

## حل عددی انتقال حرارت مکش و جریان موازی درون صفحات سوراخدار دایروی تحت اشعه خورشید

محمد مقیمیان، بهنام رحمانیان<sup>۱</sup>، محمد رضا صفائی<sup>۲</sup> و مرجان گودرزی<sup>۳</sup>  
Rahmanian\_Behnam@yahoo.com

### چکیده

در آینده بسیار نزدیک، جمع‌کننده‌های مشبک خورشیدی بدون شیشه به طور گسترده‌ای در سراسر دنیا، برای پیش‌گرم نمودن هوا مورد استفاده قرار خواهند گرفت. پیش‌گرم کردن هوای ساختمانها، فضاها بزرگ و گرم نمودن هوا به منظور خشک کردن محصولات کشاورزی، چند نمونه از کاربردهای این جمع‌کننده‌ها می‌باشند. هوای محیط به طور مستقیم از طریق یک مکنده، به داخل منافذ تعبیه شده بر روی صفحه جاذب (صفحه بدون شیشه ای که با رنگ تیره پوشیده شده است) که در مقابل آفتاب قرار دارد، کشیده شده و این امر باعث گرم شدن هوای مکیده شده خواهد شد. عملکرد این صفحات وابسته به پارامترهای متعددی از قبیل هندسه و نوع منافذ، سرعت مکش و همچنین جهت باد خواهد بود. در این پژوهش، با به‌کارگیری روش حجم محدود، نقشی که باد در عملکرد حرارتی این صفحات بازی می‌کند، بررسی شده است. در این مطالعه، صفحات با منافذ دایره ای شکل و در دو چیدمان مربعی و مثلثی در نظر گرفته شده‌اند و سعی شده که دامنه در نظر گرفته شده، برای پارامترهای مستقل مسئله، نظیر ضریب تخلخل، سرعت مکش، ضخامت صفحه، ضریب گذر حرارتی و سرعت باد دامنه عملی این پارامترها را نیز، در برگیرد. نتایج نشان می‌دهد عملکرد حرارتی صفحات مشبک وابسته به شش پارامتر بدون بعد بوده که مهم‌ترین آنها پارامتر رینولدز درون سوراخ بوده و کم‌اهمیت‌ترین این پارامترها، ناسلت تشعشعی می‌باشد. نیز بررسی تغییرات فشار در پشت این صفحات این نتیجه را حاصل نمود که موثرترین پارامتر بر روی این تغییرات، پارامتر ضریب تخلخل بوده و با تغییر این پارامتر، تغییرات شدید افت فشار رخ خواهد داد. همچنین، در شرایط مشابه کاری، کارایی جمع‌کننده هائی با چیدمان مثلثی بیشتر از کارائی جمع‌کننده هائی با چیدمان مربعی است.

### کلید واژه:

جمع‌کننده خورشیدی مشبک بدون شیشه - روش حجم محدود - صفحه سوراخدار مثلثی شکل - عدد ناسلت تشعشعی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوا فضا، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک و عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۳- کارشناس مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

## ۱- مقدمه

بروز بحران کمبود نفت در سالهای اخیر و شروع نگرانی‌های مربوط به مسایل آلودگی محیط زیست، کشورهای جهان به ویژه کشورهای صنعتی توسعه یافته را بر آن داشته تا از انرژی‌های تجدیدپذیر بهره بیشتری ببرند. این نوع انرژی‌ها که به آنها انرژی‌های نو نیز گفته می‌شود، شامل انرژی خورشیدی، باد، زمین گرمایی، هیدروژن و امواج دریاست. لازم به ذکر است که فقط انرژی خورشیدی در حال تابش بر سطح ایران، بیش از دو برابر انرژی مصرفی کل جهان است و فقط نیرویی لازم است تا آن را مهار کند. لذا، استفاده از صفحات مشبک به عنوان صفحه جاذب در کلکتورهای خورشیدی هوا گرمکن، مدتی است که توجه محققان را به خود جلب کرده است. بر خلاف کلکتورهای هوا گرمکن معمول که علاوه بر صفحه جاذب، باید از پوشش شفاف (شیشه) و عایق مناسب و جعبه محافظ در آنها استفاده نمود، کلکتورهای با صفحه مشبک هیچگونه پوشش شفافی ندارند و لزومی به عایق کاری در آنها نیست. هزینه آنها بسیار کمتر از کلکتورهای معمولی و بازده حرارتی آنها بیشتر است. علاوه بر این مزایا، در حالی که کلکتورهای معمولی باید در اندازه‌های کوچک (معمولاً  $1m \times 2m$ ) تولید شده و سپس به صورت سری یا موازی بهم متصل گردند، کلکتورهای مشبک بدون شیشه را می‌توان در اندازه‌های بسیار بزرگ و به طور یکپارچه ساخت. مصرف عمده این کلکتورها در پیش گرم نمودن هوا به منظور تهویه فضاهای بزرگ اعم از کارخانجات، کارگاهها، ساختمانهای بزرگ و ... می‌باشد، هر چند کاربردهای دیگری همچون خشک کردن محصولات کشاورزی و رطوبت زدایی از مواد رطوبت گیر نیز گزارش شده است. اجزا تشکیل دهنده این کلکتورها عبارتند از:

۱- صفحه جاذب مشبک که منافذ آن به صورت شیار یا سوراخ می‌باشد.

۲- پایه‌های نگهدارنده که صفحه جاذب را به فاصله‌ای معین از دیوار نگه می‌دارد.

۳- دستگاه مکنده هوا

۴- سیستم توزیع هوای گرم

نصب این کلکتورها ساده بود و عمدتاً بر روی دیوارهای جنوبی ساختمان نصب می‌شود.

عملکرد کلکتورهای مشبک بدون شیشه بر پایه مکش هوا از درون منافذ صفحه می‌باشد. مکش باعث می‌شود سیال در هنگام عبور از درون منفذ، گرمای صفحه را جذب کرده و به فضای مورد نظر منتقل نماید. علیرغم آنکه در کلکتورهای معمولی، شیشه برای محافظت صفحه جاذب از حمله باد و در نتیجه از دست دادن حرارت از طریق جابجایی است و نیز مانع تلف شدن حرارت جذب

شده صفحه به صورت تابش به محیط می‌شود، در کلکتورهای مشبک بدون شیشه وجود باد یک مزیت بوده و موجب چسبیده شدن بیشتر لایه مرزی به صفحه می‌گردد و ضریب کارایی صفحه را افزایش می‌دهد. همچنین مکیده شدن هوای محیط از درون منافذ، از زیاد گرم شدن صفحه جلوگیری کرده و تلفات تابشی به محیط را بسیار کم می‌کند [۱]. مزایای فوق اعم از سادگی ساخت، ارزانی، عدم نیاز به شیشه و در نتیجه خلاصی از مسائل تمیز کردن مداوم شیشه و تعویض دم به دم آن به علت شکستگی، باعث شده است تا عملکرد این کلکتورها در شرایط مختلف اقلیمی مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف اعم از شکل هندسی منافذ صفحه و اندازه آنها، فاصله منافذ از یکدیگر و نحوه آرایش آنها، ضریب جذب تشعشع صفحه و ضریب صدور تابشی آن و غیره بررسی گردد.

بررسی‌های آزمایشگاهی در مورد عملکرد و طراحی هواگرمکن های مشبک بدون شیشه برای منافذ شیار مانند توسط گلنشن و هولاندس [۲] برای اولین بار انجام شد. کوتچر و جاولیک و همکارانش [۳، ۴، ۵] با اعمال تئوری لایه مرزی ضخامت لایه مرزی، طول شروع و اتلاف انرژی برای صفحات مشبک با مکش پیوسته را تخمین زدند و مدلی را برای کارایی حرارتی آنها ارائه دادند. معادلاتی که کوتچر و همکارانش [۳، ۴، ۵] برای حل مسئله مورد استفاده قرار دادند، معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی در دو بعد بودند. باقری نژاد [۶] با بسط دادن مسئله صفحات شیاردار تحت مکش، حرکت موازی باد نسبت به صفحات را به گونه‌ای در نظر گرفت که راستای وزش باد به موازات امتداد شیارها باشد.

گلنشن [۱]، به شیوه‌ای بسیار عملی‌تر مسئله صفحات شیاردار را بررسی و تحلیل نمود. وی با استفاده از نرم افزار FLUENT و به صورت عددی، صفحات شیاردار تحت مکش را در وضعیتی که باد موازی با صفحه و در جهات مختلف نسبت به راستای شیارها می‌وزد، بررسی نمود. تحقیق عددی دیگری نیز توسط ارونلاندام و هولاندس [۷] و به وسیله نرم افزار تجاری TASCflow انجام گرفت که مدل ضریب عملکرد را برای صفحات سوراخ دار با منافذی که به صورت مربعی چیده شده بودند و از وجود باد نیز صرف نظر شده بود به دست می‌داد. دسکر و هولاندس [۸ و ۹] آزمایشاتی بر روی صفحات سوراخ دار انجام داد و نتایجی را به صورت آزمایشگاهی و عملی در شرایط موجود به دست آورد. در آزمایشات دسکر و هولاندس [۸ و ۹]، جهت باد ثابت در نظر گرفته شد و تنها از یک جهت به این صفحات باد می‌وزید. تاکنون تحلیل عددی برای مسئله صفحات سوراخ دار در شرایطی که وزش باد در راستای موازی با صفحه وجود داشته باشد، انجام نگرفته است. در تحقیق حاضر با بهره گیری از نرم افزار Fluent به بررسی این موضوع پرداخته

- ۲- خواص سیال اعم از لزجت، جرم حجمی، ضریب انتقال حرارت و نظایر آنها در هر سه جهت ثابت و برابر با هم است.
- ۳- وزش هوا به صورت موازی با سطح صفحه و در راستای قرار گرفتن سوراخ ها می باشد.
- ۴- افت فشار در راستای وزش باد وجود ندارد.
- ۵- از نیروی جاذبه صرف نظر شده است.

#### ۴- شرایط مرزی

- ۱- در صفحه  $y = y_\infty$ ، شرط مرزی به صورت سرعت ورودی از بالای صفحه که  $v_0$  می باشد، بوده و دما در این صفحه، دمای محیط  $T_\infty$  می باشد.
- ۲- در صفحات  $Z = \frac{P}{2}$  و  $Z = 0$  برای حالت مربعی و صفحات  $Z = 0$ ،  $Z = P$  در حالت مثلثی، از خاصیت تقارن هندسی استفاده شده و شرط مرزی به صورت متقارن در نظر گرفته شده است.
- ۳- در صفحات  $x = 0$  و  $x = P$  شرط مرزی متناوب در نظر گرفته شده است.
- ۴- بر روی صفحه  $(y = t)$  از شرط عدم لغزش روی سطح استفاده شده است.
- ۵- سرعت در پشت صفحه و قسمتی که سیال از سوراخ ها خارج می شود ( $y = 0$ ) مشخص است و دما در این ناحیه نیز از درون میدان محاسبه می شود.
- ۶- شرط مرزی در پشت صفحه و قسمتی که جامد است، به صورت عایق فرض شده است.
- لازم به ذکر است که در تمام محاسبات انجام شده،  $\alpha G$  برابر ۷۰۰ در نظر گرفته شده است.

#### ۵- تاثیر وجود جابه جایی آزاد در جریان

اگر جریان سیال بر روی این صفحات در سرعت کم صورت گرفته و سرعت مکش نیز پایین باشد، انتقال حرارت می تواند به صورت جابجایی آزاد نیز از صفحه به سیال صورت گیرد. در صورت وجود این نوع انتقال حرارت، باید آن را در محاسبات وارد نمود. برای بررسی اثر این نوع جریان می توان از کسر  $\frac{Gr}{Re_\infty^2}$  استفاده کرد. این کسر نشان دهنده تاثیر و یا عدم تاثیر جریان جا به جایی آزاد می باشد. در صورتی که این کسر خیلی کوچک تر از یک باشد، از اثر انتقال حرارت جابجایی آزاد می توان صرف نظر کرد. به عنوان نمونه، یکی از حالت ها بررسی شده اند. اگر:

$$Re_D = 132.7367, \quad \frac{v_0}{U_\infty} = 0.04, \quad h_i = 6.2$$

می شود. در این مطالعه، جهت وزش باد موازی با راستای آرایش سوراخ فرض شده و جهت آن تغییر نمی کند.

#### ۲- بیان مسئله

صفحه مشبک سوراخ داری را در نظر گرفته که جریان باد به طور موازی با آن، روی سطح در حال وزش است و هوا در اثر مکش، از قسمت زیرین لایه مرزی به داخل سوراخ ها مکیده می شود که در این صورت جریان بر روی صفحه، به صورت سه بعدی خواهد بود. علی رغم بررسی های علمی که تاکنون بر روی این گونه صفحات انجام شده، تنها یک بررسی به صورت عددی گزارش گردیده که در آن بررسی، از اثر وجود باد صرف نظر شده و آرایش سوراخ ها به صورت مربعی بوده است. هدف از انجام پژوهش حاضر، تحقیق و بررسی اثر وزش باد بر عملکرد حرارتی صفحات سوراخ دار با آرایش مربعی و مثلثی می باشد. شکل های (۱ و ۲) طرحواره مسئله را نشان می دهند.

معادلاتی که بر جریان روی صفحه مشبک حاکم است، در دستگاه مختصات دکارتی عبارتند از:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \quad (2)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \quad (3)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \quad (4)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi \quad (5)$$

که  $\phi$  برابر با گرمای تولید شده توسط اصطکاک درونی ناشی از تغییرات سرعت سیال بوده و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\phi = 2\mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \quad (6)$$

$$\mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

#### ۳- فرضیات

برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال روی صفحات سوراخ دار، از فرضیات زیر استفاده شده است:

- ۱- جریان سیال آرام، غیر قابل تراکم و دائمی است.

$$T = 300K, \quad P = 0.01m$$

باشند، آنگاه:

$$0.32mm \leq D \leq 7.5mm$$

$$5mm \leq P \leq 25mm$$

$$0.032mm \leq t \leq 37mm$$

$$0.3(m/s) \leq U_\infty \leq 160$$

$$0.001(m/s) \leq v_0 \leq 0.5(m/s)$$

$$0.1(W/m^{\circ}C) \leq k_s \leq 160(W/m^{\circ}C)$$

$$Re_D = 132.7367 \Rightarrow$$

$$v_h = 1.495711(m/s) \Rightarrow$$

$$v_0 = 0.02962(m/s)$$

$$\frac{v_0}{U_\infty} = 0.04 \Rightarrow 0.74(m/s) \Rightarrow$$

$$Re_p = \frac{PU_\infty}{\nu} = 413.546$$

$$h_r = 6.2 \Rightarrow T_w = 322.5(K)$$

$$Gr = \frac{\beta g (T_w - T_\infty) P^3}{\nu^2} = 2296.8798$$

$$\Rightarrow \frac{Gr}{Re_r^2} = 0.0134 \ll 1$$

پس می‌توان نتیجه گرفت که حل مسئله بدون در نظر گرفتن اثر جریان و انتقال حرارت جابه جایی آزاد، مشکلی نداشته و جواب‌های قابل قبولی خواهد داشت. باید توجه داشت که با افزایش سرعت باد و سرعت مکش، این عدد کمتر نیز خواهد بود.

#### ۶- محدوده پارامترها

جریان حرکت سیال و انتقال حرارت آن در صفحات مشبک در صورتی که جهت وزش هوا، موازی با راستای آرایش سوراخ‌ها باشد با توجه به فرم بدون بعد معادلات (۳-۱) تا (۳-۵) تابع شش پارامتر زیر خواهد بود:

$$x_1 = F = \frac{v_0}{U_\infty}$$

$$\sigma = x_2 = \frac{\pi D^2}{4P^2}$$

$$x_3 = \frac{v_h D}{D}$$

$$x_4 = \pi \frac{k_s t D}{k_a P^2}$$

$$x_5 = \frac{t}{D}$$

$$x_6 = Nu_r = \frac{h_r D}{k_a}$$

محدوده این پارامترها به شرح زیر است:

$$0.004 \leq x_1 \leq 0.08$$

$$0.0033 \leq x_2 \leq 0.08$$

$$50 \leq x_3 \leq 800$$

$$0.5 \leq x_4 \leq 300$$

$$0.1 \leq x_5 \leq 5$$

$$x_6 = Nu_r = \frac{6.2D}{k_a}$$

#### ۷- روش حل عددی

در این مطالعه، برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی، از روش حجم محدود که به طور کامل در [۱۰] بیان شده، استفاده شده است. در اینجا توضیح مختصری در مورد این روش ارائه می‌شود. در روش حجم محدود، کار با تقسیم حوزه محاسباتی به تعداد محدودی حجم کنترل شروع می‌شود. گره‌های شبکه در مراکز حجم‌های کنترل قرار گرفته است. در مرحله بعدی بایستی از معادلات حاکم روی حجم‌های کنترل انتگرال‌گیری شود که در این صورت معادلات دیفرانسیل حاکم با یک دستگاه معادلات جبری جایگزین خواهد شد که برای این کار از روش گسسته‌سازی جدا از هم استفاده شده است. مقادیر هر گره در متغیرهای موجود در معادلات جبری موجود است. همچنین برای تفکیک متغیرهای سرعت و فشار، از الگوریتم سیمپل [۱۰] استفاده شده است. سپس برای حل دستگاه معادلات جبری روش حل خط به خط ماتریسهایی قطری (TDMA) بکار گرفته شده است. و معادله بدست آمده با روش حجم کنترل حل شده است.

همچنین روش حل معادلات تشعشع، روش (DO) Discret Ordinates می‌باشد. تعداد کل گره‌های شبکه برای هر دو حجم جامد و سیال در حدود ۲۲۵۰۰۰ گره می‌باشد که در سه راستا، حدوداً برابر (۵۰×۹۰×۵۰) می‌باشد. شکل (۳) المانی از صفحه جاذب سوراخ‌دار را نشان می‌دهد که در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین شکل‌های (۴و۵) شبکه تولیدی برای صفحات سوراخدار با آرایش مربعی و مثلثی را نشان می‌دهد.

#### ۸- گسسته‌سازی معادلات در روش جدا از هم

نرم‌افزار FLUENT با استفاده از روش حجم محدود، معادلات حاکم را به معادلات جبری قابل حل تبدیل می‌کند که به صورت انتگرال‌گیری بر روی حجم معیار خواهد بود. جداسازی معادلات را می‌توان به سادگی با در نظر گرفتن بقای خاصیت  $\phi$  نشان داد که برای یک حجم معیار خواهیم داشت:

$$\oint \rho \phi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi d\vec{A} + \int \dot{S}_\phi dV \quad (7)$$

به عنوان مثال معادله اندازه حرکت در جهت  $x$  را با در نظر گرفتن  $\varphi = u$  می توان به صورت زیر گسسته کرد:

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f \bar{i}A + S \quad (11)$$

اگر میدان فشار و نرخ جرمی گذرنده از سطوح معلوم باشد معادله (۱۱) را می توان با روش های گفته شده حل نمود و میدان سرعت را مشخص کرد. اما میدان فشار و شار جرمی گذرنده از سطوح، از قبل مشخص نیستند و باید به عنوان قسمتی از حل مسأله، محاسبه شوند. از آن جا که FLUENT مقادیر فشار و سرعت را در مرکز سلول ها ذخیره می کند هرگاه نیاز به مقدار فشار روی سطح باشد با استفاده از مقادیر فشار در مرکز سلول ها، مقادیر فشار روی سطوح را میان یابی می کند که البته این عمل با این فرض انجام می شود که تغییرات فشار بین سلول ها هموار است. معادله پیوستگی (۹) با انتگرال گیری روی حجم معیار به صورت زیر نوشته می شود:

$$\sum_{f \in \text{faces}} J_f = 0 \quad (12)$$

که در آن  $J_f$  نرخ گذر جرمی از سطح  $f$  می باشد به عبارت دیگر:

$$\sum_{f \in \text{faces}} \rho \mathcal{V}_f A_f = 0 \quad (13)$$

همان طور که گفته شد در روش جدا از هم، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به ترتیب حل می شوند. در این شیوه، معادله پیوستگی، به عنوان یک معادله برای فشار به کار می رود. اما برای جریان تراکم ناپذیر، فشار در معادله (۱۲) به صورت صحیح ظاهر نمی شود (چون جرم حجمی به طور مستقیم با فشار در ارتباط نمی باشد). برای ادامه حل، لازم است که مقادیر سرعت عمود بر سطح مرزها با مقادیر سرعت مربوط به مرکز سلول ها ارتباط یابند. ولی مقادیر سرعت ها در سطوح، متوسط خطی سرعت ها در مرکز سلول نبوده و از تابع وزنی اندازه حرکت  $(a_p)$  استفاده می شود. با استفاده از این روش، شار جرمی گذرنده از سطح به صورت زیر نوشته می شود:

$$J_f = \dot{J}_f + d_f (p_{e0} - p_{e1}) \quad (14)$$

که در آن  $p_{e0}, p_{e1}$  فشار دو سلول طرفین سطح می باشند و  $J_f$  تأثیر سرعت ها در این سلول ها می باشند. عبارت  $d_f$  را می توان به صورت زیر نوشت:

$$d_f = \frac{\rho A_f^2}{\bar{a}_p} \quad (15)$$

و  $\bar{a}_p$  متوسط  $a_p$  مربوط به سلول ها اطراف سطح است.

$\rho$ : جرم حجمی سیال

$\vec{V}$ : بردار سرعت

$\bar{A}$ : بردار مساحت سطح

$\Gamma_\varphi$ : ضریب پخش  $\varphi$

$\vec{\bar{V}}_\varphi$ : گرادیان  $\varphi$

$S_\varphi$ : منبع تولید  $\varphi$  بر واحد حجم

معادله (۷) برای هر حجم معیار یا سلول در دامنه محاسباتی به کار می رود. شکل (۶) سلولی به صورت مثلثی و دوبعدی از این نوع حجم معیار را نشان می دهد، که برای این حجم خواهیم داشت:

$$\sum_{f \in \text{faces}} V_f \varphi_f A_f = \sum_{f \in \text{faces}} \Gamma_\varphi (\nabla \varphi)_n A_f + S_\varphi V \quad (8)$$

$N_{\text{faces}}$ : تعداد سطوح سلول

$\varphi_f$ : مقدار  $\varphi$ ، جابه جا شده از سطح  $f$

$V_f$ : شار جرمی گذرنده از سطح  $f$

$A_f$ : مساحت سطح  $f$  در دو بعد

$(\nabla \varphi)_n$ : مقدار  $\nabla \varphi$  عمود بر سطح  $f$

$V$ : حجم سلول

نرم افزار، مقادیر گسسته اسکالر  $\varphi$  را در مرکز سلول ها ذخیره می کند. اما مقادیر  $\varphi_f$  روی سطوح سلول که برای عبارت های جابه جایی مورد نیاز است باید از مقادیر مرکزی سلول ها میان یابی شوند، که توسط طرح بالادست انجام می شود. طرح بالادست، به این معنی است که مقادیر  $\varphi_f$  روی سطوح از کمیت های سلول هایی که در بالادست جریان (نسبت به جهت بردار عمودی سرعت در معادله (۸) قرار دارند، به دست می آید. هنگامی که دقت مرتبه اول مورد نیاز باشد، کمیت های سطوح سلول با این فرض که در هر میدان، مقادیر مرکزی سلول نشان دهنده میانگین آن در کل سلول است، محاسبه می شود که این فرض به طرح بالادست مرتبه اول معروف است. بنابراین در طرح بالادست مرتبه اول مقدار  $\varphi_f$  با مقدار  $\varphi$  در مرکز سلول بالادست جریان، یکسان است. حال به گسسته سازی معادلات اندازه حرکت و پیوستگی می پردازیم که به سادگی با در نظر گرفتن معادلات انتگرالی پیوستگی و اندازه حرکت قابل توضیح است.

$$\oint \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (9)$$

$$\oint \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = -\oint \rho \vec{T} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \int \vec{F} dV \quad (10)$$

که  $\vec{T}$  ماتریس واحد،  $\vec{\tau}$  تانسور تنش و  $\vec{F}$  بردار نیروی جسمی است.

با استفاده از روش های گسسته سازی گفته شده برای گسسته نمودن یک معادله غیر برداری، می توان معادله اندازه حرکت را گسسته نمود.

## ۹- نتایج و بحث

## ۹-۱- لایه مرزی گرمایی در مسیر جریان هوا از روی

## سوراخ‌ها در آرایش مربعی

در شکل (۷) هوا با سرعت  $10\text{ m/s}$  در راستای بردار  $x$  حرکت کرده و ضمن عبور از صفحه، لایه مرزی حرارتی تشکیل داده است. هوای گرم شده نیز توسط فن مکش به درون سوراخ کشیده می‌شود.

## ۹-۲- لایه مرزی گرمایی داخل سوراخ در مسیر جریان هوا

## در آرایش مربعی

در شکل (۸) قسمت ورودی جریان (سوراخ) نشان داده شده است که به علت جریان برگشتی (ویک) که در سوراخ به وجود آمده، دمای هوا بالاتر رفته و سپس به درون مجرا راه پیدا می‌کند.

## ۹-۳- لایه مرزی گرمایی در مسیر جریان هوا در حفاصل

## بین سوراخ‌ها در آرایش مربعی

در شکل (۹) هوا با سرعت  $10\text{ m/s}$  در راستای بردار  $x$  حرکت می‌کند. چون در حفاصل بین سوراخ‌ها در این مسیر سوراخی وجود ندارد، لایه مرزی به تدریج بزرگ‌تر می‌شود. این گراف عیب صفحات سوراخ‌دار با آرایش مربعی را نشان داده است. زیرا هوایی که در حد فاصل بین سوراخ‌ها جریان دارد گرم شده و بدون استفاده از آن، از سمت دیگر صفحه بیرون می‌رود.

## ۹-۴- لایه مرزی گرمایی در مسیر جریان هوا از روی سوراخ‌ها

## در آرایش مثلثی

در شکل (۱۰) هوا با سرعت  $10\text{ m/s}$  در راستای محور  $x$  به سمت صفحه در حرکت می‌باشد. مقادیر توزیع دما بر روی صفحه در آرایش مثلثی نشان داده شده است. حسن صفحات سوراخ‌دار با آرایش مثلثی در این است که اگر هوا در هر فاصله از صفحه در راستای محور  $z$  حرکت کند، در مسیر خود به سوراخی رسیده و انتقال حرارت به صورت کامل‌تر از آرایش مربعی صورت می‌گیرد.

## ۹-۵- مقادیر سرعت جریان هوا در روی صفحه و داخل

## سوراخ در آرایش مربعی

در شکل (۱۱) مقادیر جزء به جزء سرعت در لایه مرزی و درون سوراخ نشان داده شده است. همچنین جریان برگشتی (ویک) به وجود آمده در جداره سوراخ نیز، مشخص می‌باشد.

## ۹-۶- نمایش خطوط مسیر جریان داخل سوراخ در آرایش

## مربعی

در شکل (۱۲)، خطوط مسیر جریان درون سوراخ نشان داده شده است. خطوط مسیر جریان، مسیر کلی جریان را از شروع حرکت تا انتهای مسیر، لایه به لایه نشان می‌دهند.

## ۹-۷- مقادیر سرعت جریان هوا در روی صفحه و داخل

## سوراخ در آرایش مثلثی

در شکل (۱۳) مقادیر سرعت جریان در روی صفحه، داخل سوراخ و همچنین جریان برگشتی (ویک) که در دیواره سوراخ به وجود آمده، نشان داده شده است.

## ۹-۸- لایه مرزی گرمایی عمود بر مسیر جریان در آرایش

## مربعی

در شکل (۱۴) هوا با سرعت  $0.2\text{ m/s}$  از بالای صفحه به سمت سطح صفحه در جهت بردار  $y$  جریان دارد به صورت توزیع دما در حاشیه سمت چپ گراف مشخص شده است.

## ۹-۹- توزیع دمای سیال در آرایش مربعی در صفحه

$$y = 1.65\text{mm}$$

در شکل (۱۵)، توزیع دما از نمای دید بالا در فاصله  $y = 1.65E - 3\text{m}$  از سطح صفحه در جهت  $y$  و در آرایش مربعی نشان داده شده است.

## ۹-۱۰- توزیع دمای سیال در آرایش مربعی در صفحه

$$y = 1.7\text{mm}$$

این شکل هم مانند شکل بالا می‌باشد، با این تفاوت که توزیع دما در فاصله  $y = 1.7E - 3$  از سطح صفحه نشان داده شده است.

## ۹-۱۱- توزیع دمای سیال در آرایش مربعی در صفحه

$$y = 1.75\text{mm}$$

این شکل توزیع دما را در آرایش مربعی در فاصله  $y = 1.75E - 3$  از سطح صفحه نشان می‌دهد.

## ۹-۱۲- توزیع دمای سیال در آرایش مربعی در صفحه

$$y = 1.8\text{mm}$$

این شکل نیز مانند بالا توزیع دما را در آرایش مربعی در فاصله  $y = 1.8E - 3$  از سطح صفحه نشان می‌دهد.

در شکل‌های (۱۵ تا ۱۸) به ترتیب هر چه از سطح صفحه دورتر می‌شویم، دمای سطح پایین‌تر می‌آید.

## ۹-۱۳- توزیع دمای سیال در آرایش مثلثی در صفحه

$$y = 1.65\text{mm}$$

در شکل (۱۹)، توزیع دما از نمای دید بالا در فاصله  $y = 1.65E - 3\text{m}$  از سطح صفحه در جهت  $y$  و در آرایش مثلثی نشان داده شده است.

## ۹-۱۴- توزیع دمای سیال در آرایش مثلثی در صفحه

$$y = 1.7\text{mm}$$

در این شکل توزیع دما از نمای دید بالا در فاصله  $y = 1.7E - 3\text{m}$  از سطح صفحه در جهت  $y$  نشان داده شده است.

مسیر خود به سوراخی رسیده و انتقال حرارت به صورت کامل تر از آرایش مربعی صورت می گیرد.

### ۱۱- فهرست علائم

$D$	قطر سوراخ ( $m$ )
$G$	شدت تشعشع نور خورشید ( $W / m^2$ )
$H$	طول صفحه بین دو شیار ( $m$ )
$L$	گام تکرار شکافها ( $m$ )
$L_s$	طول شروع لایه مرزی سرعت ( $m$ )
$P$	گام سوراخها ( $m$ )
$T$	دما ( $K$ )
$u$	سرعت هوا در جهت $x$ ( $m / s$ )
$v$	سرعت جریان هوای یکنواخت در جهت $y$ ( $m / s$ )
$w$	سرعت هوا در جهت $z$ ( $m / s$ )
$k_s$	ضریب انتقال حرارت هدایتی جامد ( $W / m^2 \cdot k$ )
$Re_\infty$	عدد رینولدز روی صفحه
$t$	عدد رینولدز داخل شیار
$Nu_r$	عدد ناسلت تشعشی
$Gr$	عدد گرافش
$y_\infty$	فاصله بی نهایت دور از صفحه
$x_1$	پارامتر بی بعد اول
$x_2 = \sigma$	پارامتر بی بعد دوم (ضریب تخلخل)
$x_3$	پارامتر بی بعد سوم
$x_4$	پارامتر بی بعد چهارم
$x_5$	پارامتر بی بعد پنجم
$x_6$	پارامتر بی بعد ششم
$h_r$	ضریب انتقال حرارت تشعشی ( $W / m^2 \cdot k$ )
$k_a$	ضریب انتقال حرارت هدایتی هوا ( $W / m^2 \cdot k$ )
$v_h$	سرعت هوا در بالای صفحه ( $m / s$ )
$\nu$	لزجت سینماتیک ( $m^2 / s$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kg / m \cdot s$ )
$\alpha$	ضریب پخش گرمایی ( $m^2 / s$ )
$\phi$	تابع تلفات لزج
$\rho$	چگالی هوا
$\sigma$	ضریب تخلخل

### ۹-۱۵- توزیع دمای سیال در آرایش مثلثی در صفحه

$$y = 1.75mm$$

در این شکل توزیع دما از نمای دید از بالا در فاصله  $y = 1.75E - 3m$  سطح صفحه در جهت  $y$  نشان داده شده است.

### ۹-۱۶- توزیع دمای سیال در آرایش مثلثی در صفحه

$$y = 1.8mm$$

در این شکل توزیع دما از نمای دید از بالا در فاصله  $y = 1.8E - 3m$  از سطح صفحه در جهت  $y$  نشان داده شده است.

در شکل‌های (۱۹ تا ۲۲) به ترتیب هر چه از سطح صفحه دورتر می‌شویم، دمای سطح پایین تر می‌آید.

### ۹-۱۷- لایه مرزی گرمایی عمود بر مسیر جریان هوا در

#### آرایش مثلثی

در این شکل هوا با سرعت  $0.2m / s$  از بالای صفحه به سمت پایین جریان دارد و در این شکل توزیع دما به صورت کامل نشان داده شده است.

### ۹-۱۸- نمایش خطوط مسیر جریان در راستای سوراخها در

#### آرایش مثلثی

در این شکل خطوط مسیر جریان در داخل سوراخ نشان داده شده است. خطوط مسیر جریان کلی جریان را از شروع حرکت تا انتهای مسیر، لایه به لایه نشان می‌دهد.

### ۱۰- نتیجه گیری

۱- عملکرد حرارتی صفحات مشبک وابسته به شش پارامتر بدون بعد بوده که مهم ترین آنها پارامتر رینولدز درون سوراخ بوده و کم اهمیت ترین این پارامترها، ناسلت تشعشی می باشد.

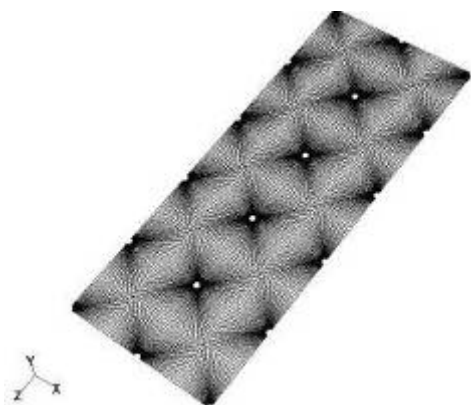
۲- بالاترین کارایی حرارتی صفحات هنگامی رخ می دهد که پارامترهای  $x_1$ ،  $x_2$  و  $x_3$  کمینه شوند.

۳- بررسی تغییرات فشار در پشت این صفحات این نتیجه را حاصل نمود که موثرترین پارامتر بر روی این تغییرات، پارامتر ضریب تخلخل بوده و با تغییر این پارامتر، تغییرات زیادی را بر افت فشار شاهد خواهیم بود.

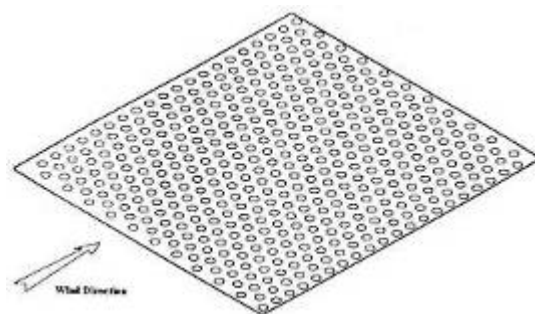
۴- هر چه از سطح صفحه دورتر می‌شویم، دمای سطح پایین تر می‌آید.

۵- در نهایت نشان داده شد؛ در شرایط مساوی، صفحات با آرایش مثلثی سوراخ ها، کارایی بهتری نسبت به همان صفحات با آرایش مربعی خواهند داشت. زیرا در صفحات سوراخدار با آرایش مثلثی، اگر هوا در هر فاصله از صفحه در راستای محور  $z$  حرکت کند، در

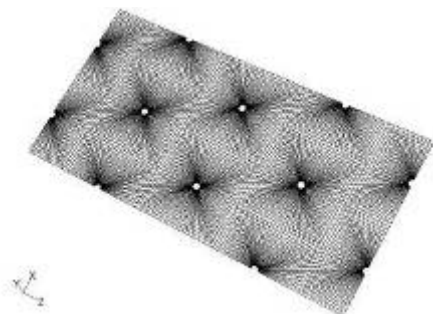
۱۲- جدول ها، منحنی ها و شکل ها:



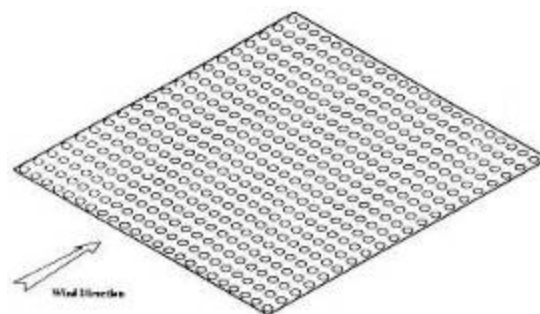
شکل (۴): شبکه تولید شده برای صفحه سوراخدار با آرایش مربعی در صفحه XY



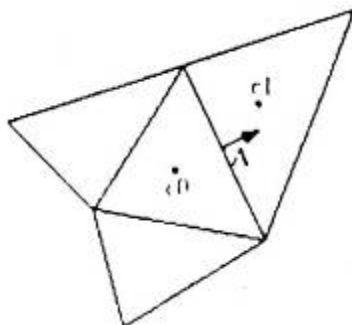
شکل (۱): وضعیت جریان باد (آرایش مثلثی سوراخها)



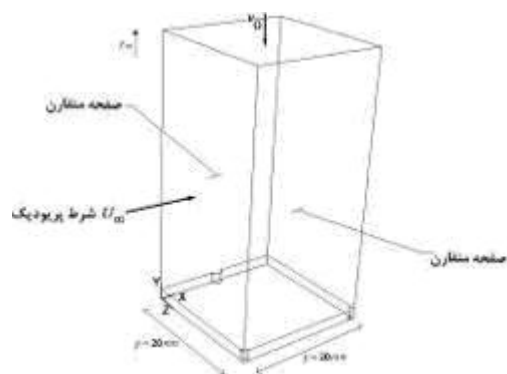
شکل (۵): شبکه تولید شده برای صفحه سوراخدار با آرایش مثلثی در صفحه YZ



شکل (۲): وضعیت جریان باد (آرایش مربعی سوراخها)



شکل (۶): حجم معیار دو بعدی مثلثی



شکل (۳): المان در نظر گرفته شده برای مسئله

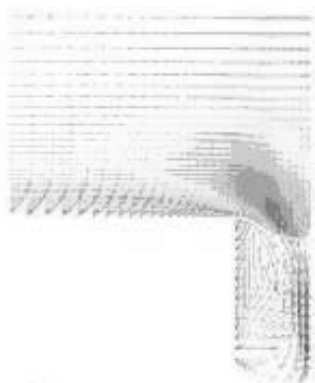




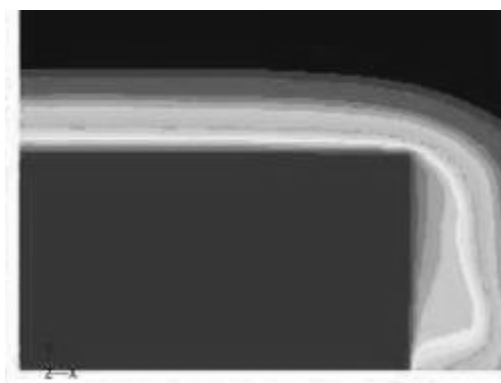
شکل (۱۰): لایه مرزی گرمایی در مسیر جریان هوا از روی سوراخها در آرایش مثلثی



شکل (۷): لایه مرزی گرمایی در مسیر جریان هوا از روی سوراخها در آرایش مربعی



شکل (۱۱): مقادیر سرعت جریان هوا در روی صفحه و داخل سوراخ در آرایش مربعی



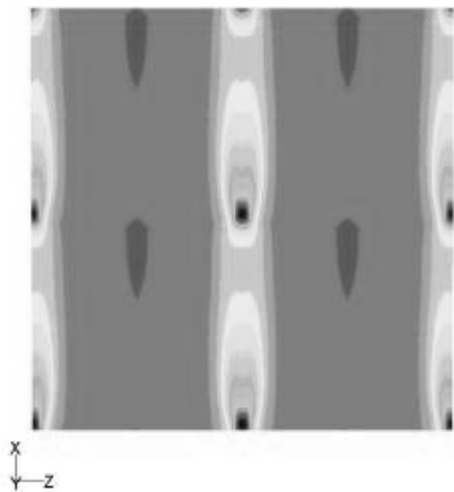
شکل (۸): لایه مرزی گرمایی داخل سوراخ در مسیر جریان هوا در آرایش مربعی



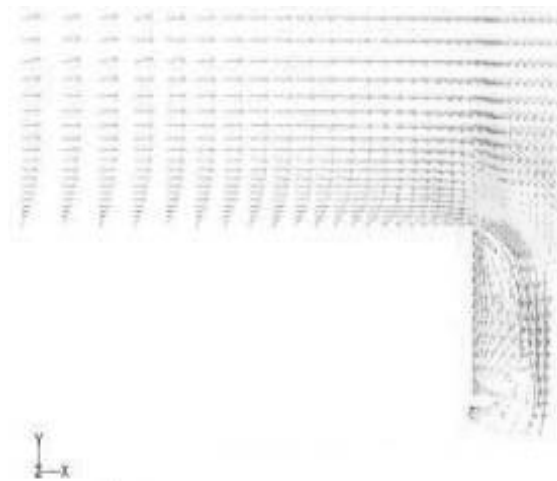
شکل (۱۲): نمایش خطوط مسیر جریان داخل سوراخ در آرایش مربعی



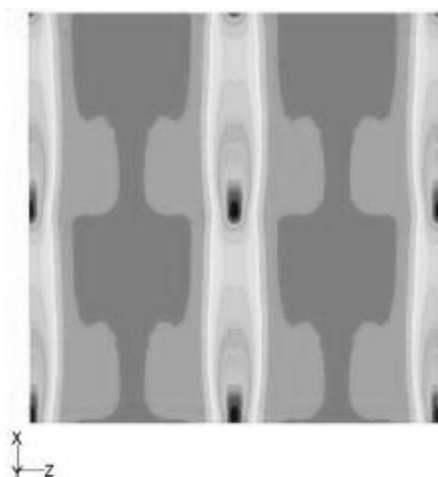
شکل (۹): لایه مرزی گرمایی در مسیر جریان هوا در حفاصل بین سوراخها در آرایش مربعی



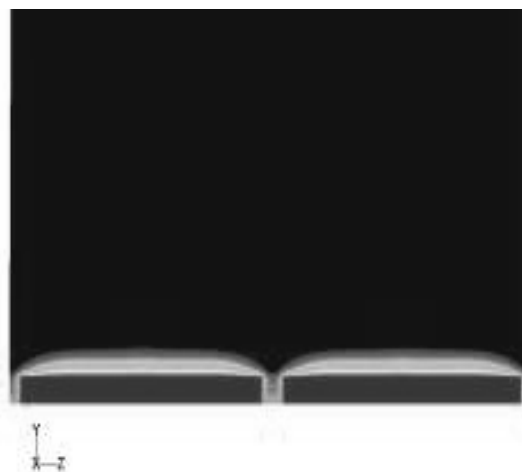
شکل(۱۶): توزیع دمای سیال در آرایش مربعی در صفحه  $y = 1.7mm$



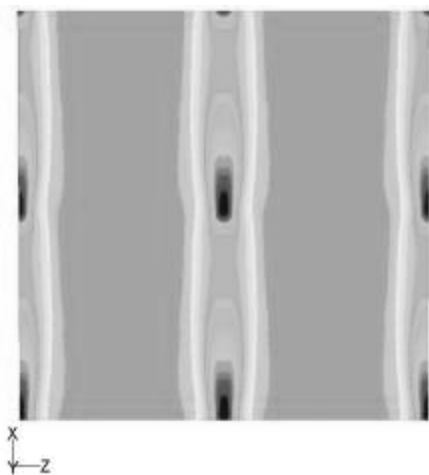
شکل(۱۳): مقادیر سرعت جریان هوا در روی صفحه و داخل سوراخ در آرایش مثلثی



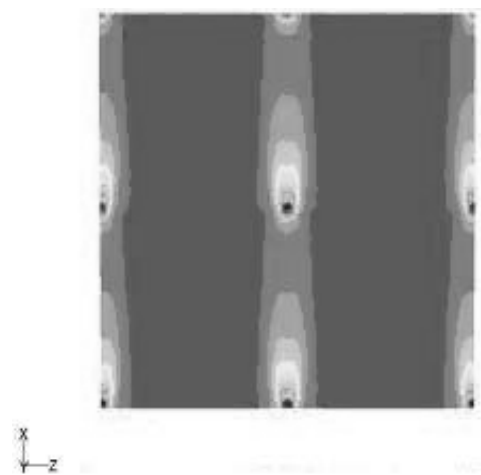
شکل(۱۷): توزیع دمای سیال در آرایش مربعی در صفحه  $y = 1.75mm$



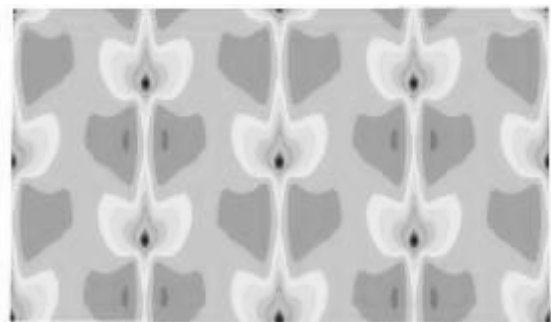
شکل(۱۴): لایه مرزی گرمایی عمود بر مسیر جریان در آرایش مربعی



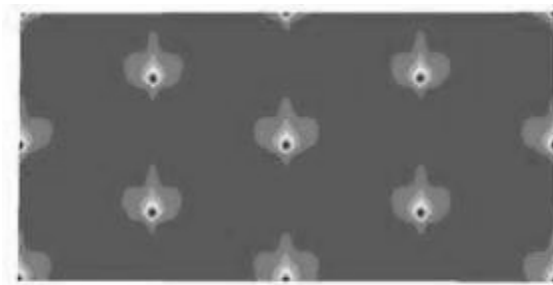
شکل(۱۸): توزیع دمای سیال در آرایش مربعی در صفحه  $y = 1.8mm$



شکل(۱۵): توزیع دمای سیال در آرایش مربعی در صفحه  $y = 1.65mm$



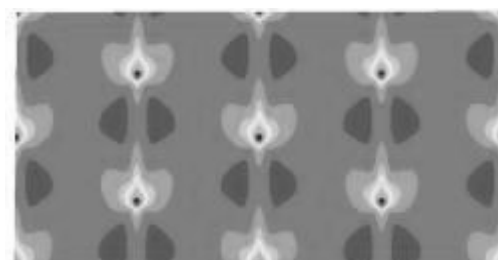
شکل (۲۲): توزیع دمای سیال در آرایش مثلثی در صفحه  $y = 1.8mm$



شکل (۱۹): توزیع دمای سیال در آرایش مثلثی در صفحه  $y = 1.65mm$



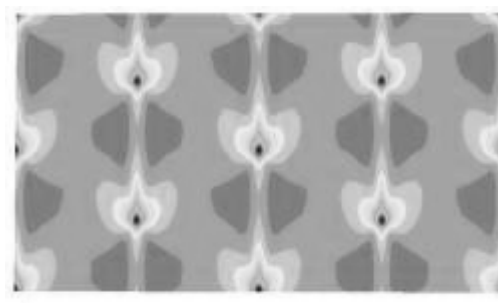
شکل (۲۳): لایه مرزی گرمایی عمود بر مسیر جریان در آرایش مثلثی



شکل (۲۰): توزیع دمای سیال در آرایش مثلثی در صفحه  $y = 1.7mm$



شکل (۲۴): نمایش خطوط مسیر جریان در راستای سوراخها در آرایش مثلثی



شکل (۲۱): توزیع دمای سیال در آرایش مثلثی در صفحه  $y = 1.75mm$

- ۱۳- مراجع**
- [9] G. V. Decker, T. Hollands and A. Brunger, "Heat-exchange relations for unglazed Transpired solar collectors with circular holes on a square or triangular pitch", *Solar Energy*, 71(1), pp. 33-46, 2001.
- [10] S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Mc Graw-Hill, 1980.
- [11] H. Schlichting, "Boundary Layer Theory", Mc Graw-Hill, 1973.
- [12] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, "Introduction to Heat Transfer. External Flow (pp.364-375) Free Convection (pp.496-533)", New York: John Wiley and Sons, 2002.
- [13] L. Gunnewiek, E. Brundrett and T. Hollands, "Flow distribution in unglazed transpired Plate solar air heaters of large area", *Solar Energy*, 58(4-6), pp. 227-237, 1996.
- [14] L. Gunnewiek, T. Hollands and E. Brundrett, "Effect of wind on flow distribution In unglazed transpired-plate collectors", *Solar Energy*, 72(4), pp. 317-325, 2002.
- [15] T. Hollands, "Principles of the transpired-plate air heating collector: the solar wall. In Renewable Energy Technologies in Cold Climates", *Solar Energy Society of Canada Annual Meeting*, pp. 139-144, 1998.
- [16] B. A. Fleck, R. M. Meier and M. D. Matovic, "A Field Study of the Wind Effects on the Performance of an Unglazed Transpired Solar Collector", *Solar Energy*, 73 (3), pp. 209-216, 2002.
- [17] س. آقا نجفی و ع. دهقان، "انرژی تشعشع خورشیدی پیشرفته و کاربردهای صنعتی"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ اول، زمستان ۱۳۸۶.
- [18] Fluent 6.2.16 Users Guide.
- [1] ع. ستوده، آنالیز عددی سه بعدی جریان هوا، همراه با انتقال حرارت از صفحات مشبک شیاردار تحت مکش با زوایای مختلف وزش باد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، شهریورماه ۱۳۸۴.
- [2] A. Golneshan, T. Hollands, "Forced convection experiments on slotted transpired Plates", *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 24 (1 B), pp. 335-348, 2000.
- [3] C. Kutscher, "Transpired solar collector systems: A Major advance in solar heating", In *Proceedings of the World Energy Engineering Congress*, pp. 481-489, Atlanta, GA, 1996.
- [4] C. Kutscher, K. Gawlik, "Wind heat loss from corrugated, transpired solar collectors", *Journal of Solar Energy Engineering*, 124, pp. 256-261, 2002.
- [5] C. Kutscher, C. Dymond, "Development of a flow distribution and design model For transpired solar collectors", *Solar Energy*, 60(5), pp. 291-300, 1997.
- [6] ع. باقری نژاد، آنالیز سه بعدی جریان سیال همراه با انتقال حرارت روی صفحات مشبک تحت مکش، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، آبان ماه ۱۳۷۹.
- [7] S. Arulanandam, T. Hollands, and E. Brundrett, "CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions", *Solar Energy*, 67(1), pp. 93-100, 1999.
- [8] G. V. Decker, T. Hollands, "An empirical heat transfer equation for the transpired solar collectors, including no-wind conditions", In *Proceedings of ISES Solar World Congress 1999*, 3, pp. 23-27, 1999.

