

## تحلیل عددی جریان جت‌های برخوردی برای کاهش دمای سطوح

زهرا پولایی موزیرجی (نویسنده مسئول)<sup>۱</sup>، ابراهیم خلیل زاده<sup>۲</sup>

استاد یار گروه مهندسی مکانیک، تهران Poolaei.iau@gmail.com

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد تهران شمال، تهران ebrahimkhalilzadeh@gmail.com

### چکیده

خنک کاری سطوح داغ در صنایع مختلف با جت‌های آب و هوا و بعضاً اسپری سیالات بی‌خطر و فراوان بسیار رایج است. اهداف خنک کاری سطوح دما بالا، افزایش عمر قطعات و راندمان عملکرد آن در یک سیستم مورد استفاده می‌باشد. بنابراین انجام کارهای تجربی و عددی این مدل از خنک کاری‌ها بسیار مورد توجه است. اما به دلیل فزونی هزینه‌های مالی در انجام تست‌های تجربی، روش‌های مدل سازی و عددی راه حل مناسبی بوده است. در این پروژه سعی شده است این مفاهیم خنک کاری با تکنیک‌های مختلفی بسط داده شود. سطوح دارای دمای بالا در طرحواره‌های مختلفی در صنایع وجود دارد. لذا مدل سازی سطوح منحنی و پیچیده توجه بیشتری داشته است. بنابراین با انتخاب هندسه انحنا دار از نوع مقعر و کاهش دمای دیواره آن، گام‌های مربوط به شبیه سازی مشخص شده است. لذا جهت بررسی اعتبار و صحت عملکرد نرم افزار تجاری فلونت، شبیه سازی یک هندسه دارای نتایج تجربی مورد انجام واقع شده است. در حل هندسه کانال تمام نتایج خروجی از نرم افزار با نتایج تجربی موجود و کار عددی منتظری و همکارانش مقایسه شده است. درصد خطاهای نتایج حل کمتر از ۵ درصد بوده است. لذا این اطمینان حاصل می‌شود که نرم افزار موجب از دقت خوبی برخوردار است. لذا برای ادامه کار مدل سازی خنک کاری سطح داغ انحنا دار انتخاب می‌شود. این هندسه در پروپزال نیز تشریح شده است. لذا برای حل و مدل سازی دو نوع سیال هوا و آب با سرعت‌های مختلف از جت استفاده می‌شود. با افزایش سرعت‌های جت برخوردی اعم از هوا یا آب، سطح وسیعی از دیواره منحنی خنک شده و این کاهش دما با افزایش سرعت جت یکنواخت بوده است. در ادامه کارهای شبیه سازی، حل جریان اسپری آب و برخورد آن به سطح داغ مقعر پرداخته شده است. هدف از این مدل سازی تکمیل تمام تکنیک‌های خنک کاری سطح داغ انحنا دار بوده است. در این مدل سازی کاهش دمای دیواره به مانند جریان جت برخوردی آب با سرعت ۱۶ متر بر ثانیه بوده است.

### واژه‌های کلیدی

خنک کاری، اسپری، جت و دما

## مروى بر کارهای انجام شده توسط دیگران

تاکنون مطالعات محدودی به صورت تجربی و عددی در این زمینه انجام شده است. زومبرون و عزیز [۳] برای اولین بار به صورت تجربی اثر جریان تناوبی را در انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت آبی نوسانی به یک سطح تخت با شار حرارتی ورودی ثابت بررسی کردند. شریف و زومبرون [۴] در یک مطالعه تجربی تأثیر دو نوع موج سینوسی و مربعی شکل را بر انتقال حرارت جابجایی در برخورد یک جت آبی به یک سطح تخت را بررسی کردند. آن‌ها کاهش عدد ناسلت محلی ناحیه سکون را در امواج سینوسی گزارش دادند. هافمن و همکاران [۵] به صورت عددی عملکرد سیزده مدل آشفتگی مختلف را در پیش‌بینی انتقال حرارت حاصل از برخورد جت پایا و نوسانی به یک سطح تخت بررسی کردند. آن‌ها در این تحقیق مدل  $k-\omega$ SST را به عنوان مدلی مناسب برای پیش‌بینی عدد ناسلت در ناحیه گذار از آرام به آشفتگی و در فواصل کوچک بین جت و سطح معرفی کردند. میوکانگستاپورن و همکاران [۶] در یک مطالعه عددی، افزایش انتقال حرارت برخوردی حاصل از یک جت نوسانی نسبت به نتایج جت پایا را گزارش دادند. در این محاسبات با ثابت فرض کردن عدد رینولدز (۷۸۰۰) نشان داده شد که با افزایش دامنه نوسانات و کاهش فاصله جت تا سطح برخورد، انتقال حرارت برخوردی افزایش می‌یابد. همچنین در این تحقیق تأثیر دمای محیط به واسطه جریان برگشتی بر میزان انتقال حرارت بررسی شده است. بیهرا و همکاران [۷] انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت هوای نوسانی به یک سطح تخت را به صورت عددی بررسی کردند. در این مطالعه با استفاده از تغییرات پارامترهایی مانند عدد رینولدز جت، شکل امواج نوسانی، فرکانس نوسانات و فاصله جت تا سطح برخورد، نشان داده شده است که در صورت استفاده از نوسان‌های مربعی شکل، توزیع عدد ناسلت در ناحیه برخورد و ناحیه جت دیواره به ترتیب ۱۲٪ و ۳۵٪ در مقایسه با حالت پایا افزایش می‌یابد. این در حالی است که میزان این تغییرات به ازای نوسانات سینوسی به ترتیب ۵٪ و ۱۰٪ محاسبه گردیده است. لیوکانگستاپورن و همکاران [۸] در ادامه تحقیقات‌شان تأثیر تغییرات نسبت دامنه سرعت بر انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت شیاری نوسانی محدود به یک سطح تخت را بررسی کردند. در این تحقیق نشان داده شده است که در سرعت‌های یکسان، با افزایش دامنه سرعت، میزان متوسط زمانی انتقال حرارت از سطح افزایش می‌یابد. باید به این نکته اشاره کرد که در این نوع جت، جریان‌های چرخشی‌ای که در ناحیه برخورد بر اثر شتاب جت‌های نوسانی تولید می‌شوند به عنوان مؤثرترین عامل انتقال حرارت گزارش شده‌اند. این جریان‌ها به شدت به دامنه سرعت وابسته بوده و با تغییر این پارامتر میزان انتقال حرارت از سطح تغییر می‌کند. زو و همکاران [۹] در ادامه تحقیقات انجام شده در این زمینه، تأثیر اختلاف دمای زیاد بین جت و سطح برخورد را بر انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت شیاری نوسانی آشفتگی به سطح تخت بررسی کردند. نتایج عددی آن‌ها نشان می‌دهد که برای اختلاف دماهای بیشتر از ۱۰۰ درجه، به دلیل افزایش نرخ هدایت حرارتی، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. دمیرکن و همکاران [۱۰] در یک تحلیل عددی اثر نوسانی‌های سینوسی در جت‌های برخوردی به سطح تخت را بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که ساختار کلی جریان در دو حالت جت نوسانی و پایا مشابه است، اما به دلیل ایجاد جریان‌های چرخشی در جت‌های نوسانی، عدد ناسلت در ناحیه جت دیواره به صورت نوسانی تغییر می‌کند. هم چنین نشان داده شد که با افزایش عدد رینولدز جت و دامنه نوسانات، عدد ناسلت پیش‌بینی شده افزایش می‌یابد. با افزایش فرکانس تا مقداری معین عدد ناسلت در ناحیه سکون روند صعودی داشته اما با افزایش بیشتر آن عدد ناسلت در این ناحیه تغییرات محسوسی نخواهد داشت. زو و همکاران [۱۱] با تغییر متناوب سرعت جت به صورت مربعی شکل نوسانی تغییرات انتقال حرارت از یک سطح تخت را بررسی کردند. در این مطالعه نشان داده شد که در اثر به کار بردن این نوع موج نوسانی تغییرات مهمی در میدان جریان مانند افزایش آشفتگی، گسترش و توسعه گردابه‌ها و گسترش اختلاط همراه با ناپایداری جریان به وجود می‌آید که این عوامل باعث کاهش محسوس ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت از سطح برخورد می‌شوند. بازدیدی تهرانی و همکاران [۱۲] به بررسی جت برخوردی نوسانی به صفحه تخت

با شار حرارتی ثابت پرداختند. آن‌ها ضمن مقایسه مدل‌های آشفستگی مختلف نشان دادند که با افزایش فاصله جت از سطح برخورد، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که توزیع عدد ناسلت متأثر از لایه مرزی دیواره و گردابه‌های حلقه‌ای ایجاد شده در جریان است. چوی و همکاران [۱۱]، مطالعه تجربی جامعی را بر انتقال حرارت جت برخوردی پایا به سطح مقعر انجام دادند. این تحقیق مبنای مقایسه نتایج جت پایا و نوسانی در تحقیق حاضر قرار گرفته است. شریف و موته [۱۳] اثر تغییر پارامترهای هندسی شامل فاصله جت تا سطح و تغییرات انحنای سطح را بر میزان انتقال حرارت و تغییرات عدد ناسلت به طور کامل بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با کاهش انحنای سطح (افزایش شعاع انحنای) و نزدیک شدن سطح به سطح تخت میزان انتقال حرارت و متوسط عدد ناسلت به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. ون ژیاو چو و همکاران [۱۴] به پژوهش عددی و تجربی جت‌های برخوردی هوا در مدارهای الکترونیکی پرداخته‌اند. نوع قرارگیری خروجی جریان هوا و شکل سازه عبور دهنده هوای خنک‌کننده معیار مقایسه در تمام نتایج بوده است. با این تحلیل‌های عددی و تجربی توانسته‌اند بهینه‌ترین شکل از سازه را پیشنهاد دهند. در زمینه آشفستگی جریان و انتقال حرارت با وجود اسپری آب کارهای گوناگونی اعم از تجربی و عددی مورد انجام واقع شده است. در اینجا به تعدادی از کارهای انجام شده مرتبط با پژوهش حاضر آورده شده است. جعفری [۱۵] در سال ۲۰۱۳ به تحلیل انتقال حرارت در سیستم‌های خنک‌کاری با اسپری با روش عددی با نرم افزار STAR-CCM پرداخته است. ایشان در کار خود با استفاده از مدل‌سازی قطرات آب و انژکتور و برخورد آن به سطوح داغ به مفاهیم فیزیکی اعم از شار حرارتی بحرانی و فیلم تشکیل شده روی سطح داغ پرداخته است. گوچی و همکاران [۱۶] به مطالعه عددی و تجربی خنک‌کاری اسپری پرداختند. ایشان با حل جریان دو فازی و روش اویلری-لاگرانژی و قرارگیری یک نازل پاشش در فاصله مشخص به خنک‌کاری سطح داغ پرداخته و ضرایب انتقال حرارت را بدست آوردند. این تیم نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه کرده و تطابق خوبی از نتایج خود را ارائه کردند. هنیزدیل و همکاران [۱۷] به مطالعه انتقال حرارت در حین اسپری خنک‌کاری صفحه تخت در اعداد رینولدز بالا اشاره کرده‌اند. در کار ایشان تکیه بر استخراج حل تحلیلی و محاسبه ضرایب انتقال حرارت اعم از ناسل بوده است. لارگه و همکاران [۱۸] به مقایسه خنک‌کاری سطوح داغ با جت‌های مایع و اسپری پرداخته‌اند. نتایج حاصل از خنک‌کاری با اسپری بسیار مطلوب‌تر و بهینه‌تر از جت‌های سیال بوده است. منتظری و همکاران [۲] به مطالعه تجربی و عددی پاشش آب در جریان هوا پرداخته است. حل عددی با نرم افزار فلوئنت و مدل‌سازی قطرات آب با انژکتور انجام شده است. نتایج حاصل از کار عددی با نتایج تجربی دمایی مقایسه شده و اختلاف ناچیز نتایج نسبت بهم گزارش شده است. در حل منتظری از تشکیل فیلم سیال آب بر دیواره صرف‌نظر شده و تمرکز حل بر هسته اصلی میدان جریان بوده است. عبدالله‌الخدیر و همکاران [۱۹] به بررسی جریان پاشش آب در داخل کانال هوا و مطالعه پارامتریک کمیت‌های پاشش اعم از سرعت، زاویه پاشش و توزیع قطرات به شکل توزیع رزین راملر پرداخته است. ایشان نشان داد که در سرعت‌های بالا جریان هوای ورودی و پاشش آب و توزیع قطرات با اندازه کوچک کسر عمده‌ای از آب تبخیر خواهد شد. پیلی‌آنگ و همکاران [۲۰] به مدل‌سازی پاشش جریان آب به دیواره دارای دما پرداخته است. در این پژوهش به مقایسه عددی با نتایج تجربی اشاره شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ارتفاع اسپری یک پارامتر اثر گذار بر مشخصات خنک‌کاری است. با کاهش این ارتفاع اثرات انتقال حرارت افزایش یافته است. جین لانگ و همکاران [۲۱] به مطالعه تجربی چیدمان انژکتور در مقیاس‌های کوچک و بزرگ برای کاهش دمای سطح در مدار سیکل یخچالی پرداخته‌اند. شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در سیستم مقیاس کوچک دارای مقادیر بزرگتری نسبت به چیدمان مقیاس بزرگ را نشان می‌دهد. کوکومو و همکاران [۲۲] به بررسی جریان هوای عبوری در ایر کولر پرداخته‌اند. در سیستم ایرکولر مورد مطالعه این تیم، پنج چیدمان مختلف از نازل‌های پاشش آب و مسیر ورودی آب مورد شبیه‌سازی عددی قرار گرفته است.

۲. مدل‌سازی و شبیه‌سازی

۱.۲. معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان واکنشی آشفته شامل معادله بقای جرم، بقای ممنتوم، بقای انرژی و بقای جرم اجزاء می‌باشد که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = S_m \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial \rho Y_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\lambda}{Le_i c_p} \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right] + \dot{\omega}_i + S_i \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_j}{\partial x_j} = \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\lambda}{c_p} \sum_{i=1}^{N_s} \left( \frac{1}{Le_i} - 1 \right) h_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right] \quad (4-1)$$

$$h = \sum Y_i h_i, \quad h_i = \int_{T_{ref,i}}^T c_{p,i} dT + h_i^\circ(T_{ref,i})$$

که  $\dot{\omega}_i$  نرخ تولید جزء  $i$  توسط واکنش شیمیایی است و  $S_i$  نرخ ایجاد فاز گسسته است که به عنوان منبع در نظر گرفته می‌شود.

جریان آشفته توسط رابطه (۳-۵) به جریان متوسط و نوسانی تقسیم می‌شود.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (5-1)$$

که  $\phi$  اندازه اسکالر بوده و به عنوان مثال شامل مولفه‌های سرعت، فشار، انرژی و یا گونه‌های غلظت می‌باشد. با جایگزینی این تعریف در معادله بقای جرم و بقای ممنتوم و متوسط‌گیری فاوور از آن، معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز برای بقای ممنتوم به دست می‌آیند:

$$\bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij}^{RANS} \quad (6-1)$$

$$\tau_{ij}^{RANS} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$$

## مدل آشفتگی

برای بهبود نتایج شبیه‌سازی‌های حاصل از مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد در نمونه‌های جریانی که شامل انحنای شدید در خط جریانی، گوشه‌ها و چرخش هستند، از مدل‌های اصلاح شده آن مانند مدل  $k - \varepsilon$  Realizable ارائه شده توسط وسیله شیخ<sup>۱</sup> و همکاران [۲۴] و مدل  $k - \varepsilon$  RNG که توسط یاخوت و همکارش [۲۵] و چادوری<sup>۲</sup> [۲۶] پیشنهاد شده است، استفاده می‌شود. هر دوی این مدل‌ها بهبودهای اساسی خود را نسبت به مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد نشان داده‌اند. تفاوت‌های عمده در این مدل‌ها به صورت زیر است:

معادلات انتقال در مدل  $k - \varepsilon$  Realizable به وسیله شیخ و همکاران [۲۴] ارائه شد که به صورت زیر است:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G + B - \rho \varepsilon \quad (7-1)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (8-1)$$

که در آن:

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9-1)$$

$$C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

معرفی می‌شوند. پارامتر  $\eta$  بیان‌کننده نسبت زمان مشخصه آشفتگی به زمان مشخصه میدان جریان می‌باشد.

<sup>1</sup>Shih

<sup>2</sup>Choudhury

## معادلات حاکم بر جریان گسسته

معادلات حاکم بر بر جریان گسسته به صورت زیر ارائه می‌گردد:

معادله حرکت قطرات مبتنی بر قانون دوم نیوتن است که مجموع نیروهای وارد بر جرم باعث شتاب آن می‌شود. مسیر حرکت قطرات از معادله حرکت به دست می‌آید [۲۷].

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D (\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (10-1)$$

عبارت سمت چپ، اینرسی یک قطره است که شرح‌دهنده مقاومت جرم برای تغییر سرعت و جهت آن است.  $\vec{F}$  شتاب اضافی (نیرو بر واحد جرم ذره)، منظور از  $\vec{F}$  نیروهای دیگری نظیر نیروی جرم فرضی، نیروی ناشی از گرادیان فشار، نیروی ناشی از دوران سیستم، نیروی ترموفرتیک، نیروی برنیه و نیروی سافمنس می‌باشد که در پروژه پیش رو کاربردی ندارند و در حوصله بحث نمی‌گنجند.  $F_D$  نیروی درگ بر واحد جرم می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad (11-1)$$

در این جا،  $\vec{u}$  سرعت فاز پیوسته،  $\vec{u}_p$  سرعت قطره،  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $\rho_p$  چگالی قطره و  $d_p$  قطر قطره می‌باشد.  $Re$  عدد رینولدز نسبی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (12-1)$$

ضریب درگ  $C_D$  برای مدل کردن وابستگی پیچیده بین قطره و شرایط سیال به کار می‌رود. ضریب درگ ثابت نیست و به ویسکوزیته فاز پیوسته، سرعت نسبی و شکل قطره وابسته است. در این پژوهش ضریب درگ برای قطره کروی استفاده می‌شود و از طریق رابطه (۳-۱۳) محاسبه می‌گردد:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{1}{6} Re^{2/3} \right) \quad Re \leq 1000 \quad (13-1)$$

$$C_D = 0.44 \quad Re \geq 1000$$

مدل دمای یکنواخت (تعادلی) برای مدل کردن دمای قطره استفاده شده است. هم چنین فرض شده است که تغییر دما درون قطره وجود ندارد و دمای داخل قطره همگن می‌باشد [۲۷]. بنابراین قطرات گسسته‌سازی نمی‌شوند و هزینه محاسبه کاهش می‌یابد.

برای نرخ تبخیر بالا، جریان جابجایی بین سوخت تبخیر شده به فاز پیوسته مهم می‌شود (جریان استفان).

نرخ تبخیر  $\frac{dm_p}{dt}$  از طریق رابطه انتقال جرم اطراف قطره محاسبه می‌شود [۲۸] و [۲۹]:

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho_\infty D_{i,m} SH_{AB} \ln(1+B_m) \quad (1-14)$$

که  $d_p$  قطر قطره،  $\rho_\infty$  چگالی فاز گازی و  $D_{i,m}$  ثابت نفوذ بخار در فاز گاز می‌باشد.  $B_m$  و  $SH_{AB}$  به ترتیب عدد شروود و عدد جرم اسپالدینگ می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Sh_{AB} = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \quad (1-15)$$

$$B_m = \frac{Y_{i,s} - Y_{i,\infty}}{1 - Y_{i,s}} \quad (1-16)$$

که  $Y_{i,s}$  و  $Y_{i,\infty}$  دلالت بر کسر جرمی بخار روی صفحه و کسر جرمی بخار موجود در فاز گازی دارند و  $Sc$  عدد اشمیت می‌باشد.

دمای قطره بر اساس معادله تعادل حرارتی قطره به روز رسانی می‌شود.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (1-17)$$

که  $\frac{dm_p}{dt}$ ،  $T_\infty$ ،  $h$ ،  $T_p$ ،  $c_p$  و  $h_{fg}$  به ترتیب ظرفیت گرمای ویژه قطره در فشار ثابت، دمای قطره، ضریب انتقال حرارت جابجایی، دمای فاز پیوسته، نرخ تبخیر و حرارت تغییر فاز می‌باشند. ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از رابطه عدد ناسلت بدست می‌آید:

$$Nu = \frac{h d_p}{k_\infty} = \frac{\ln(1+B_T)}{B_T} \left( 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \right) \quad (1-18)$$

که  $k_\infty$  ضریب انتقال حرارت هدایت فاز پیوسته،  $Pr$  عدد پرانتل فاز پیوسته و  $B_T$  عدد انتقال حرارت اسپالدینگ می‌باشند که در این پژوهش فرض می‌شود که عدد انتقال حرارت و انتقال جرم اسپالدینگ با یکدیگر برابرند. اثر جریان آشفته بر روی توزیع قطرات در فاز پیوسته به وسیله مدل حرکت تصادفی که شامل سرعت آنی آشفته مسیر قطره می‌باشد انجام می‌شود. مقدار سرعت آنی جریان گاز به صورت زیر می‌باشد:

$$u = \bar{u} + u' \quad (19-1)$$

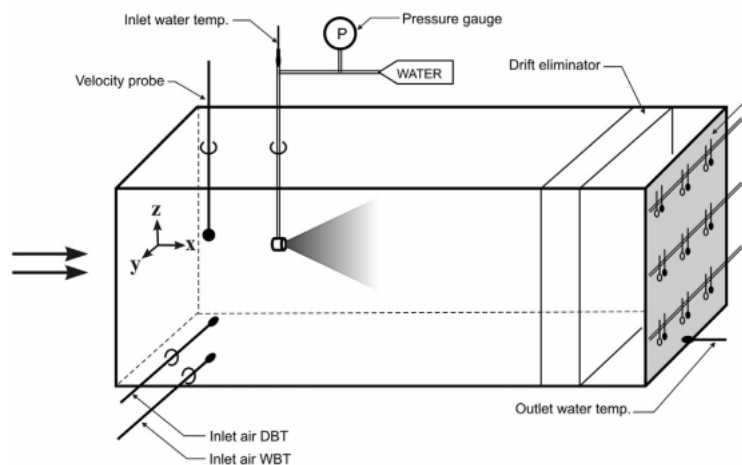
که  $\bar{u}$  سرعت میانگین فاز پیوسته و  $u'$  سرعتی است که به واسطه حضور ادی‌ها ایجاد می‌شود و از توزیع احتمالی گوسی بدست می‌آید:

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} = \zeta \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (20-1)$$

که  $\zeta$  توزیع نرمال عدد تصادفی و مقدار محلی RMS از مولفه‌های نوسانات سرعت از انرژی جنبشی آشفته تحت فرض ایزوتروپیک بودن جریان آشفته حاصل می‌شود [27].

## ۲.۲. معرفی هندسه

در ابتدا به حل عددی مدل هندسی منتظری و همکارانش پرداخته خواهد شد. این حل جهت اعتبار بخشی به نوع مدل‌سازی پاشش آب و عملکرد این مدل در بسته تجاری نرم افزار انسیس فلونت می‌باشد. علت انتخاب هندسه مقاله منتظری، وجود نتایج تجربی از دما و همچنین حل عددی انجام شده توسط ایشان بوده است. این هندسه مقدمه و مبنای ادامه کار عددی تحقیق حاضر است. شکل (۱-۱) نمایی طرح‌واره از این هندسه را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) هندسه مورد بررسی در رساله حاضر [2].

ابعاد هندسه کانال در تصویر زیر نشان داده شده است. در شکل (۱-۲) علاوه بر ابعاد هندسی، موقعیت قرارگیری نازل پاشش

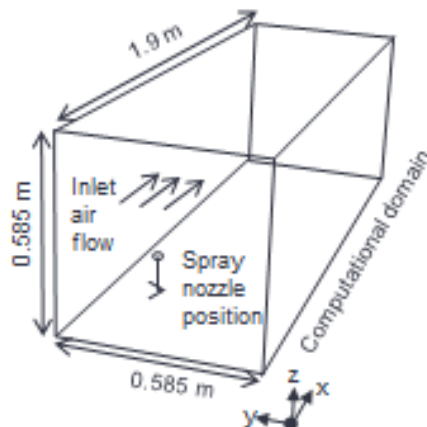


# ششمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical

www.mhconf.ir

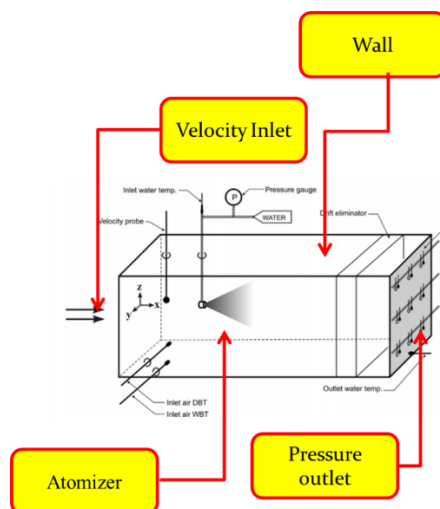
و سرعت هوای ورودی به کانال به همراه محورهای مختصات را نشان داده است.



شکل (۱-۲) ابعاد هندسی مدل منتظری و همکارانش

## شرایط مرزی

شرایط مرزی این هندسه به صورت شکل (۱-۳) بوده است. مقادیر هر یک از مرزها از مقاله منتظری و همکارانش مطابق با جدول کیس شماره سوم گرفته شده است.



شکل (۱-۳) شرایط مرزی اعمال شده روی کانال

جدول (۱-۴) شرایط مرزی به کار رفته در شبیه‌سازی جریان نشان می‌دهد.

جدول (۱-۴) جدول شرایط مرزی ورودی

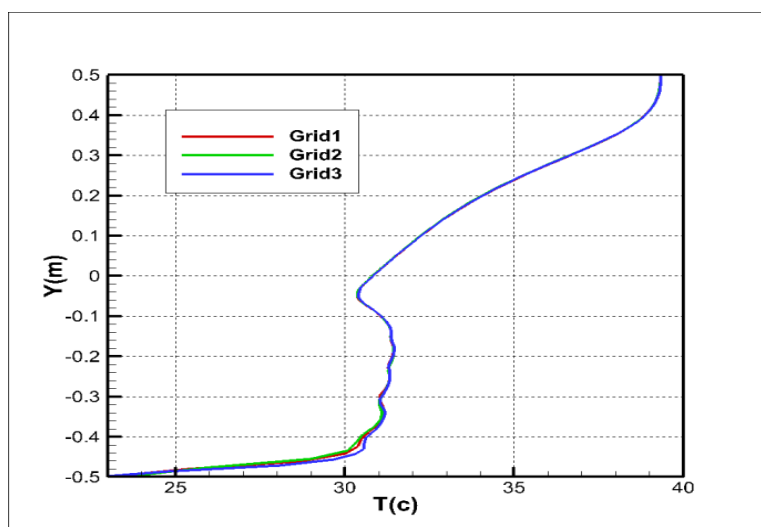
List of some main parameters of the cases.

Case	Inlet air			Water				Spray nozzle	
	V (m/s)	DBT (°C)	WBT (°C)	P (bar)	T <sub>in</sub> (°C)	T <sub>out</sub> (°C)	m (lit/min)	D (mm)	α (deg.)
1	1	41.4	18.9	3	35.1	25.3	12.5	4.0	22.0
2	2	39.1	18.5	3	35.0	25.2	12.5	4.0	20.0
3	3	39.2	18.7	3	35.2	26.1	12.5	4.0	18.0

Source: H. Montazeri, B. Blocken and J.L.M. Hensen, BUILD ENVIRON, 83, 129-141, 2015

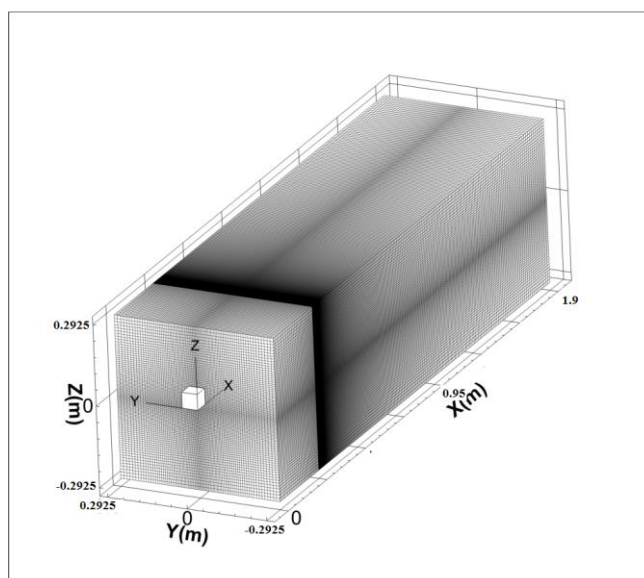
## شبکه‌بندی هندسه

جهت شبکه‌بندی هندسه، از بسته نرم افزاری GAMBIT استفاده شده است. شبکه مورد استفاده از نوع سازمان‌یافته بوده و با توجه به این که در نواحی اولیه جت‌های آب تاثیر زیادی بر جریان می‌گذارند، در این نواحی از سلول‌های ریزتری برای شبکه‌بندی استفاده شده است. جهت رسیدن به نتایج پایدار و مستقل از شبکه، از سه سایز شبکه مختلف برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده است. شکل (۱-۵) توزیع سرعت محوری را در این سه شبکه نشان می‌دهد.



شکل (۱-۵) تغییرات دما در راستای میانی صفحه خروجی کانال برای سه شبکه مختلف

در این بخش جهت عدم وابستگی نتایج به شبکه، سه گرید با اندازه‌های یک میلیون سل، کمتر از یک میلیون و بیشتر از یک میلیون ایجاد شده است. با بررسی توزیع دما روی خط میانی در راستای Y در صفحه خروجی کانال مشخص می‌شود که اختلاف نتایج بسیار ناچیز و در ناحیه کوچکی از این خط کمتر از ۱ درصد است. لذا جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی و زمانی تعداد سل کمتر انتخاب می‌شود. شکل (۱-۶) شبکه نهایی مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۶) شبکه‌بندی کانال منتظری و همکارانش

همان‌طور که در شکل (۱-۶) نشان داده شده است، در نواحی که گرادیان سرعت و غلظت دارای شیب تند بوده، بر چگالی سلول‌ها اضافه گردیده است و در نواحی نزدیک به دیواره‌ها، تراکم سلول‌ها و فاصله اولین سلول بر حسب واحد دیواره به گونه‌ای انتخاب گشته است که  $Y+$  در محدوده مناسب برای اعمال توابع دیواره باشد.

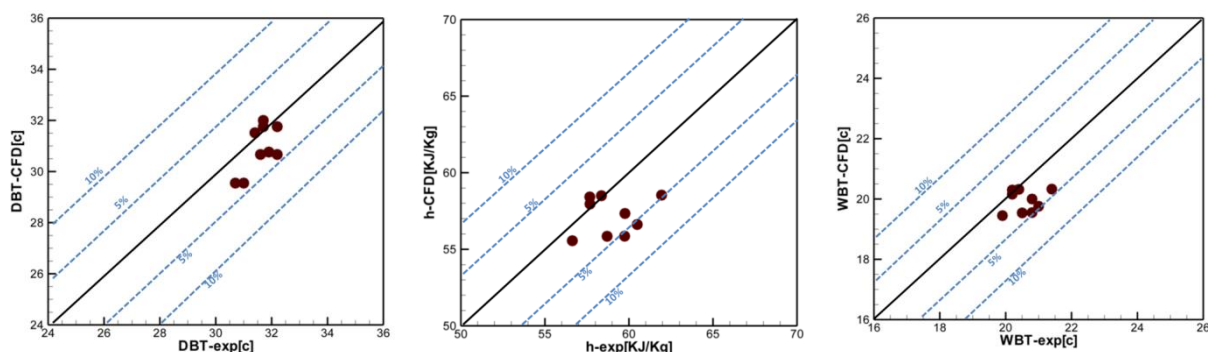
## ۳.۲. حل گر محاسباتی

شبیه‌سازی جریان در بسته‌نرم افزاری انسیس فلونت ۱۵/۰ [۲۷] با معیار همگرایی  $10^{-5}$  برای معادله بقای پیوستگی،  $10^{-6}$  برای معادلات انرژی، ممنتوم و فاز گسسته انجام شده است. معادلات حاکم بر جریان به صورت ضمنی خطی‌سازی شده و به صورت مرتبه دو گسسته‌سازی شده‌اند. عبارت‌های دیفیوژن در معادلات انتقال با استفاده از روش اختلاف مرکزی و عبارات

جابجایی به صورت مرتبه دو بالادست گسسته شده‌اند. الگوریتم سیمپل C [۲۷] عبارت فشار و سرعت را به یکدیگر متصل می‌کند. برای مدل کردن فاز گسسته (قطرات مایع) معمولاً از کوپلینگ دو طرفه و با نگرش اویلر- لاگرانژی استفاده شده است. برای کسرهای جرمی در محدوده  $10^{-6}$  تا تقریباً  $10^{-3}$ ، عکس‌العمل فاز گسسته روی مشخصات دینامیکی سیال پیوسته می‌تواند محاسبه گردد (کوپلینگ دو طرفه). همه معادلات اشاره شده به صورت پایا و برای جریان غیر قابل تراکم حل شده‌اند.

## شبیه‌سازی و تحلیل جریان

با انتخاب شبکه محاسباتی کمتر از یک میلیون، حل عددی کانال انجام شده است. در ابتدا جهت اعتبار سنجی نتایج عددی، برخی پارامترها اعم از دمای خشک و تر و آنتالپی با مقادیر تجربی موجود مقایسه شده است. نتایج تجربی مطابق با شکل بالا از طریق سنسورهای نصب شده در خروجی کانال به صورت چیدمان مربعی تخمین زده شده است. شکل (۱-۷) نتایج حاصل از تجربی و عددی سه پارامتر دمای خشک، تر و آنتالپی را به همراه میزان درصد خطا را نشان می‌دهد. اختلاف مقادیر دمای خشک، تر و آنتالپی شبیه‌سازی عددی نسبت به نتایج تجربی آن‌ها کمتر از ۵ درصد می‌باشد. دمای موجود در فلونت از نوع خشک می‌باشد. لذا برای محاسبه دمای تر باید از روابط سایکرومتریک استفاده نمود.



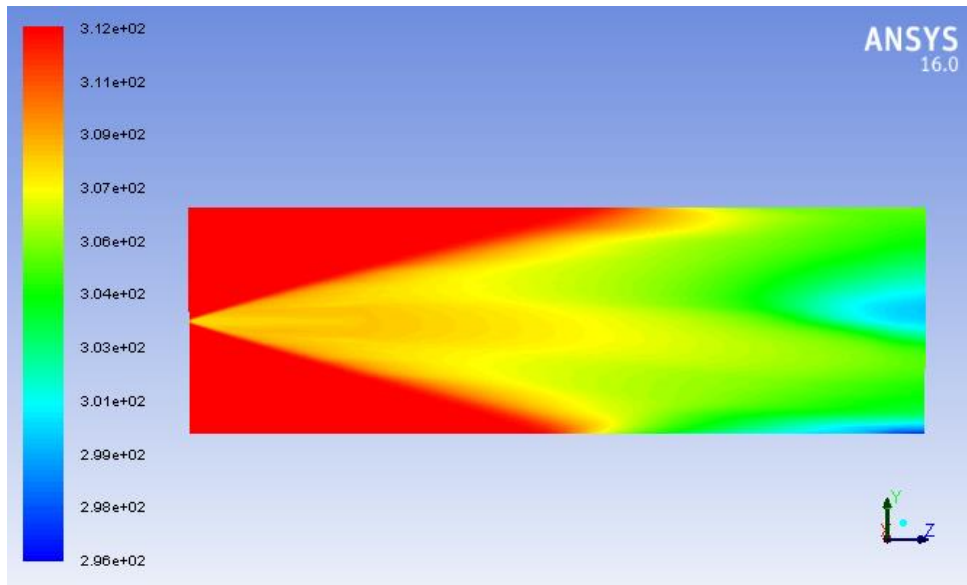
شکل (۱-۷) مقایسه نتایج تجربی و عددی حاضر در صفحه خروجی هندسه کانال

کانتور دما و سرعت در مقطع طولی  $X=0$  از شبیه‌سازی عددی در شکل (۱-۸) نشان داده شده است. همانطور که در این تصویر مشخص شده است، نواحی میدان که متأثر از جریان پاشش نبوده دارای دمای بالای ۳۱۲ کلوین بوده است. همچنین در کانتور سرعت، نواحی نزدیک به انژکتور سرعت بالاتری دارد که این بر اثر تداخل سرعت بالای پاشش با هوا بوده است.

# ششمین همایش بین‌المللی افق های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

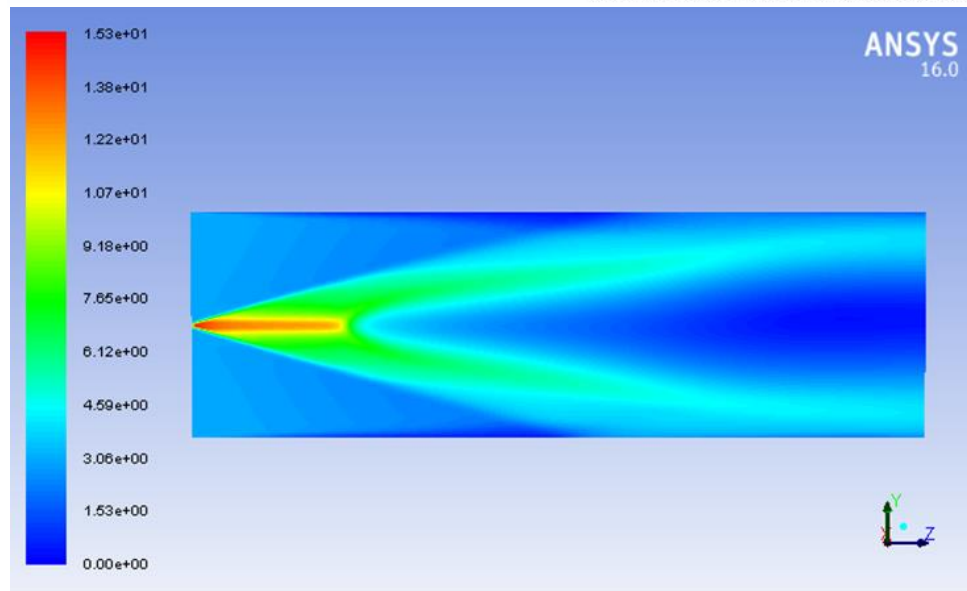
6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical

www.mhconf.ir



Contours of Static Temperature (k)

Jul 18, 2021  
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, spe, rke)

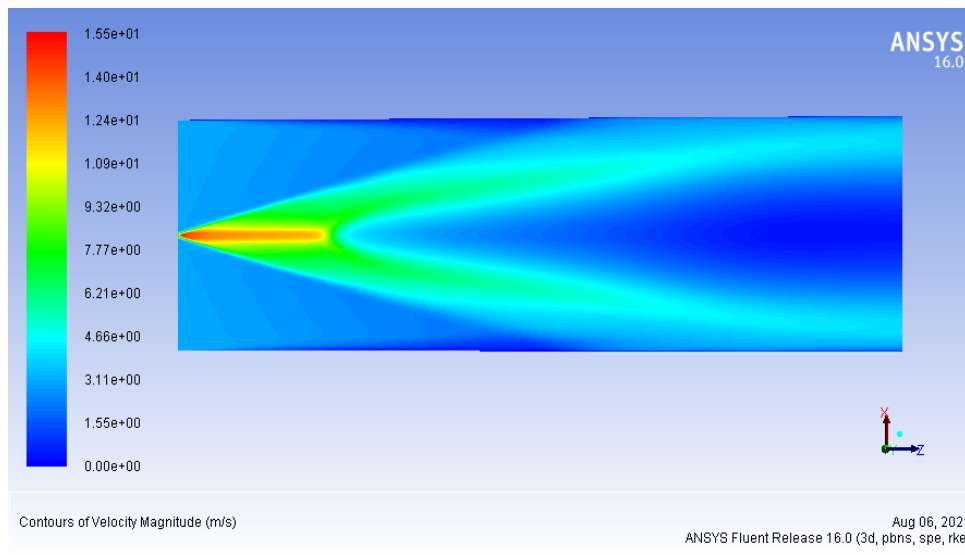
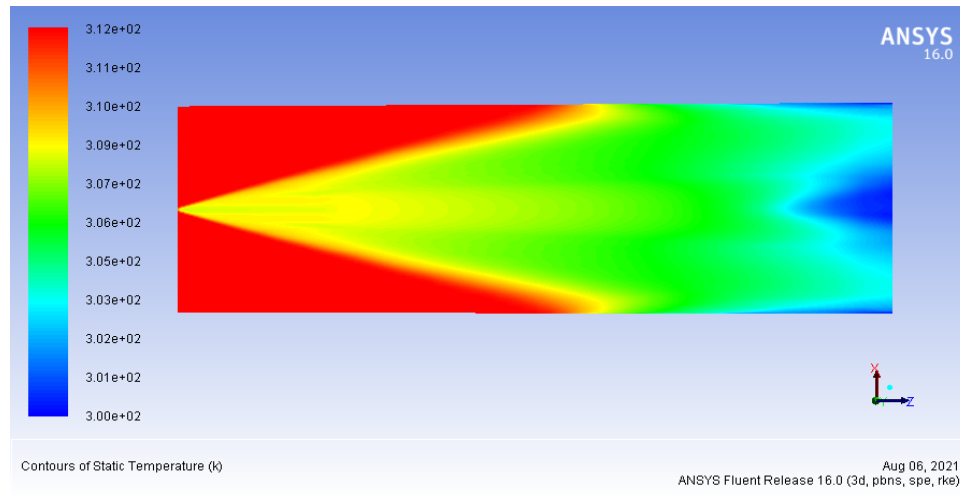


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 18, 2021  
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, spe, rke)

شکل (۸-۱) کانتور دما و سرعت در مقطع طولی  $X=0$  کانال

کانتور دما و سرعت در مقطع طولی  $Y=0$  از شبیه سازی عددی در شکل (۹-۱) نشان داده شده است.



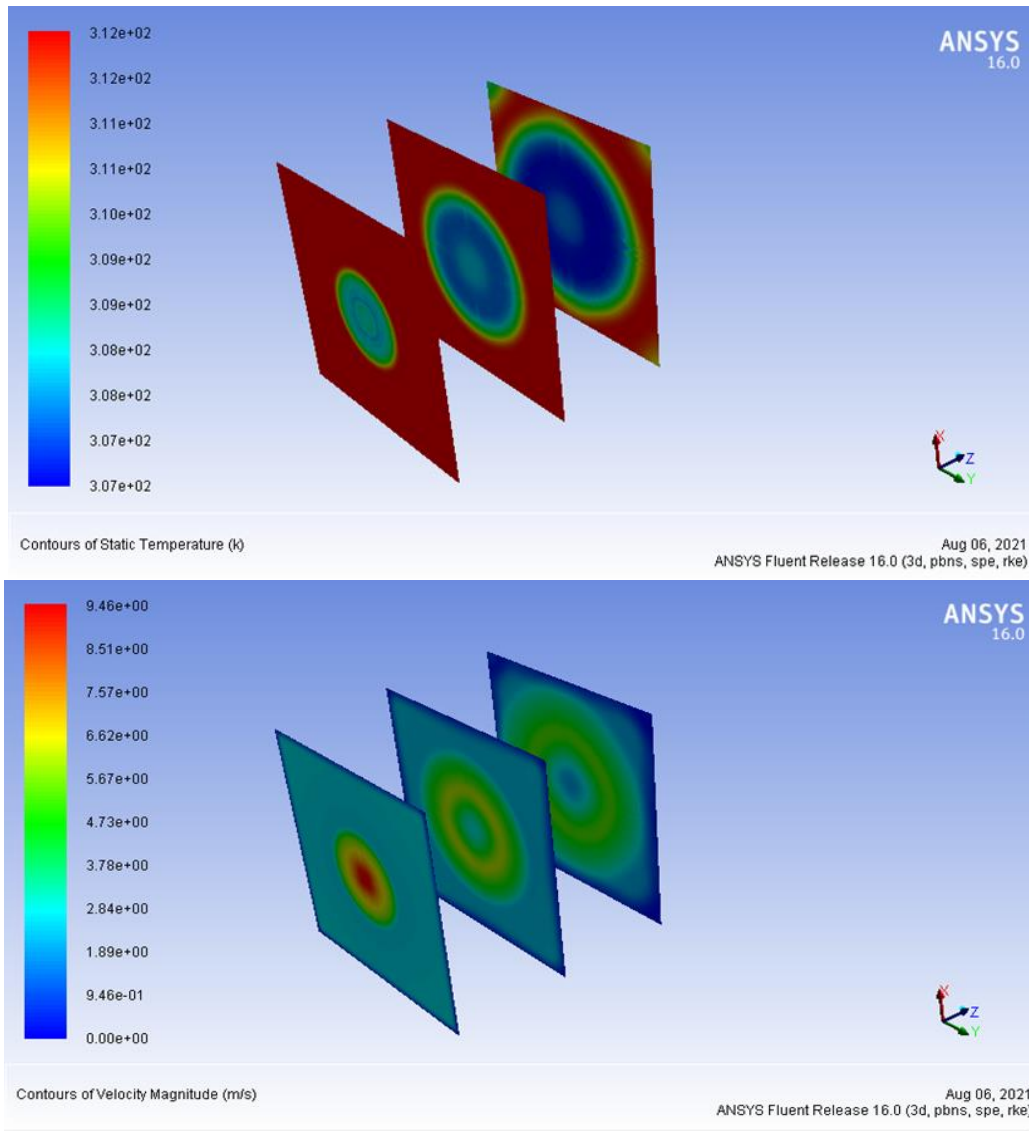
شکل (۹-۱) کانتور دما و سرعت در مقطع طولی  $Y=0$  کانال

کانتور سرعت در مقطع طولی  $Z=0$  از شبیه‌سازی عددی در شکل (۱۰-۱) نشان داده شده است. این مقاطع بیانگر نوع بازشدگی چتر آب می‌باشد.

# ششمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

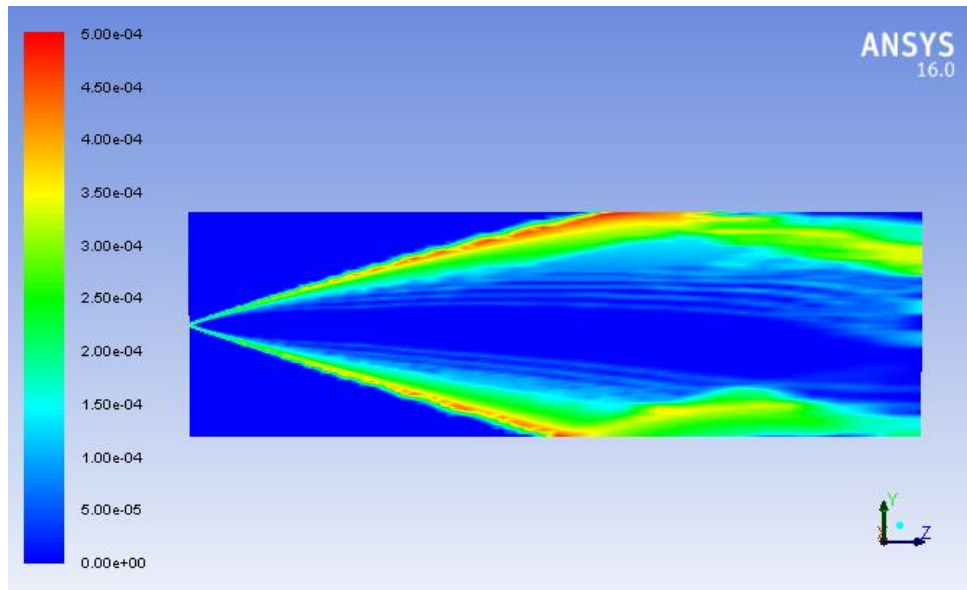
6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical

www.mhconf.ir



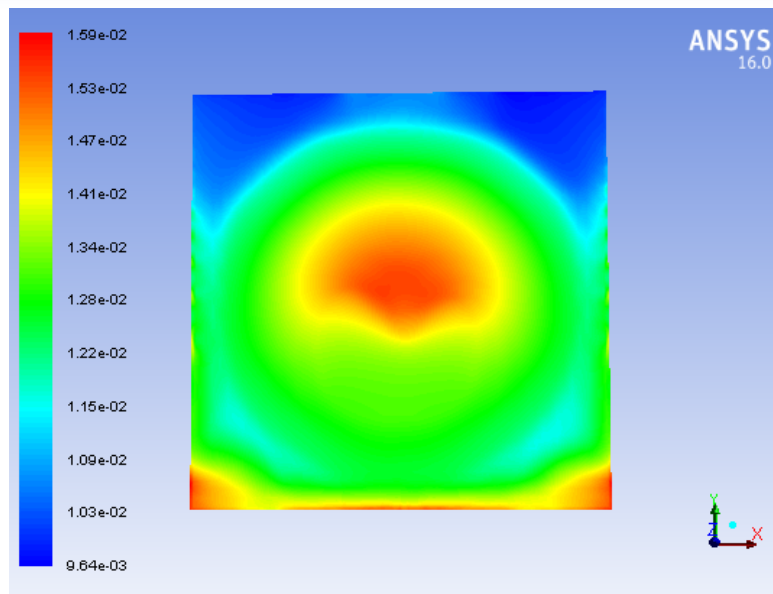
شکل (۱۰-۱) کانتور دما و سرعت در مقطع طولی  $Z=0$  کانال

کانتور توزیع قطرات آب در مقطع میانی کانال و کسر آب در خروجی در شکل (۱۱-۱) نشان داده شده است. توزیع قطرات آب و الگوی پاشش و همچنین مقدار آب در مقطع خروجی را نشان می‌دهد. مقدار آب به علت اثرات جاذبه به سمت کف کانال تمایل دارد و در این نواحی مقادیر آب و قطرات بیشتر می‌باشد.



Contours of DPM Mean Sauter Diam (m)

Jul 18, 2021  
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, spe, rke)



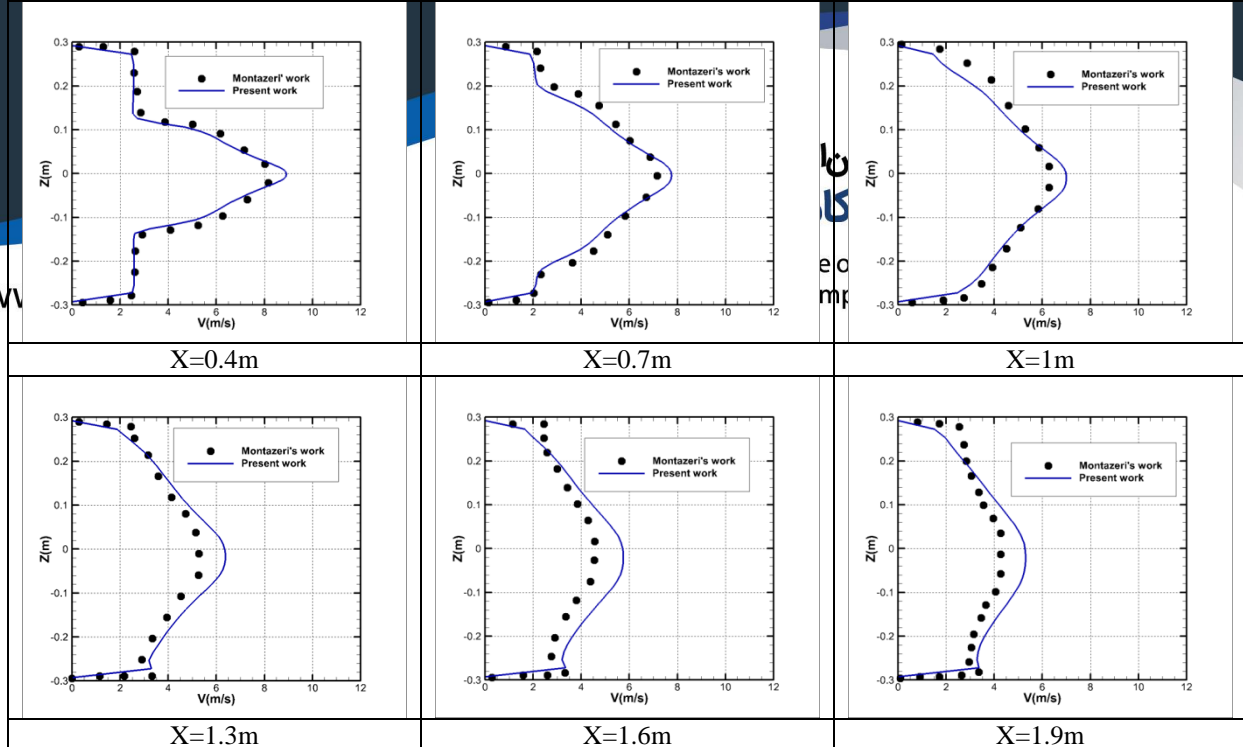
Contours of Mass fraction of h2o

Jul 18, 2021  
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, spe, rke)

شکل (۱۱-۱) کانتور توزیع قطرات آب در مقطع میانی کانال و کسر آب در خروجی

مقایسه نتایج سرعت کار حاضر با کار منتظری در مقاطع مختلف طولی از کانال در شکل (۱۲-۱) زیر آورده شده است. مقایسه توزیع سرعت کار عددی حاضر با نتایج منتظری در راستای محور عمود و خلاف نیروی جاذبه در سه مقطع طولی نشان داده

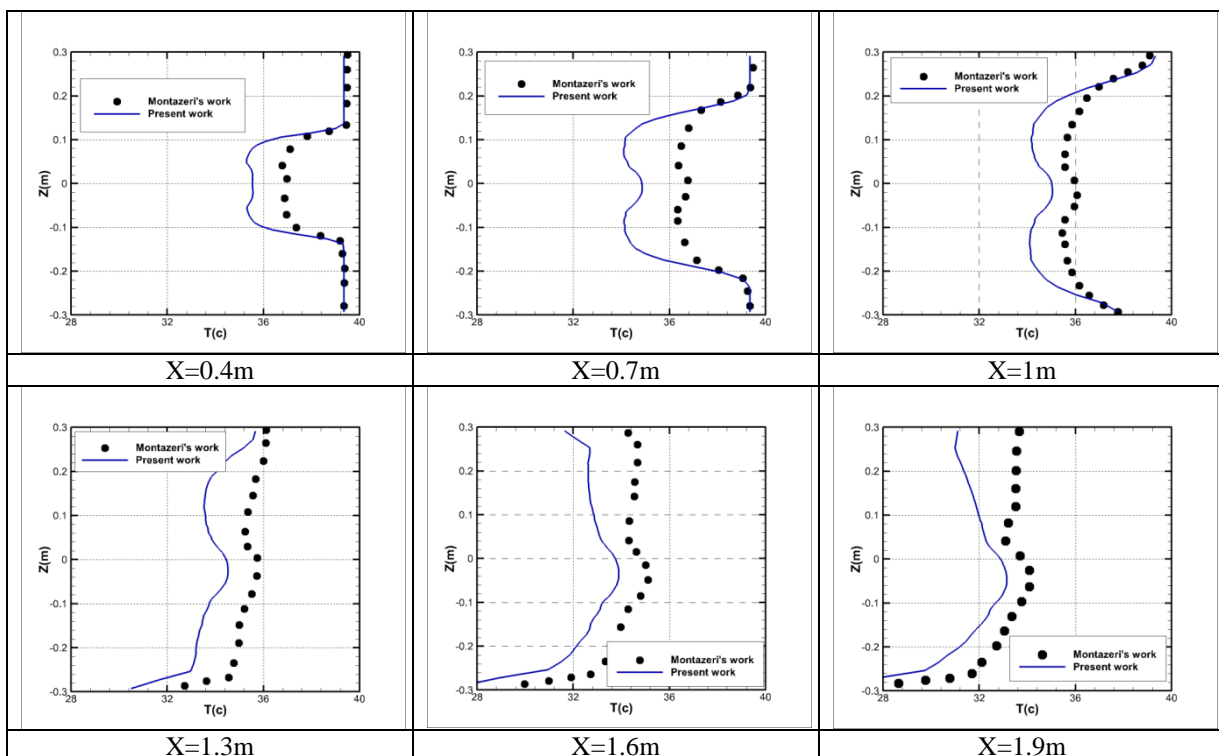




شده است. این مقایسه جهت اعتبار سنجی تنظیمات عددی حاضر بوده است. در این نتایج اختلاف ناچیز نتایج مشاهده شده است که می‌توان به ورژن نرم افزار ربط داد.

شکل (۱۲-۱) مقایسه نتایج سرعت از کار عددی حاضر با کار عددی منتظری و همکاران در مقاطع مختلف کانال

مقایسه نتایج دما کار حاضر با کار منتظری در مقاطع مختلف طولی از کانال در شکل (۱۳-۱) زیر آورده شده است. مقایسه توزیع دما کار عددی حاضر با نتایج منتظری در راستای محور عمود و خلاف نیروی جاذبه در سه مقطع طولی نشان داده شده است. این مقایسه جهت اعتبار سنجی تنظیمات عددی حاضر بوده است. در این نتایج اختلاف ناچیز نتایج مشاهده شده است که می‌توان به ورژن نرم افزار ربط داد.

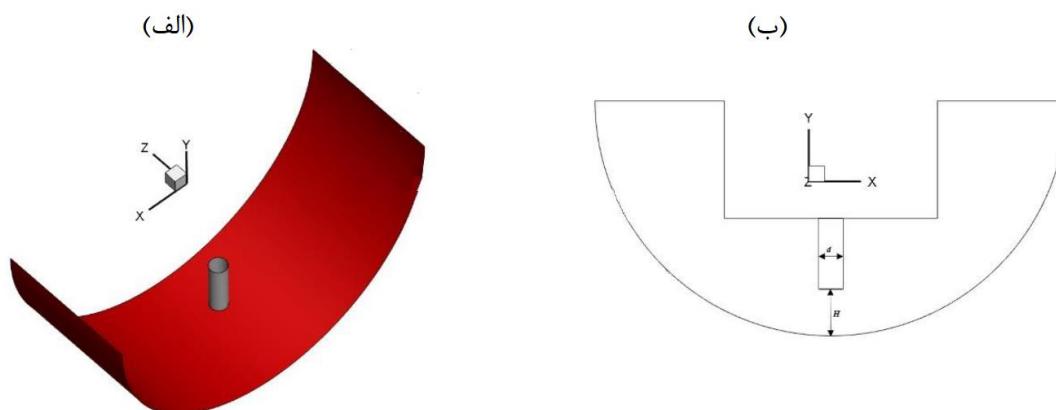


شکل (۱۳-۱) مقایسه نتایج دما از کار عددی حاضر با کار عددی منتظری و همکاران در مقاطع مختلف کانال

## حل عددی سطح انحنا دار

یکی از کاربردهای جت برخوردی بر روی صفحه مقعر به خنک کاری پره توربین گاز مربوط می‌شود. زیرا سطوح بکار رفته در توربین گاز اغلب به صورت مقعر است. در این تحقیق هدف بررسی جریان و انتقال حرارت جت برخوردی به سطح مقعر در فاصله‌های کم بین جت و سطح برخورد می‌باشد. لذا جهت بررسی عمیق‌تر و دقیق‌تر ماهیت جریان و انتقال حرارت جت در برخورد با صفحه مقعر، شبیه‌سازی عددی سه بعدی با رهیافت حجم محدود به انجام می‌رسد.

شکل (۱۴-۱) طرح‌های از مسأله حاضر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل الف ملاحظه می‌شود، یک جت دایروی به قطر  $d$  بر روی صفحه مقعر قرار دارد و فاصله خروجی جت تا صفحه مقعر  $H$  می‌باشد (شکل ب). به منظور استفاده از توابع دیواره برای حل جریان در نزدیکی دیواره، شبکه باید در نواحی نزدیک به دیواره به میزان کافی ریز شود که مقدار  $y^+ < 1$  حاصل شود.

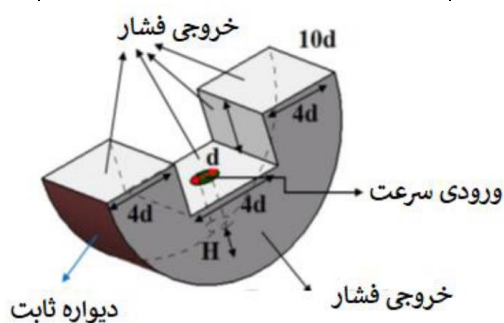


شکل (۱۴-۱) الف) طرح‌واره سه بعدی مسأله ب) نمای دوبعدی مسأله در صفحه X-Y

جدول (۱-۲) و شکل (۱۵-۱) شرایط مرزی اعمال شده بر دامنه محاسباتی حل را نشان می‌دهد. شرایط مرزی ورودی سرعت برای جت ورودی، شرط مرزی دیواره با شار ثابت برای سطوح برخورد و شرط مرزی خروجی فشار برای سطوح دیگر در نظر گرفته شده است.

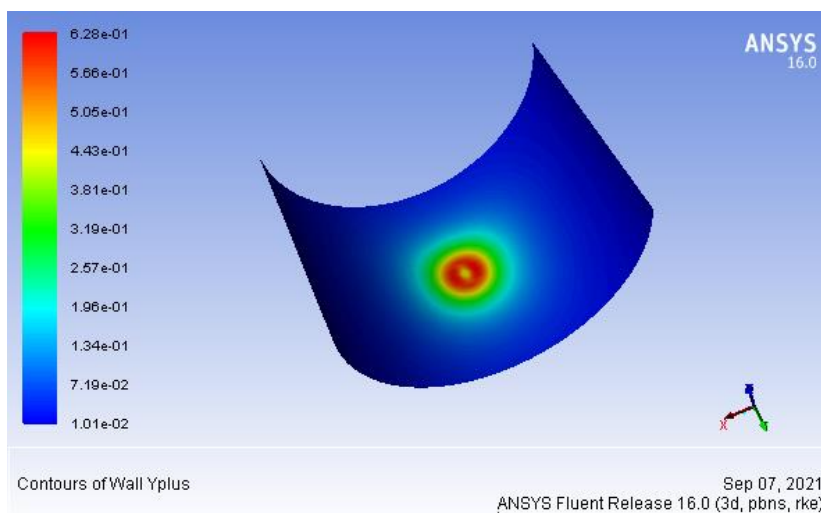
شکل (۱۴-۱) شرط مرزی هندسه با سطح مقعر

نوع شرط مرزی	دما	جریان
ورودی	۳۰۰ کلوین	۱-۱۶ متر برثانیه
خروجی	۳۰۰ کلوین	فشار اتمسفر
دیواره	شار حرارتی ثابت (w/m <sup>2</sup> ): ۲۰۰۰	سرعت صفر



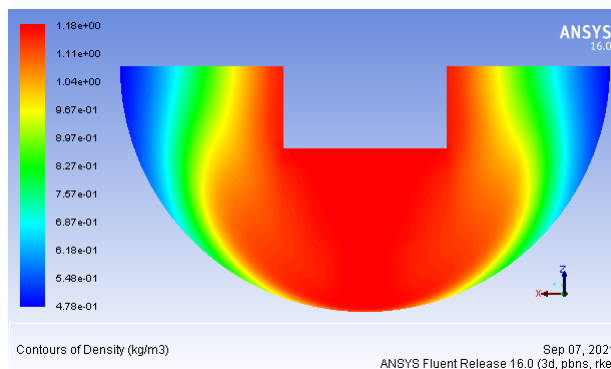
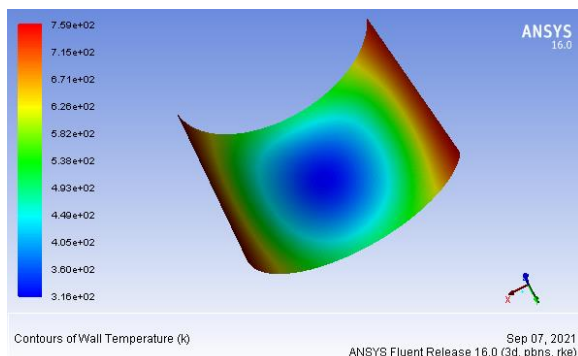
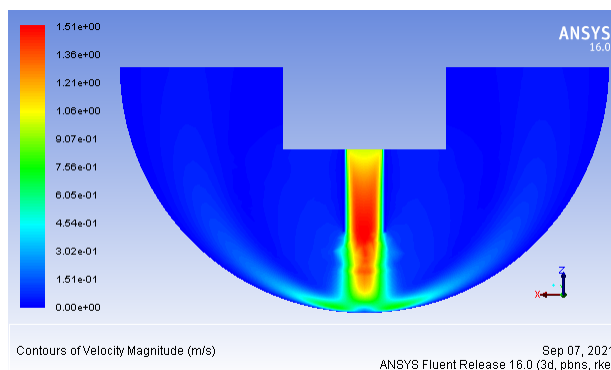
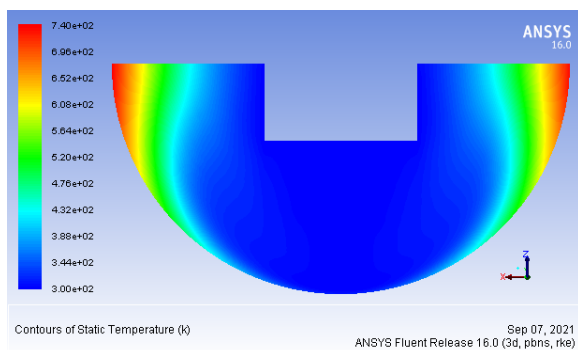
شکل (۱۵-۱) شرایط مرزی اعمال شده بر دامنه محاسباتی

مقدار تابع دیواره Yplus به صورت شکل (۱۶-۱) زیر می‌باشد. این کانتور بیانگر مطلوب بودن نوع شبکه ایجاد شده می‌باشد. زیرا که روی این دیوار مقادیر Yplus کمتر از یک بدست آمده است. در حل‌های عددی این مقدار زیر ۵ باشد به راحتی می‌توان ادعا کرد نزدیک دیواره به خوبی مدل شده است.



شکل (۱۶-۱) کانتور توزیع مقادیر دیواره روی سطح مقعر داغ

در ابتدا خنک کاری سطح داغ مقعر با جریان هوا انجام شده است. جهت درک بیشتر از اثر بخشی این مدل از خنک کاری، جریان هوای با سرعت‌های متفاوتی به سطح داغ برخورد می‌کند. بازه انتخابی برای سرعت جریان هوا [۱۶-۱] m/s لحاظ شده است. بنابراین حل‌های عددی مختلفی برای پنج سرعت متفاوت از هوا انجام شده است. در اشکال زیر، نتایج هر یک از حل‌های عددی با جریان برای خنک کاری سطح مقعر آورده است. از کانتور توزیع دمای دیواره مشخص می‌شود که محل برخورد جت هوا روی سطح داغ مقعر موجب کاهش دما بیشتری شده است. این ناحیه دما پایین در همه حالات نزدیک به ۳۰۰ کلوین بوده است. اما با افزایش سرعت جریان هوای جت، سطح بیشتری از ناحیه داغ تقعر خنک می‌شود. در حالت سرعت جت هوای ۱۶ متر بر ثانیه، کل سطح تقعر دمایی بین ۳۰۰ تا ۳۴۰ کلوین را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت جت می‌توان به طور یکنواخت سطح را خنک نمود.

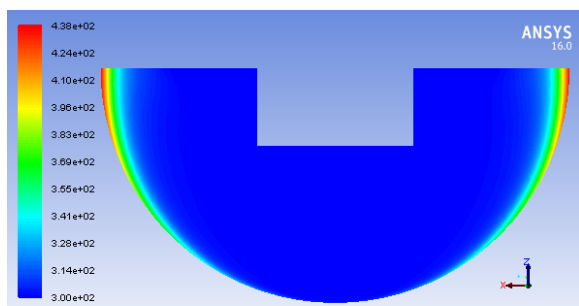


شکل (۱۷-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت هوا ۱ متر بر ثانیه

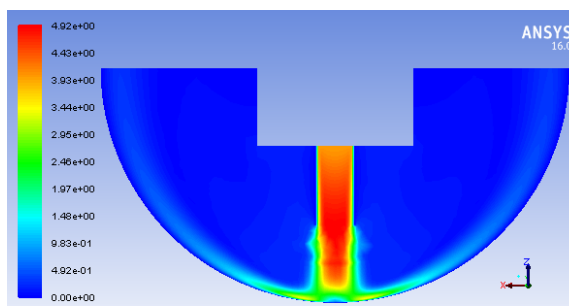
# ششمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical

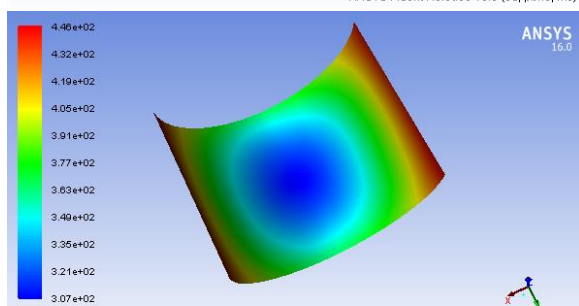
www.mhconf.ir



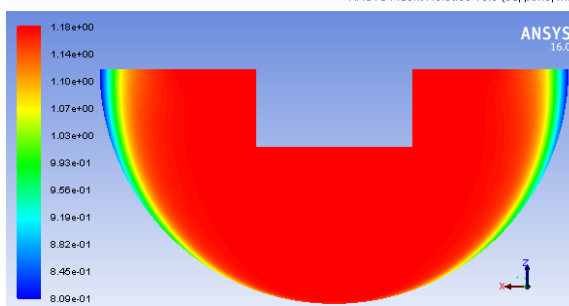
Contours of Static Temperature (k) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

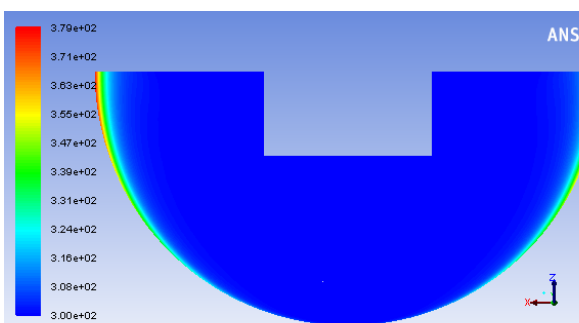


Contours of Wall Temperature (k) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

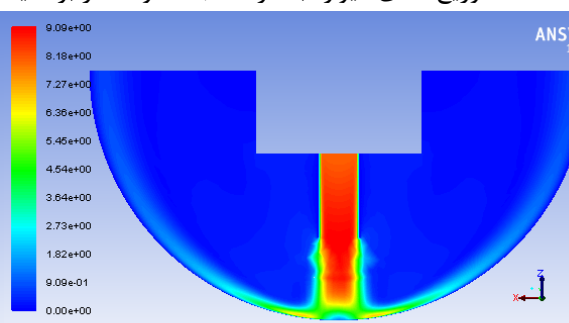


Contours of Density (kg/m3) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

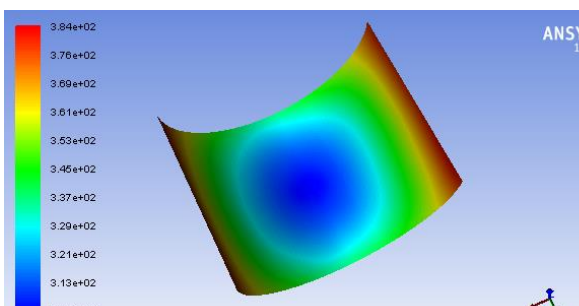
شکل (۱۸-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت هوا ۴ متر بر ثانیه



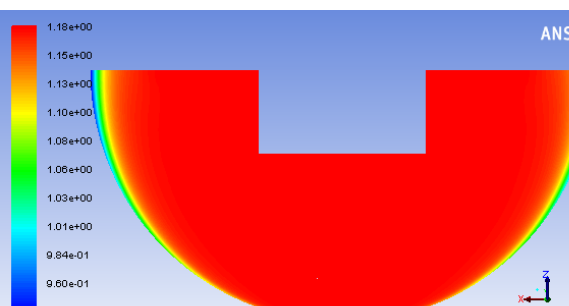
Contours of Static Temperature (k) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)



Contours of Wall Temperature (k) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)



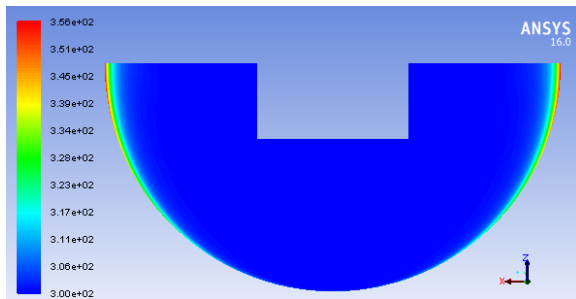
Contours of Density (kg/m3) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

# ششمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

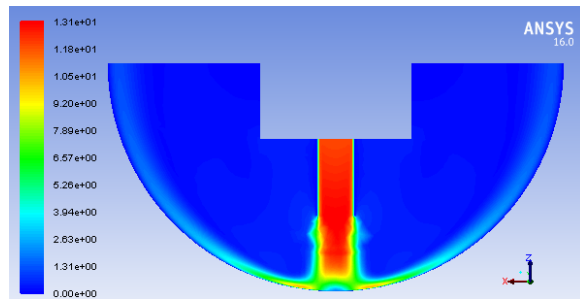
6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical

www.mhconf.ir

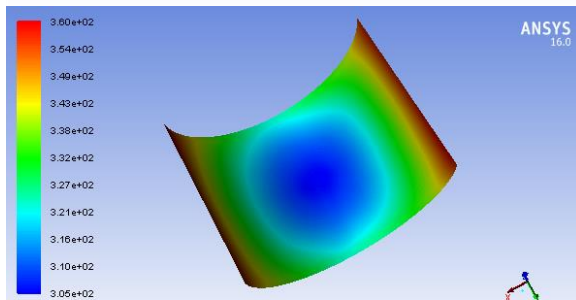
شکل (۱۹-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت هوا ۸ متر بر ثانیه



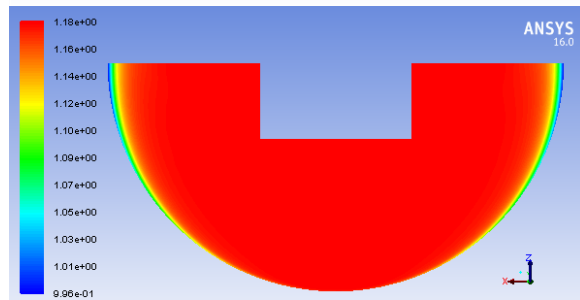
Contours of Static Temperature (k) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

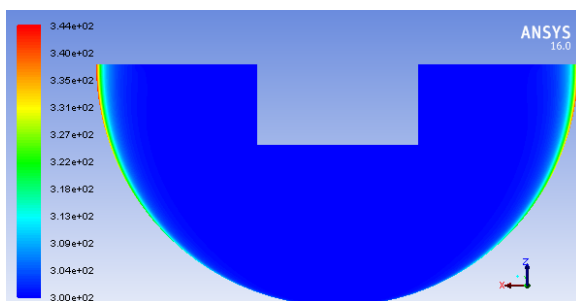


Contours of Static Temperature (k) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

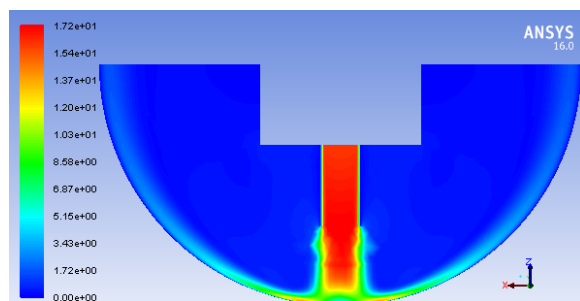


Contours of Density (kg/m3) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

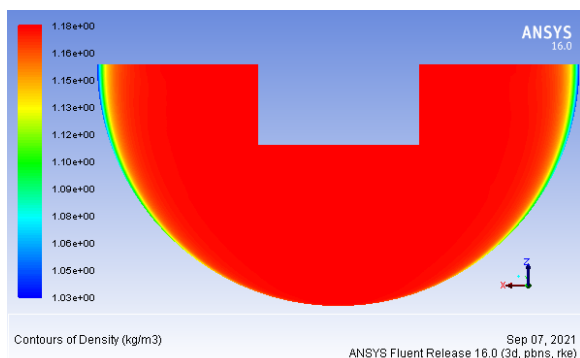
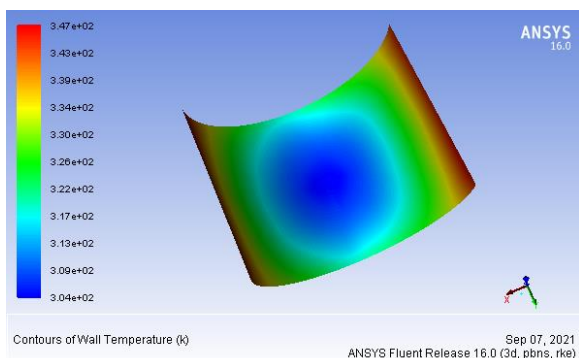
شکل (۲۰-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت هوا ۱۲ متر بر ثانیه



Contours of Static Temperature (k) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

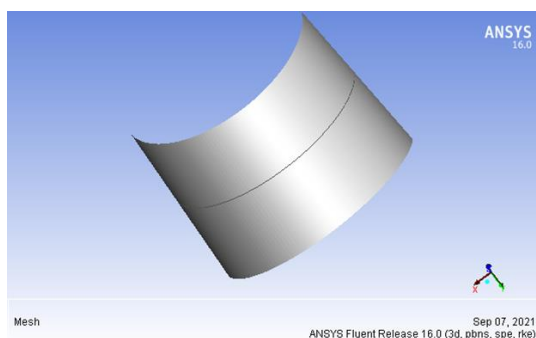


Contours of Velocity Magnitude (m/s) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)



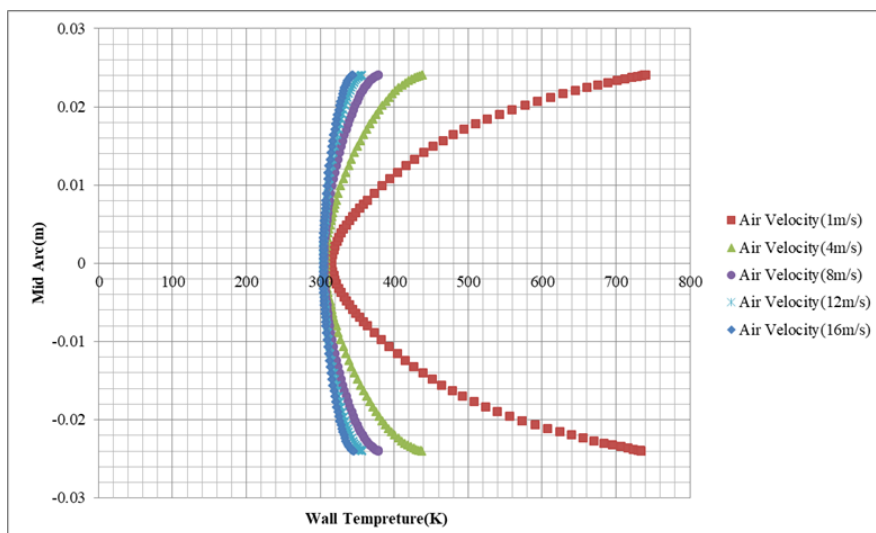
شکل (۲۱-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت هوا ۱۶ متر بر ثانیه

با رسم منحنی روی سطح شکل (۲۲-۱) مقادیر توزیع دمای دیواره روی این خط در حالات مختلف از سرعت هوای جت ورودی ترسیم شده است. این منحنی به صورت شکل زیر است.



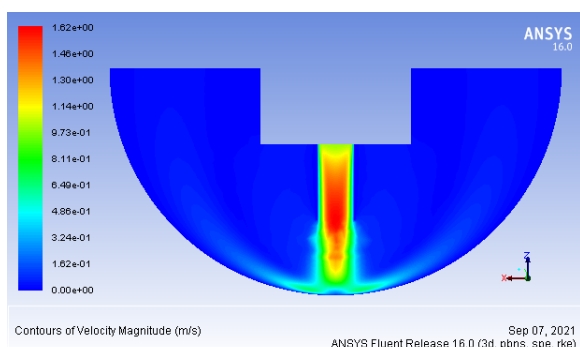
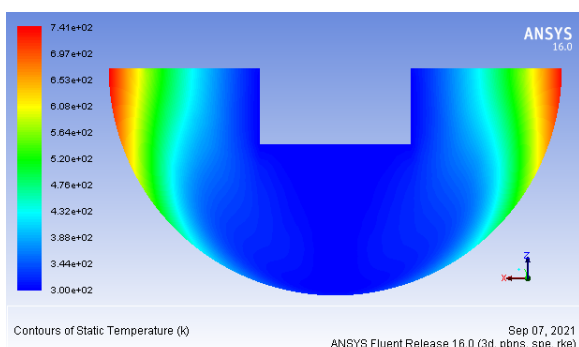
شکل (۲۲-۱) خط میانی سطح مقعر برای رسم توزیع دمای دیواره در حالات مختلف

همانطور در شکل (۲۳-۱) نشان داده شده است، کمینه کاهش دما در محل برخورد برای تمام حالات سرعت‌های جت ورودی هوا رخ داده است. این مقدار برای همه حالات یکسان بوده است. اما در سرعت‌های بسیار پایین جت هوای ورودی، گرادیان دمایی روی این خط بسیار زیاد بوده است. از طرفی با افزایش سرعت جت هوا، این مقدار گرادیان کمتر شده و سطح مقعر به طور یکنواخت خنک شده و به دمای ۳۰۰ کلوین رسیده است.



شکل (۲۳-۱) تغییرات دمای دیواره روی آرک میانی در سرعت‌های مختلف جت هوا

در ادامه بررسی‌های عددی کاهش دمای سطح داغ، حل‌های عددی با سرعت مختلف از جت سیال آب پرداخته شده است. بازه [۱-۱۶] لحاظ شده است. بنابراین حل‌های عددی مختلفی برای پنج سرعت متفاوت از آب ۱m/s انتخابی برای سرعت جریان آب انجام شده است. در اشکال زیر، نتایج هر یک از حل‌های عددی با جریان برای خنک‌کاری سطح مقعر آورده است. از کانتور توزیع دمای دیواره مشخص می‌شود که محل برخورد جت آب روی سطح داغ مقعر موجب کاهش دما بیشتری شده است. این ناحیه دما پایین در همه حالات نزدیک به ۳۰۰ کلوین بوده است. اما با افزایش سرعت جریان هوای جت، سطح بیشتری از ناحیه داغ تقعر خنک می‌شود. در حالت سرعت جت هوای ۱۶ متر بر ثانیه، کل سطح تقعر دمایی بین ۳۰۰ تا ۳۴۰ کلوین را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت جت می‌توان به طور یکنواخت سطح را خنک نمود. در استفاده در جت آب در مجموع کاهش دمای سطح منحنی ۵ درجه بیشتر از جت هوا می‌باشد. لذا راندمان خنک‌کاری با آب بسیار بیشتر بوده است.

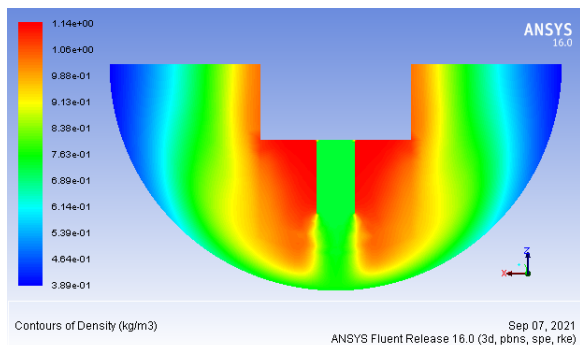
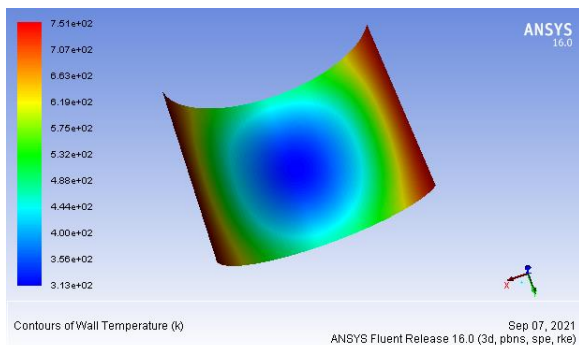




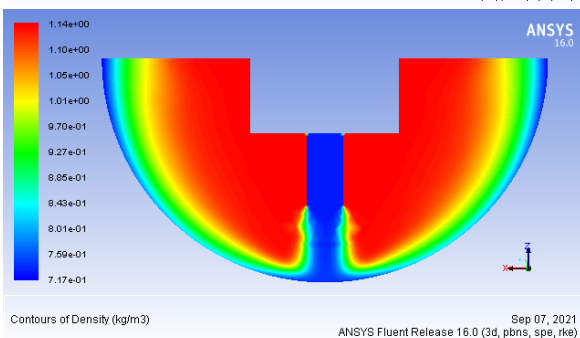
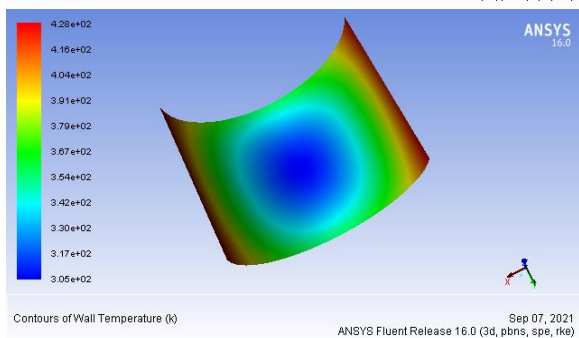
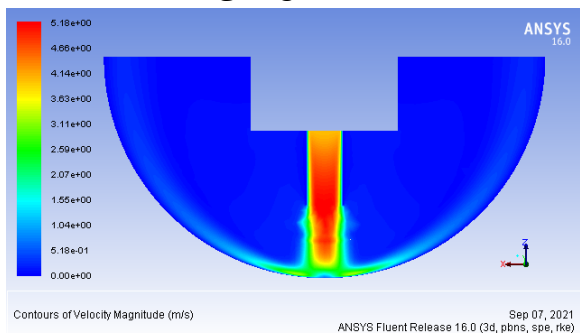
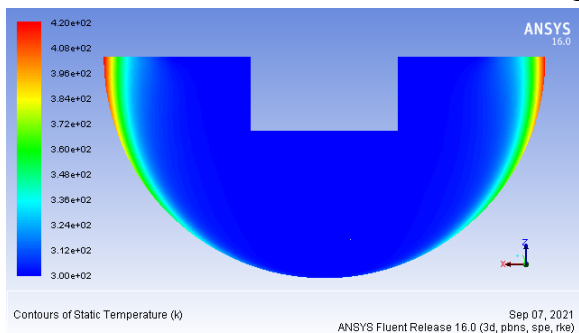
# ششمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical

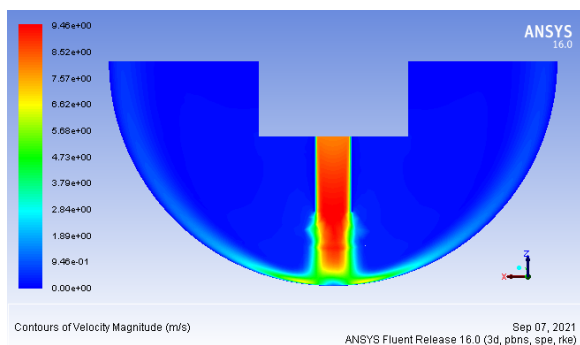
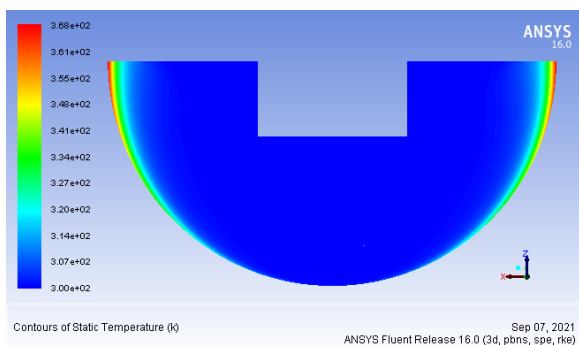
www.mhconf.ir



شکل (۲۴-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت آب ۱ متر بر ثانیه



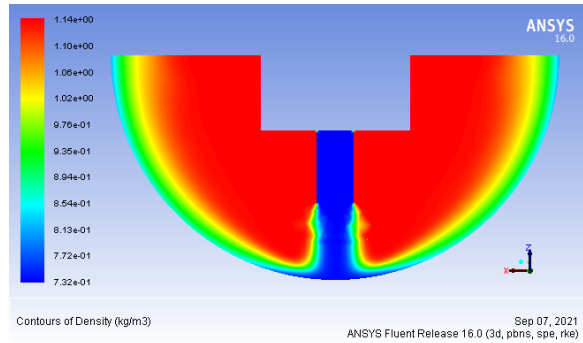
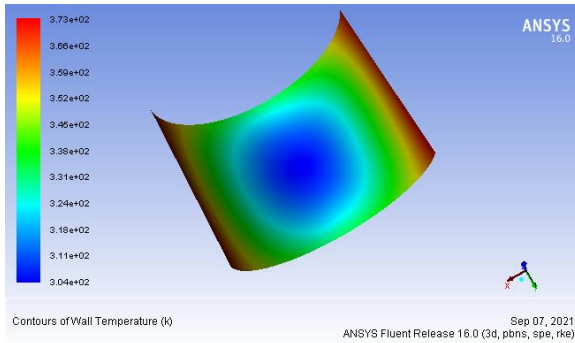
شکل (۲۵-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت آب ۴ متر بر ثانیه



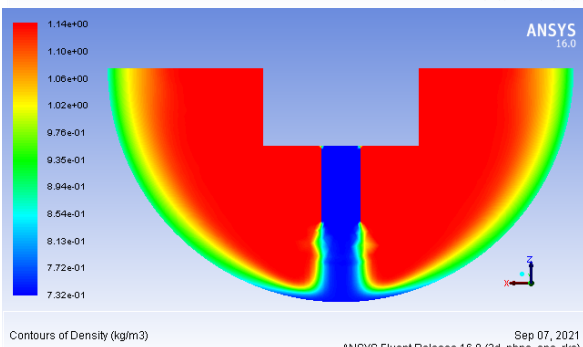
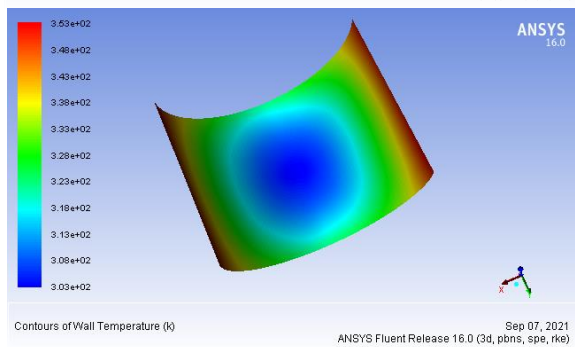
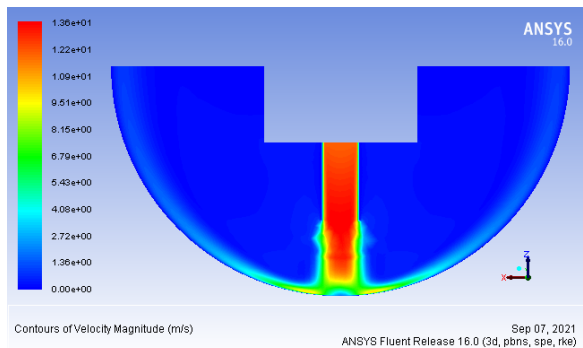
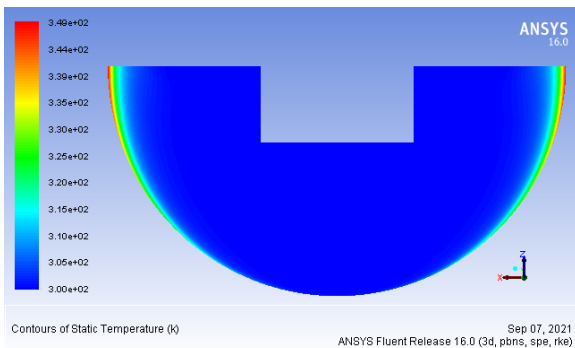
# ششمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical

www.mhconf.ir



شکل (۲۶-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت آب ۸ متر بر ثانیه

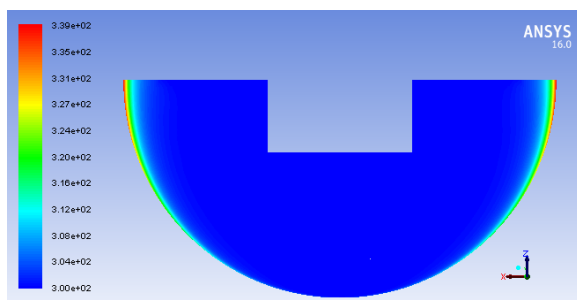


شکل (۲۷-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت آب ۱۲ متر بر ثانیه

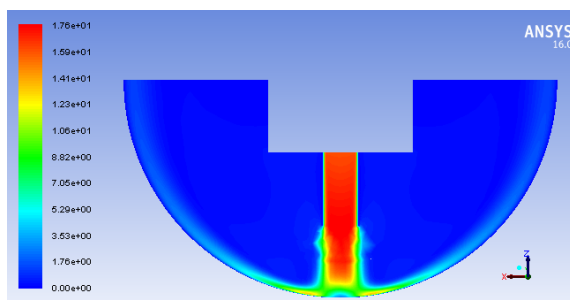
# ششمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in Electrical Engineering, Computer and Mechanical

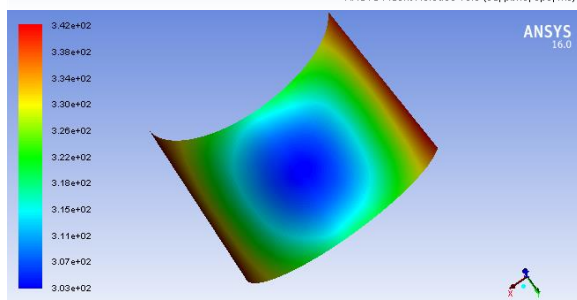
www.mhconf.ir



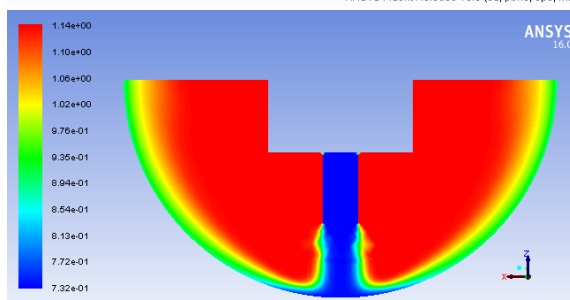
Contours of Static Temperature (K) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, spe, rke)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, spe, rke)



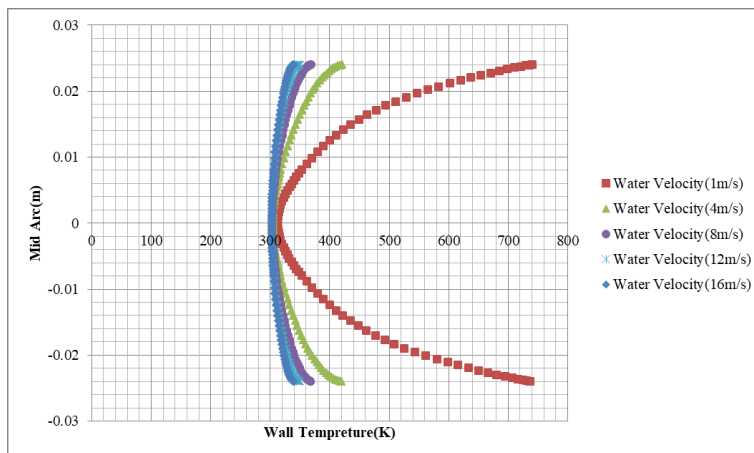
Contours of Wall Temperature (K) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, spe, rke)



Contours of Density (kg/m3) Sep 07, 2021 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, spe, rke)

شکل (۲۸-۱) کانتورهای مقطع میانی عبوری از جت هوا و توزیع دمای دیواره با سرعت جت آب ۱۶ متر بر ثانیه

همانطور در شکل (۲۹-۱) نشان داده شده است، کمینه کاهش دما در محل برخورد برای تمام حالات سرعت‌های جت ورودی آب رخ داده است. این مقدار برای همه حالات یکسان بوده است. اما در سرعت‌های بسیار پایین جت آب ورودی، گرادیان دمایی روی این خط بسیار زیاد بوده است. از طرفی با افزایش سرعت جت آب، این مقدار گرادیان کمتر شده و سطح مقعر به طور یکنواخت خنک شده و به دمای ۳۰۰ کلوین رسیده است. این کاهش دما در تمام حالات جریان آب به میزان ۵ درجه نسبت به جت‌های هوا بیشتر شده است.



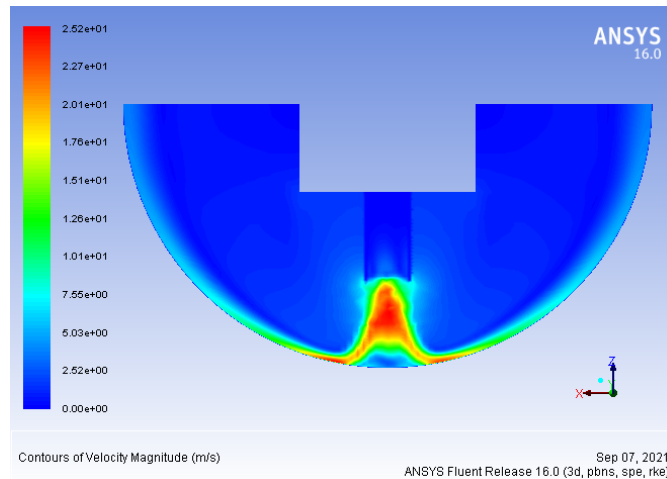
شکل (۲۹-۱) تغییرات دمای دیواره روی آرک میانی در سرعت‌های مختلف جت آب

## حل عددی خنک‌کاری سطح داغ انحنادار با روش اسپری آب

این نوع مدل‌سازی در راستای تکمیل تمام کارهای عددی انجام شده فوق بوده است. این مدل‌سازی روی هندسه انحنادار مقعر داغ بر اساس تنظیمات انجام شده توسط منتظری و همکارانش می‌باشد. به عبارت دیگر این بخش تکمیل تمام تکنیک-های خنک‌کاری رایج توسط آب اعم از جت یا اسپری جهت کاهش دمای دیواره بوده است. صورت مسئله حاضر به صورت حل عددی اویلر- لاگرانژی جریان گسسته آب در میدان پیوسته هوا می‌باشد. علت انتخاب این مدل به دلیل کوچک بودن مقدار دبی جریان آب که کسر حجمی کمتری نسبت به میدان هوا داشته است. از طرف دیگر مدل‌سازی اتمایزهای موجود در نرم افزار بر پایه این مدل قابل اعمال می‌باشند. استفاده از مدل دو فازی به صورت حل عددی اویلر-اویلری بوده و عملاً کسر حجمی دو فاز بزرگ و نزدیک بهم می‌باشد. اما در همین مدل دو فازی باید نوع اختلاط را فعال نمود که عملاً با توجه به تنظیمات مخلوط آب و هوا و DPM نیاز نمی‌باشد. در صورت فعال کردن اختلاط در مدل دو فازی، الگوریتم حل عوض شده و فشار و سرعت بهم کوپل خواهند شد. این موضوع خود سبب نگرانی در همگرایی حل می‌شود. شرط عدم تبخیر بسیار وابسته به تنظیمات پارامترهای بخش DPM نرم افزار است. به طور مثال افزایش سرعت پاشش، زاویه پاشش، فشار جریان آب، دما و سرعت جریان پیوسته موجب تبخیر جریان آب می‌شود در حالیکه افزایش قطر قطرات پاشش، دبی جریان آب موجب کاهش تبخیر جریان آب خواهد شد. لذا ایجاد شرایط بدون تبخیر به نوع مدل‌سازی و تنظیمات مربوط به آنژکتور توسط طراح بستگی دارد. البته این شرایط موجود در نرم افزار را می‌توان در واقعیت هم پیاده‌سازی کرد.

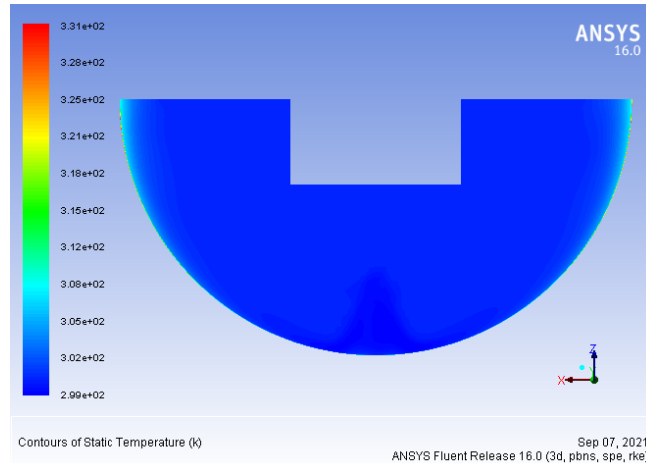
شرایط مرزی این حل به مانند شکل (۴-۱۵) می‌باشد. تفاوت اصلی مدل‌سازی اسپری به جای جت جریان است. شرایط جریان آب اتمایزر به گونه ای انتخاب شده است که به واقعیت و شرایط کار منتظری نزدیک باشد. اتخاذ شرایط نامناسب اتمایزر در بخش مدل‌سازی DPM نرم افزار موجب واگرایی حل عددی خواهد شد. نتایج حاصل از این مدل‌سازی به صورت اشکال زیر است.

شکل (۳۰-۱) کانتور سرعت مقطع میانی عبوری از جریان اسپری آب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، چتر پاشش آب بعد برخورد با سطح مقعر از سمت چپ و راست به سمت خروجی هدایت شده است. حداکثر سرعت جریان با تداخل با هوای میدان حل ۲۵ متر بر ثانیه بوده است.



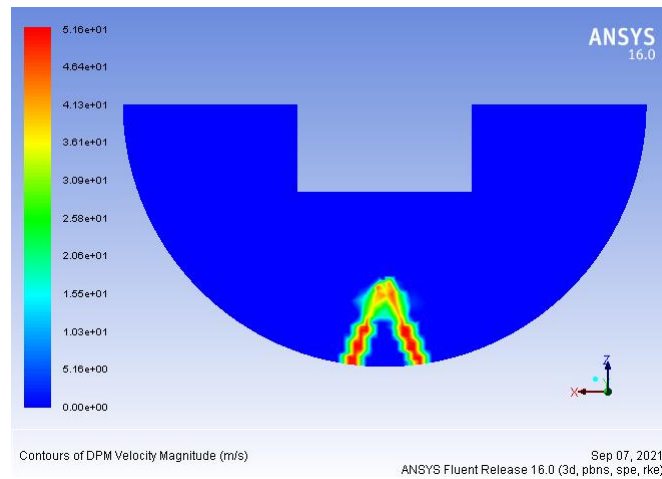
شکل (۱-۳۰) کانتور سرعت مقطع میانی عبوری از جریان اسپری آب

شکل (۱-۳۱) کانتور دما مقطع میانی عبوری از جریان اسپری آب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، دمای کل میدان نزدیک به ۳۰۰ کلوین بوده است. این دمای آب و هوا در حالت عادی می‌باشد.



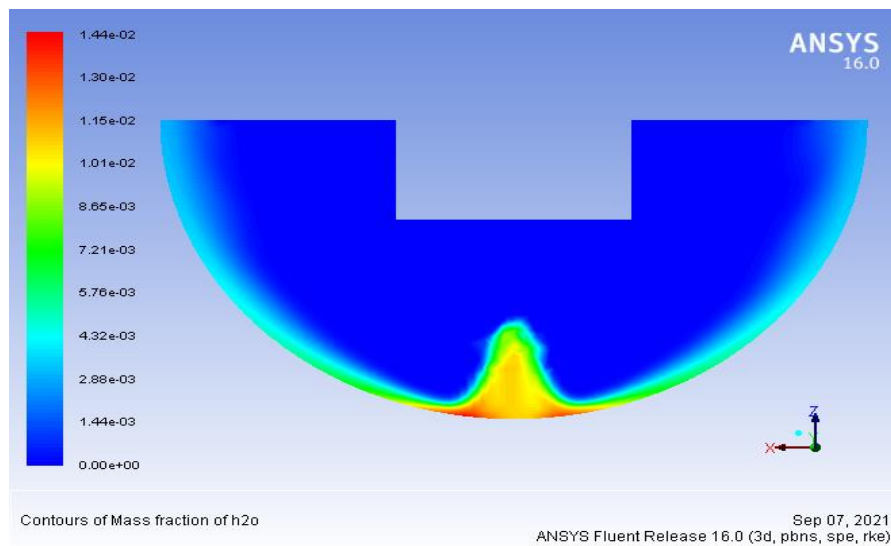
شکل (۱-۳۱) کانتور دما مقطع میانی عبوری از جریان اسپری آب

شکل (۱-۳۲) کانتور سرعت قطرات مقطع میانی عبوری از جریان اسپری آب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم سرعت قطرات فاز گسسته آب تا ۵۰ متر بر ثانیه می‌رسد. اما ماکزیمم سرعت مجموع هوا و آب نصف این میزان است. این نیز به دلیل اثرات تداخل و درگ بین دو جریان است.



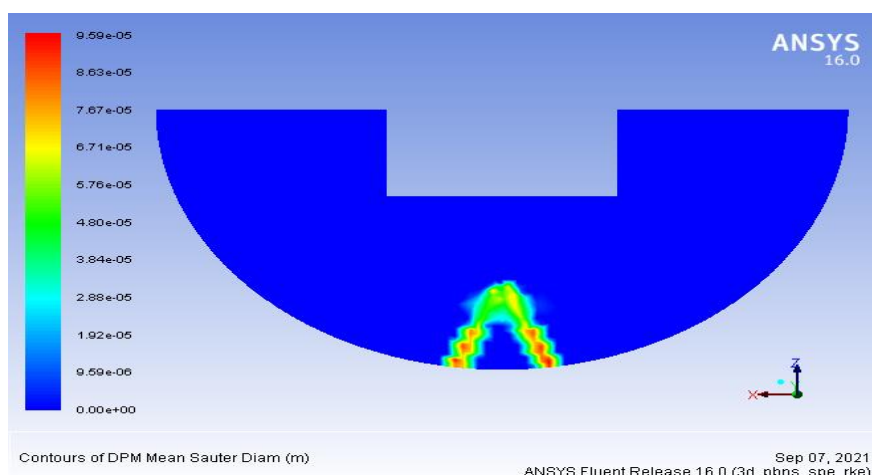
شکل (۱-۳۲) کانتور سرعت قطرات مقطعی میانی عبوری از جریان اسپری آب

شکل (۱-۳۳) کانتور کسر جرمی آب مقطعی میانی عبوری از جریان اسپری آب را نشان می‌دهد. این تصویر حرکت مسیر آب روی سطح انحنا دار و تمرکز انبوه آب در ناحیه برخورد را نشان می‌دهد.



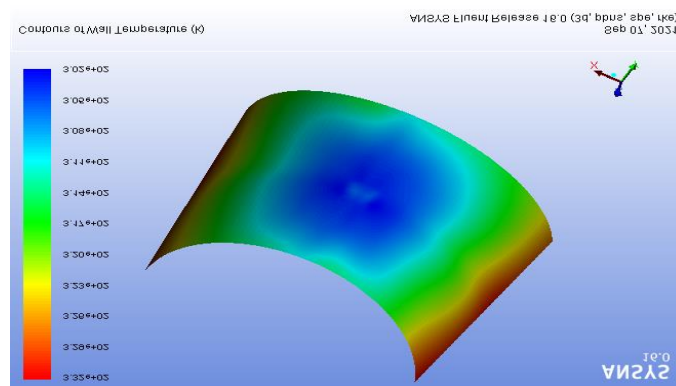
شکل (۱-۳۳) کانتور کسر جرمی آب مقطعی میانی عبوری از جریان اسپری آب

شکل (۱-۳۴) کانتور توزیع قطرات آب مقطعی میانی عبوری از جریان اسپری آب را نشان می‌دهد. این تصویر نشان دهنده مخروط پاشش بوده و اینکه اتمایزر مورد استفاده، قطراتی تا اندازه ۹۵ میکرومتر را ایجاد کرده است.



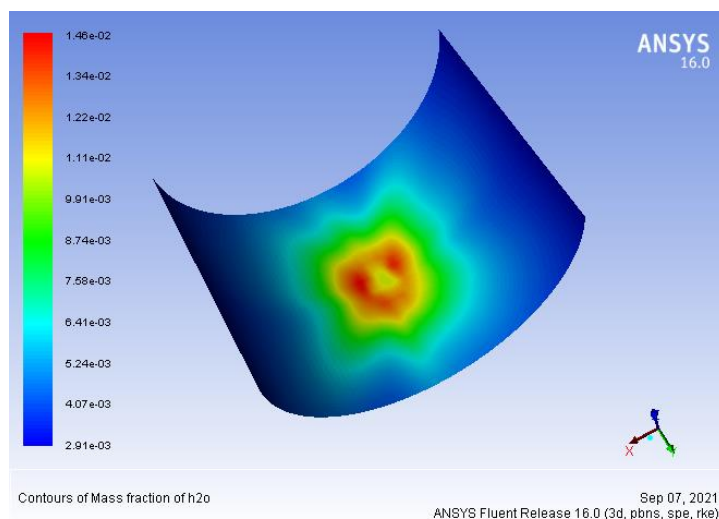
شکل (۱-۳۴) کانتور توزیع قطرات آب مقطع میانی عبوری از جریان اسپری آب

شکل (۱-۳۵) کانتور توزیع دمای دیواره مقعر بعد از برخورد جریان اسپری آب را نشان می‌دهد. در محل برخورد دما دیواره تا ۳۰۰ کلوین کاهش یافته است. همچنین سطح وسیعی از دیواره توسط جریان اسپری آب خنک شده است. کاهش دما به اندازه ای بوده است که بیشترین دما روی لبه‌های سطح ۳۳۰ کلوین می‌باشد. این شکل از کاهش دما در جریان جت برخوردی با سرعت ۱۶ متر بر ثانیه نیز دیده شده است. به عبارتی الگوی کاهش دمای دیواره با اتمایزر شبیه به جریان جت برخوردی با آب در سرعت بسیار بالا است. لذا استفاده از جت برخوردی با سرعت بالا یا اتمایزر با دبی کم برای کاهش دمای سطح داغ بسیار مطلوب است..



شکل (۱-۳۵) کانتور توزیع دمای دیواره مقعر بعد از برخورد جریان اسپری آب

شکل (۱-۳۶) کانتور کسر جرمی آب روی دیواره مقعر بعد از برخورد جریان اسپری آب را نشان می‌دهد. در نواحی با کسر آب زیاد، کاهش دمای سطح دیواره نیز بیشتر بوده است.



شکل (۳۶-۱) کانتور کسر جرمی آب روی دمای دیواره مقعر بعد از برخورد جریان اسپری آب

## منابع

- [1] Choi M., Yoo H.S., Yang G., Lee J.S., Sohn D.K., "Measurement of Impinging Jet Flow and Heat Transfer on a Semi-Circular Concave Surface", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, 2000, pp. 1811-1822.
- [2] H. Montazeri, B. Blocken, J.L.M. Hensen "Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis" a Building and Environment 83 (2015) 129e141.
- [3] Zumbrennen D.A., Aziz M., "Convective Heat Transfer Enhancement Due to Intermittency in an Impinging Jet", Journal of Heat Transfer, Vol. 115, 1993, pp. 91-98.
- [4] Sheriff H.S., Zumbrennen D.A., "Effect of Flow Pulsations on the Cooling Effectiveness of an Impinging Jet", Journal of Heat Transfer, Vol. 116, 1994, pp. 886-895.
- [5] Hofmann H.M., Movileanu D.L., Kind M., Martin H., "Influence of a Pulsation on Heat Transfer and Flow Structure in Submerged Impinging Jets", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, 2007, pp. 3638-3648.
- [6] Liewkongsatoporn W., Ahrens F., Patterson T., "A Numerical Study of Axisymmetric Pulsating Jet Impingement Heat Transfer", 13th International heat transfer conference, 2006, pp. 13-18.
- [7] Behera R.C., Dutta P., Srinivasan K., "Numerical Study of Interrupted Impinging Jets for Cooling of Electronics", IEEE Transactions on Components and Packag Technologies, Vol. 30, 2007, pp. 275- 284.
- [8] Liewkongsatoporn W., Patterson T., Ahrens F., "Pulsating Jet Impingement Heat Transfer Enhancement", Journal of Drying Technology, Vol. 26 , 2008, pp. 433-442.
- [9] Xu P., Mujumdar A.S., Poh H.J., Yu B.M., "Heat Transfer Under a Pulsed Slot Turbulent Impinging Jet at Large Temperature Differences", Thermal Science, Vol. 14, 2010, pp. 271-281.



- [10] Demircan T., Turkoglu H., "The Numerical Analysis of Oscillating Rectangular Impinging Jets", Numerical Heat Transfer, Vol. 58, 2010, pp. 146-161.
- [11] Xu P., Yu B.M., Qiu S.X., Poh H.J., Mujumdar A.S., "Turbulent Impinging Jet Heat Transfer Enhancement Due to Intermittent Pulsation", International Journal of Thermal Science, Vol. 49, 2010, pp. 1247-1252.
- [12] Bazdidi-Tehrani, F., Karami, M., and Jahromi, M., "Unsteady Flow and Heat Transfer Analysis of an Impinging Synthetic Jet", Heat and Mass Transfer, Vol. 47, Issue 11, 2011, pp. 1363-1373.
- [13] Sharif M.A.R., Mothe K.K., "Parametric Study of Turbulent Slot-Jet Impingement Heat Transfer from Concave Cylindrical Surfaces", International Journal Therm. Sci. Vol. 49, 2010, pp. 428-442.
- [14] Wen-Xiao Chu, Kuan-Chang Huang, Mohammed Amer and Chi-Chuan Wang "Experimental and numerical investigations on jet impingement cooling for electronic modules", Journal of Heat Transfer. Received February 13, 2019.
- [15] Masoumeh Jafari "Analysis of Heat Transfer in Spray Cooling Systems Using Numerical Simulations" Degree of Master of Applied Science at the University of Windsor, 2013.
- [16] M.R. Guechi, P. Desevaux, P. Baucour "On the Numerical and Experimental Study of Spray Cooling" sage journal First Published December 1, 2013.
- [17] Milan Hnizdil, Martin Chabicovsky, Miroslav Raudensky, Tae-Woo Lee "Heat Transfer during Spray Cooling of Flat Surfaces with Water at Large Reynolds Numbers" January 2016 Journal of Flow Control, Measurement & Visualization 04(03):104-113.
- [18] Labergue, T. Aiguier, M. Gradeck, F. Lemoine, "Comparative Study of the Cooling of a Hot Temperature Surface Using Sprays and Liquid Jet "
- [19] Abdullah Alkhedhair, Ingo Jahn, Hal Gurgenci, Zhiqiang Guan, Suoying He "Parametric study on spray cooling system for optimising nozzle design with pre-cooling application in natural draft dry cooling towers" International Journal of Thermal Sciences 104 (2016) 448e460.
- [20] Peiliang Yan, Hong Liu\*, Chang Cai, Jiuliang Gao, Hongchao Yin "Numerical simulation on multiphase spray cooling" IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 100 (2017) 012082 doi:10.1088/1755-1315/100/1/012082.
- [21] Jinlong Xie, Hsiao Mun Lee, and Jianhua Xiang "Multi-nozzle Closed Loop Spray Cooling Systems in Electronics Cooling" IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 189 (2018) 022062 doi :10.1088/1755-1315/189/2/022062.
- [22] M. Cucumo, V. Ferraro, A. Galloro, D. Gullo, D. Kaliakatsos, F. Nicoletti " Computational Fluid Dynamics Simulations to Evaluate the Performance Improvement for Air-cooler Equipped with a Water Spray System" TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science Vol. 63, No. 2-4, June, 2019, pp. 158-166.
- [23] L. Bayvel and Z. Orzechowski, "Liquid Atomization", Taylor & Francis; 1st edition, 1993
- [۲۴] م. صنیعی نژاد، مبانی جریان‌های آشفته و مدل سازی آنها، نشر دانش نگار، ۱۳۸۸.
- [25] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang and J. Zhu, "A new k- $\epsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows- Model Development and Validation", Computers Fluids, Volume. 24(3), pp.227-238, 1995.
- [26] V. Yakhot and S. A. Orszag, "Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory," Journal of Scientific Computing, volume. 1. pp. 3-51, 1986.
- [27] D. Choudhury, "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling", Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107, 1993.
- [28] ANSYS FLUENT User's Manual, Version 15.0, 2013.

- [29] J. H. Park, Y. Yoon and S. S. Hwang, "Improved Tab-Model for Prediction of Spray Droplet Deformation and Breakup, atomization and Sprays", Volume 12, pp. 387-402, 2002.
- [30] A. Berlemont, M. S. Grancher and G. Gouesbet, "Heat and mass transfer coupling between vaporizing droplets and turbulence using a Lagrangian approach", Heat and Mass Transfer, Volume 38, pp- 3023-3-34, 1995.
- [31] P. K. Senecal, D. P. Schmidt, I. Nouar, C. J. Rutland, and R. D. Reitz, "Modeling High Speed Viscous Liquid Sheet Atomization". International Journal of Multiphase Flow, Volume 25, pp. 1073-1097, 1999.
- [32] T. F. Smith, Z. F. Shen and J. N. Friedman, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model". J. Heat Transfer, Volume 104, pp. 602-608, 1982.
- V. G. McDonnell and G. S. Samuelsen, "Influence of the Continuous and Dispersed Phases on the Symmetry of a Gas Turbine Air-Blast Atomizer", Gas Turbine Power, Volume 112, pp-44-51, 1990.