. دبی حجمی هوای عبوری از دودکش در یک ساعت ۲۰۰۰ مترمکعب شده که جوابگوی تهویه و تأمین سرمایش ساختمانی با زیربنایی در حدود ۱۲۰ متر مربع بدون مصرف برق یا سوخت یا نیروی محرکه می‌باشد (تأمین مقدار اندک برق برای پمپ سیرکولاسیون آب توسط انرژی خورشیدی امکان پذیر می‌باشد).

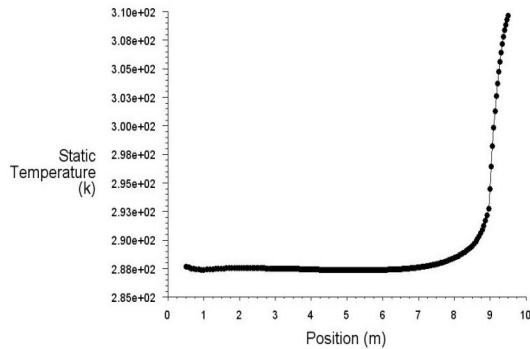
در شکل ۷ دما هوا در مجاورت کف اتاق رسم گردیده که مقدار پایینی می‌باشد و در واقع کارایی این روش را می‌رساند، می‌توانیم مقدار تزریق آب به داخل هوا را کاهش دهیم تا رطوبت نسبی داخل اتاق زیر ۵۰ درصد باشد.

مطابق با شکل ۸ که از اجرای برنامه در حالت‌های مختلف به دست آمده، این نتیجه حاصل می‌گردد که هرچقدر مقدار آب تزریقی افزایش یابد دمای آب بیشتر کاهش یافته تا جایی که حالت اشباع حاصل گردد در این صورت دیگر آب تبخیر نگردیده اضافه کردن آب تأثیری ندارد و به صورت مایع اطراف دیواره‌ها و ته بادگیر جمع می‌گردد پس می‌توان به راحتی دما و رطوبت کافی مطابق با شرایط استاندارد تهویه مطبوع [۷] در داخل ساختمان را تأمین نمود. برای حالت اجرا شده ورود گرما به داخل فضای بادگیر لحاظ گردیده اگر دیواره‌ها به گونه‌ای عایق باشند میزان مصرف آب به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. هر چقدر ارتفاع بادگیر بیشتر باشد سرعت باد در محل ورودی بادگیر بیشتر شده عملکرد را افزایش می‌دهد، همچنین اثر شناوری منفی به واسطه هوای سنگین نیز افزایش یافته جریان قوی‌تری از مخلوط هوا و بخار آب به سمت پایین خواهیم داشت. جنس مصالح بادگیر جهت ذخیره انرژی داخل خود اهمیت دارد در روز دیواره‌ها حرارت را در خود ذخیره نموده و در شب آزاد می‌کنند، در نتیجه هوا داخل آن به سمت بالا به حرکت در می‌آید و حالت مکش به وجود می‌آید؛ به عبارت دیگر کوران طبیعی ایجاد می‌گردد که در تابستان چنین عملکردی خوشایند می‌باشد و همزمان عمل تهویه نیز صورت می‌گیرد.

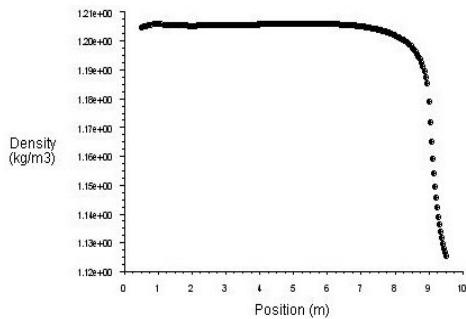
در داخل دودکش خورشیدی در اثر تابش خورشید به داخل آن و عبور از شیشه (دیواره سمت چپ) هوا گرم شده که به سمت بالا به حرکت در می‌آید و در واقع کار فن را انجام می‌دهد مطابق با شکل‌های ۹ و ۱۰ توزیع دما و سرعت ما بین دو دیواره مشاهده می‌گردد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نحوه شکل‌گیری جریان و بردارهای سرعت در مقاطع مختلف دیده می‌شود.

۱-۴- بررسی صحت و اعتبار کار انجام شده

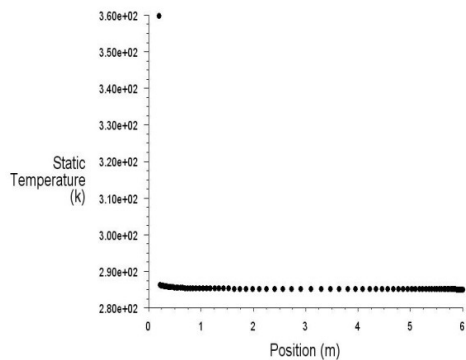
در ارتباط با صحت کار انجام شده می‌توان رفتار جریان را در قسمت بادگیر و قسمت دودکش خورشیدی با سایر کارهای تجربی و عددی انجام شده توسط دیگران مقایسه نمود. پدیده کاهش ناگهانی دما در بادگیر در نتیجه تبخیر آب، درخصوص یک بادگیر (حالت سه بعدی) با آزمایش انجام گرفته و نتایج حاصل شده، کار عددی انجام شده در این مقاله را تایید می‌کند [جزئیات در مرجع ۵ آمده است]؛ از طرفی طبق آزمایشات انجام گرفته توسط بوجیر [۸] در یک دودکش خورشیدی و همچنین کار عددی انجام شده توسط گان [۹] در این زمینه، برای این دو مورد که تحت شرایط یکسان می‌باشند برنامه اجرا گردیده و نتایج در شکل ۱۳ مقایسه گردیده است با توجه به خط‌هایی که در حین اندازه‌گیری و محاسبات بروز می‌کند، نتایج حاصل شده رضایت بخش می‌باشد. بلافاصله بعد از محل تزریق آب دمای هوا ناگهان کاهش یافته است.



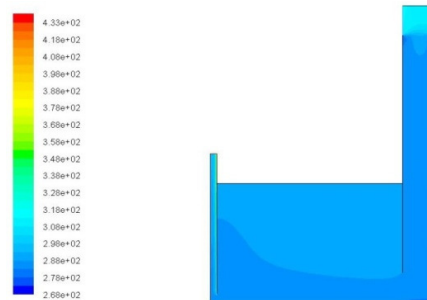
شکل ۵. تغییرات دمای هوا در بادگیر از بالا (۹متری سطح افق) تا پایین (نیم متری کف).



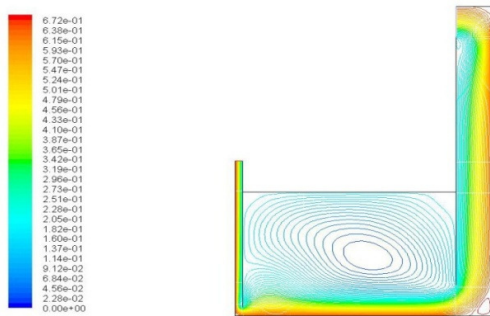
شکل ۶. تغییرات جرم حجمی هوا در داخل بادگیر.



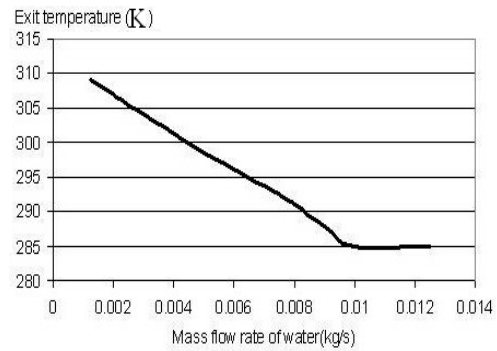
شکل ۷. توزیع دما داخل اتاق در مجاورت کف.



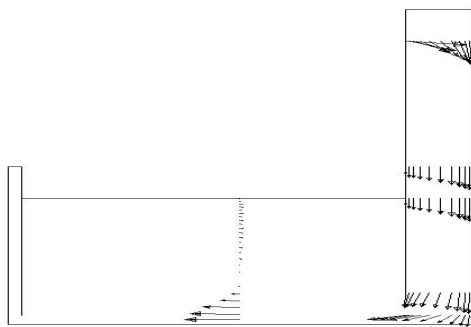
شکل ۴. کانتورهای دما در داخل ناحیه محاسباتی.



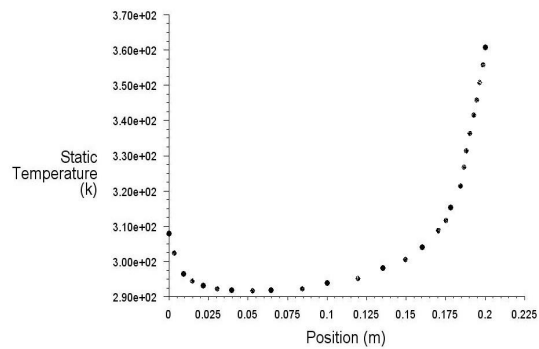
شکل ۱۱. نمایش خطوط جریان در داخل ناحیه محاسباتی.



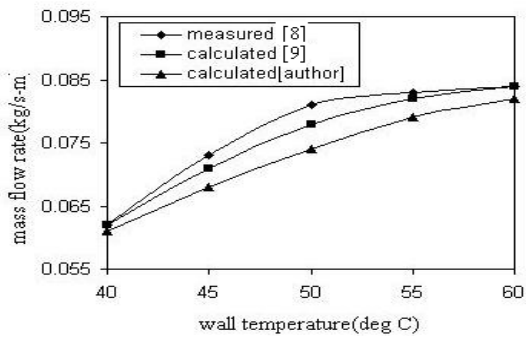
شکل ۸. ارتباط دمای خروجی از بادگیر با مقدار آب تزریق شده.



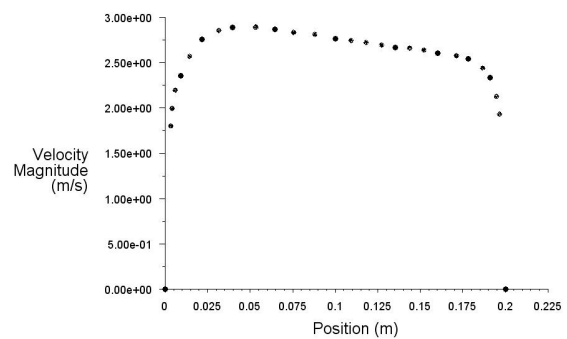
شکل ۱۲. نمایش بردارهای سرعت در مقاطع مختلف.



شکل ۹. توزیع دما مابین دو دیواره دودکش خورشیدی.



شکل ۱۳. مقایسه بررسی تجربی و عددی دبی جرمی در یک دودکش خورشیدی مورد آزمایش با ارتفاع ۲ متر و پهنای ۰/۱ متر (فاصله بین دو صفحه) و عرض دهانه ورودی ۰/۱ متر.



شکل ۱۰. توزیع سرعت مابین دو دیواره دودکش خورشیدی.

## فهرست علائم

$v$ : حجم مخصوص ( $\frac{m^3}{kg}$ )

اندیس‌های زیرنویس

$i, j$ : جهت‌های محورهای مختصات و اشاره به جزء  $i$  یا  $j$  ام

## مراجع

1. Bahadori, MN, "Passive cooling systems in Iranian architecture" *Scientific American*, pp.144-154, 1978.
2. Kalantar, V., "Natural ventilation the building with wind tower and renewable energy without using fuel oil", the third conference on fuel conservation in building, pp.1566-1577, 13-14 Mar. 2005.Tehran-Irans.
3. <http://www.i4at.org/lib2/aircool.htm>
4. User's Guide, FLUENT 6.1, 2000.
5. Kalantar, V., "Numerical simulation of cooling performance of wind tower (Baud-Geer) in hot and arid region", *Renewable Energy*, Vol 34, No. 1, Pages 246-254, January 2009.
6. Pearlmutter D., Etzion Y., Erell E., Meir I.A., Di H., "Refining the use of evaporation in an experimental down-draft cool tower," *Energy and Buildings*, Vol. 23, No. 3, pp. 191-197, 1996. PP.1.3-113, 1985.
7. Ashare Handbook, "Fundamentals", American Society of heating, refrigerating and air conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Georgia, 1981.
8. Bouchair, A, 1994. Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria. *Building Service, Engineering, Research and Technology* 15 (2): 81-93.
9. Gan, G.; Riffat, S.B. 1998. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery, *Applied Thermal Engineering* 18: 1171-1187.

$C_p$ : گرمای ویژه فشار ثابت ( $\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$ )

$D_{H_2O}$ : ضریب نفوذ مولکولی بخار آب داخل هوا ( $\frac{m^2}{sec}$ )

$f_i$ : نیروی حجمی خارجی در جهت  $i$  ام ( $\frac{N}{m^3}$ )

$h$ : آنتالپی محسوس ( $\frac{J}{kg}$ )

$J_j$ : شار نفوذی جزء  $j$  ام ( $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$ )

$K$ : انرژی جنبشی توربولانت ( $\frac{m^2}{sec}$ )

$RH$ : رطوبت نسبی

$S_m$ : منبع جرمی ( $\frac{kg}{s \cdot m^3}$ )

$S_{H_2O}$ : بخار آب اضافه شده یا گرفته شده از هوا ( $\frac{kg}{s \cdot m^2}$ )

$SC_t$ : عدد اشمیت توربولانت

$T$ : دما ( $^\circ K$ )

$Y_i$ : کسر جرمی جزء  $i$  ام

## حروف یونانی

$\lambda$ : ضریب هدایت حرارتی ( $\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$ )

$\mu$ : لزجت مولکولی (Pa.Sec)

$\mu_t$ : لزجت اعتشاشی (Pa.Sec)

$\rho$ : جرم حجمی ( $\frac{kg}{m^3}$ )