

# کاربرد مدل آشفتگی $\overline{v^2}f - k\omega$ در بررسی جریان آشفته خنککاری لایهای روی یک سطح تخت

سلیمی، محمدرضا<sup>۱</sup>، طیبی رهنی، محمد<sup>۲</sup>، رمضانیزاده، مهدی<sup>۳</sup>۳، فرهادی آذر، روزبه<sup>۴</sup> ۱، ۲ و ۴- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران ۳- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوائی شهید ستاری، تهران، ایران (دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۰/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۴/۲۹)

### چکیدہ

در این تحقیق، مسئله خنککاری لایهای از طریق یک ردیف جت دارای مقطع مربعی که به صورت عمود وارد جریان عرضی می شوند، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای شبیه سازی اثرات آشفتگی جریان از رهیافت میانگین گیری رینولدز مع ادلات ناویر -استوکس و مدل آشفتگی نسبتاً جدید  $\overline{v^2} f - k\omega$  یستفاده قدر و تحایج حاصل با یک دیگر مقایسه شده است. معادلات حاکم شامل معادلات یا و معادلهای رایجی مثل  $\omega - k$  استاندارد و SST استفاده شده و نتایج حاصل با یک دیگر مقایسه شده است. معادلات حاکم شامل معادلات بقاء جرم، اندازهی حرکت و انرژی، با استاندارد و SST استفاده شده و نتایج حاصل با یک دیگر مقایسه شده است. معادلات حاکم شامل معادلات بقاء جرم، اندازهی حرکت و انرژی، با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل روی یک شبکه چند بلوکی جابجا شده، با سازمان و غیر یکنواخت گسسته سازی و حل شده اند. نسبت سرعت جت به جریان عرضی و عدد رینول دز جت به تریب برابر با ۵/۰ و ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل  $\overline{v}^2 - k\omega$  معادلای آشفته یوی به تعاره است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل معادل مولی آشفته یوی به تعاره است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل  $\overline{v}^2 - k\omega$  معادی و عدد رینول در بول در بعن برابر با ۵/۰ و ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل  $\overline{v}^2 - k \omega$  می نور معادی ای آشفته بی در این را با دقت بیشتری در مقایسه با مدل های دو معادلهای  $\overline{v}^2 - k \omega$  و SST بیه سازی می کند.

#### مقدمه

خنککاری لایهای<sup>۱</sup> یکی از پرکاربردترین روشها در زمینه خنککاری پرههای توربین و بهطور کلی بخش گرم<sup>۲</sup> موتورهای توربینی به شمار میرود. در این روش، هوای خنک از بخش کمپرسور گرفته شده، از ریشهی پرهها وارد کانالهای تعبیه شده در آنها میشود و نهایتاً، از سوراخهای ایجاد شده در سطح پرهها، روی آنها تزریق میشود. به این ترتیب، با ایجاد یک لایه محافظ روی پرهها، از تماس مستقیم گازهای داغ با آنها و در نتیجه، از آسیب دیدگی آنها جلوگیری میشود [۱].

مسئله خنککاری لایهای در حدود ۵۰ سال است که توسط محققان به صورت عددی و تجربی دنبال می شود. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نیز بیشتر بر هندسه ساده شده این طرح، یعنی جایگزین کردن پرههای توربین توسط یک صفحه تخت ( به دلیل نسبت بسیار پایین قطر سوراخها به شعاع انحنای سطح)، متمرکز بوده است. به عبارت دیگر،

Ramezanizadeh@mech.sharif.ir : نویسنده پاسخگو، پست الکترونیک www.SID.ir

تحقیقات اولیهی انجام شده در این راستا، نشان داده که این سادهسازی هندسی میتواند با انجام یک سری تصحیحات جزئی (ضرایب تصحیح)، کاملا قابل استفاده در حالت واقعی باشد [۲].

خنککاری لایهای از مصادیق مسئله گستردهتر اندرکنش جت در جریان عرضی<sup>۲</sup> میباشد و با توجه به این که ساختارهای گردابهای متعددی در این جریان تولید میشود، این مسئله از جمله مسائل پیچیده در آشفتگی به شمار میآید. از این رو، یکی از اهداف اصلی در شبیهسازیهای عددی انجام شده توسط محققان، استفاده از مدل آشفتگی مناسب جهت شبیهسازی هر چه بهتر این ساختارها و یا در مواردی، بررسی توانائیها و قابلیتهای مدلهای آشفتگی جدید بوده است. به عنوان مثال، هدا و آچاریا [۳] در سال ۲۰۰۰، اندرکنش جت و جریان عرضی را با استفاده از مدلهای آشفتگی مختلف در عادلهای (هفت مدل مختلف) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج

تحقیقات آنها نشان داد که تمامی مدل های دومعادله ای استفاده شده، مقادیر میدان سرعت را در ناحیه دنباله جت بیشتر از مقادیر واقعی آنها پیش بینی کرده و به همین دلیل، گسترش مولی و عرضی جت را بیشتر از مقدار واقعی آن به دست میآورند. بنابراین، توصیه نمودند که یا از مدل های آشفتگی پیچیده تری استفاده شود و یا اصلاحاتی روی این مدل ها صورت می زیرد. مدیک و دوربین [۴] نیز در سال ۲۰۰۲، مسئله پیچیده تری استفاده از موی هندسه پره و با استفاده از مدل های آشفتگی دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که مدل های دو معادله ای آشفتگی دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که مدل های دو معادله ای استفاده شوم پیش بینی کند و مدل  $\sqrt{f} - k = 0$  معادله و معادله می مدله مدان داد که مدل های دو معادله می دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که مدل های دو معادله می دادند. نتایج می توانند میدان دما و ضریب انتقال حرارت روی مطلح پره را به درستی پیش بینی کنند و مدل  $\sqrt{f} - k = 0$  می می مدل می داد. نتایج می می از می می مدان دما و ضریب انتقال حرارت روی مطلح پره را به درستی پیش بینی کنند و مدل علی می در می تایج می می می می مدان داد می داد می مدان می در ماله می کند. معان می داد.

همان طور که ذکر شد، مدل  $f = k\varepsilon$ ، بر خلاف اکثر مدلهای آشفتگی ارائه شده، بر فرض آشفتگی ایزوتروپ بنا نشده است. این مدل، یکی از صورتهای مدل  $f^2$ , میباشد و با توجه به اینکه قرار است در این تحقیق از مدل  $\omega - f$ استفاده شود، در ادامه، نحوه توسعه این مدل از سال ۱۹۹۱، با استفاده شود، در ادامه، نحوه توسعه این مدل از سال ۱۹۹۱، با استفاده از نتایج شبیهسازی عددی مستقیم<sup>†</sup> جریان آشفته روی صفحه تخت، پی برد که مؤلفه عمود بر دیواره شدت آشفتگی صفحه تخت، پی برد که مؤلفه عمود بر دیواره شدت آ نسبت به مؤلفههای دیگر میرا میشود. بر این اساس، او ادعا نسبت به مؤلفههای دیگر میرا میشود. بر این اساس، او ادعا نسبت به مؤلفههای دیگر میرا میشود. بر این اساس او ادعا نسبت به مؤلفههای دیگر میرا میشود. بر این اساس او ادعا نسبت به مؤلفههای دیگر میرا میشود. بر این اساس او ادعا نسبت به مؤلفه موا دیگر میرا میشود. بر این اساس او ادعا نسبت به مؤلفه موا دیگر میرا میشود. بر این اساس او ادعا نسبت به مؤلفه موا دیگر میرا میشود. بر این اساس او ادعا نسبت به مؤلفه موا دیگر میرا میشود. بر این اساس او ادعا نسبت به مؤلفه موا دیگر میرا میشود. بر این اساس او ادعا

شدن توابع میراکننده فقط به دلیل ضعف k به عنوان مقیاس سرعت مناسب میباشد. بنابراین، رابطه زیر را برای بدست آوردن لزجت آشفتگی معرفی نمود:

$$\upsilon_t = C_\mu \overline{v^2} T, \tag{1}$$

که در آن، T مقیاس زمانی مناسبی است که میتواند توسط هر یک از مدلهای دو معادله ی رایج ایجاد شود (مثلاً  $k/\varepsilon$ در مدل آشفتگی  $f - k\varepsilon$ . اینکه این عبارت مسئول اعمال اثرات غیر محلی دیواره در مدل آشفتگی  $\overline{v^2} f - k\varepsilon$  میباشد، در نوشتن معادله آن نباید از آشفتگی  $\overline{v}^2 f - k\varepsilon$  میباشد، در نوشتن معادله آن نباید از فرضیات ساده کننده ای همچون ایزوتروپ بودن جریان آشفته که مشکل اساسی بسیاری از مدلهای دو معادله ای رایج است، استفاده شود. از اینرو، با در نظر گرفتن روش مدل سازی تنشهای رینولدز و برابر قرار دادن  $\overline{v}$  ایجاد میشود. انتقال تنشهای رینولدز، معادله  $\overline{v}$  ایجاد میشود.

از طرف دیگر، برای وارد کردن اثرات غیر ایزوتروپیک دیوارد، مانند آنچه در مدل انتقال تنشهای رینولدز انجام میشود، از یک عبارت تخفیف بیضی گون  $f_{22}^2$  (که مربوط به میشود، از یک عبارت تخفیف بیضی گون  $\overline{v}^2$  (که مربوط به مؤلفه  $\overline{v}$  است) برای کامل کردن این معادله استفاده میشود. به این ترتیب، وی مدل چهار معادله ای عددی جریانهایی که نمود. او این مدل را برای شبیه سازی عددی جریانهایی که دارای نقاط سکون و جدایش شدیدی هستند، مانند جریان پشت پله، نازل واگرا و پشت گوه، مورد استفاده قرار داد. نتایج پشت پله، نازل واگرا و پشت گوه، مورد استفاده قرار داد. نتایج مدل های داد که مدل  $\overline{v}^2$  در این جریانها نیز بهتر از معردی می مورد استفاده قرار داد. نتایج مدل های نمود. از معرفی می کند (و معادله ای رایج، جریان آشفته را شبیه سازی می کند[۶ و ۷].



شکل ۱- شکل شماتیک مسئله مورد تحقیق

علاوه براین، دوربین [۸] در سال ۱۹۹۸، جریانهای U اطراف یک برآمدگی<sup>۷</sup>، اطراف یک بالک و درون یک کانال U مشکل را توسط مدل  $\overline{v^2} f - k\varepsilon$  مورد بررسی قرار داد. نتایج او، در مقایسه با دادههای تجربی، از کیفیت بالایی برخوردار بود. در کنار دقت مناسب مدل  $\overline{v^2} f - k\varepsilon$ ، مشکلاتی نیز وجود دارد که بزرگترین آنها، مشکل پایداری عددی و همگرایی آن میباشد. بنابراین، محققان زیادی درصدد بهبود رفتار عددی این مدل برآمدهاند که تلاشهای آنها را میتوان در سه بخش کلی ذیل تقسیم نمود:

اصلاح شرایط مرزی f: با توجه مشکلات زیادی
 که شرط مرزی غیرهمگن f در پایداری عددی مدل اولیه ایجاد
 می کرد [۹]، لاین و همکارانش در سال ۱۹۹۷[۱۰] شرط مرزی
 غیرهمگن f را با اضافه کردن یک عبارت چشمه به معادله آن،
 تبدیل به شرط مرزی همگن 0 = f کردند. انجام این تصحیح،
 کاربرد مدل برای شبیه سازی جریان های با رینولدز بالا را تا
 حدودی ساده تر می کند.

• **اصلاح عبارت**  $\overline{v^2}$ : از فعالیتهای صورت گرفته در این راستا می توان به تحقیقات هنجلیک و همکارانش [۱۰] و لرنس و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۴ اشاره نمود. آنها سعی کردند که با تعریف متغیرهای جدیدی مثل  $\mathcal{F} = \varphi$  (براساس ترکیب k و  $\overline{v^2}$  و بدست آوردن دوبارهی معادلات  $\overline{v}$  و f, شرط مرزی f را تا حدودی سادهتر کنند.

• استفاده از معادله انتقال  $\omega$  بهجای 3: جونز و همکارانش[۱۳] در سال ۲۰۰۴، استدلال نمودند که مقدار  $\mathcal{F}$ در نزدیکی دیواره میتواند بسیار کوچ ک شود و این مقادیر کوچک باعث بزرگ شدن هرچه بیشتر f در نزدی ک دیواره می گردد. حال با توجه به اینکه مقدار 3 با پیشرفت حل تغییر می کنند، این تغییرات میتواند با ایجاد نوسانات شدید در مقدار f ، فرایند حل را بیش از پیش ناپایدار کند. بنابراین، کمیت  $\omega$  را جانشین 3 نمودند و مدل  $\omega - f = f$  را بر این اساس توسعه دادند. نتایج آنها نشان داد که این تغییر، پایداری این مدل را تا حدود زیادی افزایش میدهد. از بزرگترین مزایای مدل را تا حدود زیادی افزایش میدهد. از بزرگترین مزایای به این نکته اشاره کرد که آنها توانستند پایداری عددی مدل را به این نکته اشاره کرد که آنها توانستند پایداری عددی مدل را

در ایت تحقیق، از مدل آشفتگی  $\varpi^2 f - k\varpi$  جهت شبیه سازی عددی جریان آشفته خنک کاری لایه ای روی یک سطح تخت استفاده شده است. همانگونه که ذکر شد، این جریان دارای ساختارهای گردابه ای متعددی است که منجر به پیچیدگی زیاد این جریان در حالت آشفته شده است. بنابراین، قابلیت و توانائی مدل مذکور در پیش بینی ساختارهای پیچیده این جریان مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با داده های تجربی مقایسه خواهد شد. ضمناً، قابلیت های این مدل در مقایسه با نتایج حاصل از مدل های آشفتگی دو معادله ای مقایسه با نتایج حاصل از مدل های آشفتگی دو معادله ای

## معادلات حاكم

معادلات حاکم در جریان خنککاری لایهای عبارتند از معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی که در حالت پایا، تراکم ناپـذیر و سهبعدی به صورت زیر بهکار برده شدهاند:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \qquad (7)$$

$$\frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( 2 \upsilon S_{ij} - \overline{u'_i u'_j} \right), \qquad (7)$$

$$\frac{\partial (U_i T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\upsilon}{pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{t' u'_j} \right), \qquad (7)$$

که در آن، عبارت  $u'_i u'_j$  معرف تنش های رینولدز است که باید مدل شود. در این تحقیق، با استفاده از تقریب بوزینسک<sup>۸</sup> و معرفی لزجت گردابهای<sup>5</sup>، این تشن ها توسط رهیافت RANS و مدل های SST،  $k - \omega$  مدل شدهاند. یکی از مهمترین اقداماتی که جونز [۱۳] در توسعه مدل یکی از مهمترین اقداماتی که جونز [۱۳] در توسعه مدل تعریف مرسوم  $\overline{v^2} f - k\omega$  ایستاندارد تعریف مرسوم  $\beta^* \omega k$  می در مدل  $\omega - k$  استاندارد مورد استفاده قرار می گیرد، تبدیل زیر را معرفی نمود:

$$\varepsilon = func \left[\beta^* \omega k^{n} v^{2^{1-n}}\right] + \left(1 - func\right) \frac{2\nu k}{y^2}, \qquad (\Delta)$$

$$func = [1 - \exp(-0.02 \operatorname{Re}_{y})]^{2},$$
 (9)

و در آن:

$$\operatorname{Re}_{y} = \frac{\sqrt{k}y}{\upsilon}.$$
 (Y)

سایر معادلات مدل نیز عبارتند از:

$$\frac{Dk}{Dt} = P - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \upsilon + \upsilon_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \tag{A}$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 \left(\frac{\overline{v^2}}{k}\right)^{1-n} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left(\upsilon + \sigma \upsilon_t\right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right], \tag{9}$$

$$\frac{\overline{Dv^2}}{Dt} = kf - \varepsilon \frac{\overline{v^2}}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (v + v_i) \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial x_i} \right], \qquad (1 \cdot)$$

$$L^{2}\nabla^{2}f - f = \frac{C_{1}}{T} \left( \frac{\overline{v^{2}}}{k} - \frac{2}{3} \right) + C_{2} \frac{P}{k}, \tag{11}$$

مقیاسهای طولی، زمانی و لزجت گردابهای نیز به صورت ذیـل به دست میآیند:

$$T = \min\left\{ \max\left(\frac{k}{\varepsilon}; 6\sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon}}\right); \frac{\alpha k}{\sqrt{6\nu^2}C_{\mu}|S|} \right\},\tag{17}$$

$$L = C_{l} \max\left\{ \min\left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}; \frac{k^{3/2}}{\sqrt{6}C_{\mu}\overline{v^{2}}|S|}\right); C_{\eta}\left(\frac{v^{3}}{\varepsilon}\right)^{1/4} \right\},$$
(17)

$$_{t} = C_{\mu} \overline{v^{2}} T. \tag{14}$$

$$\begin{split} \boldsymbol{\beta}^* &= 0.09, \\ \boldsymbol{\beta} &= \frac{4}{5} \boldsymbol{\beta}^*, \\ \boldsymbol{C}_1 &= 0.4, \\ \boldsymbol{C}_2 &= 0.3, \\ \boldsymbol{\sigma}_{\omega} &= 1.5, \\ \boldsymbol{\alpha} &= \frac{\boldsymbol{\beta}}{\boldsymbol{\beta}^*} - \frac{1}{\boldsymbol{\sigma}_{\omega}} \Big[ \kappa^2 \big/ \sqrt{\boldsymbol{\beta}^*} \Big] \\ \boldsymbol{C}_L &= 0.23, \\ \boldsymbol{C}_\mu &= 0.25, \\ \kappa &= 0.41. \\ \boldsymbol{g} \quad \boldsymbol{k} - \boldsymbol{\omega} \quad \text{size} \\ \boldsymbol{\gamma} &= \boldsymbol{\omega} \quad \text{size} \quad \text{size} \quad \text{size} \\ \boldsymbol{\gamma} &= \boldsymbol{\omega} \quad \text{size} \quad$$

# روشهای عددی

برای حل معادلات حاکم بر جریان آشفته، تراکم ناپذیر، سهبعدی و متوسط گیری شده زمانی از روش حجم محدود روی یک شبکه با سازمان و غیر یکنواخت استفاده شده و ارتباط بین میدان سرعت و فشار نیز با استفاده از الگوریتم سیمپل ایجاد شده است. شبکه تولید شده نیز، جهت دستیابی به دقت بالاتر در نواحی با گرادیانهای شدید مانند نزدیکی دیوارهها و خروجی جت، توسط رابطه ذیل ریز شده است:

$$Y = H \frac{(\beta + 1) - (\beta - 1) \left[ (\beta + 1) / (\beta - 1) \right]^{(1-\eta)}}{\left[ (\beta + 1) / (\beta - 1) \right]^{(1-\eta)} + 1}.$$
 (1a)

شکل (۲)، نمایی از شبکه استفاده شده در این تحقیق را نشان میدهد. همچنین، لازم بهذکر است که نحوه برخورد با معادلات مدلهای آشفتگی نیز دقیقاً مانند معادلات اندازهی حرکت یعنی با استفاده از رابطه توانی در الگوریتم سیمپل میباشد [۱۵].

## الف. تعريف مسئله و شرايط مرزي

دامنه محاسباتی بکار رفته در این تحقیق در شکل(۱)، نشان داده شده و نتایج حاصل از شبیهسازیها با نتایج تجربی آجرش و همکارانش [۱۶] مقایسه شده است. برای مدلسازی این جریان از پنج شرط مرزی ورودی، خروجی، پریودیک، دیواره جامد و بدون شار استفاده شده است. ضخامت لایه مرزی در ورودی جریان عرضی مساوی با دو برابر قطر جت در نظر گرفته شده و برای اعمال این شرط از رابطه  $_{1}$  توانی برای مؤلف می افقی سرعت استفاده شده است. سایر مؤلفههای سرعت نیز در این مرز برابر با صفر در نظر گرفته شده و مقادیر دما و چگالی نیز ثابت فرض شده است. برای اعمال شرط مرزی ورودی در ثابت فرض شده و با فرض آشفتگی برابر با % در این گرفته شده و با فرض آشفتگی همگن در ورودی داریم مدلهای آشفتگی، شدت آشفتگی همگن در ورودی داریم (۱۶)  $w_{in} = \frac{(1 \rightarrow 10)V_{cf}}{L},$ 

که در آن، L طول دامنه محاسباتی میباشد در مرز جامد، از شرط عدم لغزش برای مؤلفههای سرعت استفاده شده است. مقادیر به کار رفته برای کمیتهای آشفتگی نیز در جدول (۱)

سرعت در این مرز بهنحوی کنترل می شود که بقاء جرم برقـرار شود. در جهت Z (جهت عرضی) نیز با توجه به فیزیک مسـئله از شرط مرزی پریودیک و در جهت عمود بر سطح ( جهـت Y) در فواصل دور از شرط بدون شار استفاده شده است.

> ارائه شده است. در مرز خروجی نیز گرادیان کلیه کمیتها برابر با صفر در نظر گرفته شده است. همچنین، مؤلفه افقی



 **ب**. مطالعه عدم وابستگی حل به شبکه عددی با توجه به اینکه در شبیه سازی عددی از مدل های آشفتگی مختلفی استفاده شده و حساسیت مدل های آشفتگی نسبت به اندازه شبکه با یکدیگر متفاوت میباشد، لذا حساس *ت*رین مدل استفاده شده، یعنی  $(m - k)^2 - k$ ، برای مطالعه عدم وابستگی حل به شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، از ۵ شبکه مختلف که تعداد نقاط بکار رفته در آنها در جداول (۱) و (۲) آورده شده، استفاده شده است. تعداد نقاط بکار رفته در جهتهای مختلف برای شبکهبندی جریان عرضی در جدول (۲) و برای شبکهبندی جریان جست در جدول (۳) ارائه شده

معادلات بیشتری در مقایسه با مـدلهـای دو معادلـهای رایـج استفاده میکنند، میباشد.

مدل مورد نظر	مقدار كميت آشفتگي
در تمامی مدلها	k = 0.0
$\overline{v^2}f-k\omega$ در مدل	$\overline{v^2} = 0.0$
$\overline{v^2}f-k\omega$ در مدل	$\omega_{w} = \frac{2\nu}{\beta^{*} y^{2}} \left(\frac{k}{v^{2}}\right)^{1-n}$
$\overline{v^2}f-karpi$ در مدل	$f_w = -\frac{20\nu^2 \overline{\nu^2}}{\varepsilon_w y^4}$

## $v^2 f - k \omega$ جدول ۱- شرایط مرزی دیواره برای مدل آشفتگی

جدول ۲- تعداد نقاط به کار رفته برای شبیهسازی عددی جریان عرض

Case	Ni	Ňj	Nk	Total
1	60	36	27	58,320
2	115	36	27	111,780
3	121	72	27	235,224
4	121	72	54	470,448
5	141	110	62	961,620

جدول ۳- تعداد نقاط به کار رفته برای شبیهسازی عددی جریان جت

Case	Ni	Nj	Nk	Total
1	7	16	7	787
2	7	32	7	1,568
3	13	32	7	2,912
4	13	32	13	5,408
5	15	32	15	7,200

نتايج

جریان که از اهمیت بالایی نیز در بررسی انتقال حرارت به سطح خنک شونده برخوردارند در شکل (۵) مشخص شدهاند. ازاینرو، می توان انتظار داشت که در این مناطق، نرخ کرنش بسیار زیاد بوده و از آنجایی که عبارت تولید در معادله انتقال انرژی جنبشی آشفتگی مستقیماً با نرخ کرنش ارتباط دارد، تمامی مدل های آشفتگی به کار رفته، بیشترین میزان لزجت آشفتگی را در این نواحی تولید کنند. بنابراین، انتظار میرود مدل هایی که نمودار سرعت را در این نواحی با دقت بیشتری پیشبینی میکنند، در محاسبه تنشهای رینولدز و انرژی جنبشی آشفتگی نیز موفقتر عمل کنند. حال، با مقایسه نتایج بهدست آمده از مدلهای آشفتگی مختلف مشاهده می شود که مدل  $\overline{v^2}f - k\omega$ ، مدل مدل مدر نزدیکی دیواره، توانسته است جریان جت دیواره را نسبت به مدل های دیگر، بسیار بهتر شبیهسازی کند. دلیل این موضوع، حضور دیواره می باشد که موجب غیرهمگن شدن جریان آشفته در این مناطق شده و مدلهای دو معادلهای را با مشکل مواجه کرده است. اما  $v^{2}f - k\omega$  همانطور که در بخش های قبلی اشاره شد، مدل بهدلیل استفاده از مؤلفه عمود بر سطح ( $\overline{v^2}$ ) تــنش رینولـدز بهعنوان مقیاس سرعت، توانایی خوبی در مدل کردن جریان های محدود شونده به دیواره از خود نشان میدهد. همچنین، مشاهده می شود که این مدل، مقدار کمینه سرعت را نیز بهتر از مدلهای دیگر پیشبینی کرده است. ایـن مسـئله، برتری مدل  $v^2 f - k\omega$  را در شبیهسازی جریان های برشی چند لایه و جت دیواره که بهشدت غیر ایزوتروپ هستند، نشان مے دھد.



شکل ۳- نمودار انرژی جنبشی آشفتگی برای بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی

نمود. چراکه، این مقادیر منفی در حقیقت نشاندهنده جریان رو به پایینی هستند که در لبه خارجی سی.آر.وی.پی مشاهده  $\overline{v^2} f - k\omega$  میشود. از مقایسه نتایج حاصل از مدل آشفتگی  $\overline{v} f - k\omega$  میشود که نتایج می با نتایج مدلهای  $w - \omega$  و SST مشاهده می شود که نتایج حاصل از این سه مدل بسیار نزدیک به یکدیگر می باشند. به طوری که، مدل  $\overline{v} f - k\omega$  توانسته است تاحدود کمی، آن هم در فواصل دور از دیواره، بهتر از مدل های دو معادله ای موجود رفتار کند.



شکل ۶- مقایسه نمودارهای مؤلفهی عمودی سرعت با نتایج تجربی [۱۶] در صفحه D = 0 / D

شکل (۷)، نمودارهای مؤلفه عرضی سرعت را در صفحه  $Z/D_j = -0.5$  (دقیقاً در لبه کناری جات) در مقاطع  $Z/D_j = 3, 5$  برای نسبت تزریق ۵/۰ نشان میدهاد. اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینهی سرعت در این نمودارها نشان از توزیع عرضی گردابههای خلاف جهت گرد دارد. شکل (۶) نشان میدهد که مدلهای دو معادلهای استفاده شده، مقادیر بیشینه



شکل ۴- مقایسه نمودارهای مؤلفهی افقی سرعت با نتایج تجربی [۱۶] در صفحه D = 0



شکل ۵- نمایی از جریانهای برشی چندلایه و جت دیواره در مسئله اندرکنش جت و جریان عرضی

شکل (۶)، نمودارهای مؤلفه عمودی سرعت را در نسبت تزریق ۲/۵، روی صفحه  $1 = Z/D_j = 3, 5$  و مقاطع 5  $Z/D_j = 3,$ نشان میدهد. با توجه به این نمودارها، میتوان گسترش گردابههای خلاف جهت همگرد (سی.آر.وی.پی)<sup>۱۲</sup> را از طریق منفی شدن مقادیر سرعت در نواحی نزدیک به دیواره مشاهده

و کمینهی سرعت را بیشتر از مقدار واقعی آن نشان میدهند. درحالیکه، نتایج حاصل از مدل  $\overline{v^2 f - k \omega}$  تا حدودی به مقادیر تجربی نزدیکتر میباشد. این مسئله، نشان میدهد که تمامی مدلهای استفاده شده، گسترش عرضی گردابههای

خلاف جهت همگرد را بیشتر از مقدار واقعی آن نشان میدهند.  
ما مدل 
$$\overline{v^2}f - k \varpi$$
 در این میان، از دقت نسبی برخوردار  
ست.



 $v \ f - k \omega$  کل ۸- مفایسه خطوط همتراز دمای حاصل از دو مدل $k - \omega$  و

میباشد. این موضوع که توسط محققان دیگری نیز گزارش شده است[۱۷] از جمله مسائلی در اندرکنش جت و جریان عرضی محسوب می شود که هنوز دلیل مشخصی برای ظهور آن در حلهای پایا مشاهده نشده است.

شکل(۹)، نمودارهای انرژی جنبشی آشفتگی را در مقاطع 1/2 در صفحه  $2/D_j = 0$  برای نسبت تزریق 1/2نشان میدهد. با توجه به این نمودارها، میتوان تفاوتهای موجود در نتایج حاصل از مدلهای مختلف آشفتگی را در ناحیه دنباله جت با کیفیت بیشتری مشاهده نمود. با بررسی



(18] شکل ۷- مقایسه نمودارهای مؤلفه عرضی سرعت با نتایج تجربی Z/D=0 در صفحه

شکل (۸)، در این راستا خطوط همتراز دما را در مقطع شکل (۸)، در این راستا خطوط همتراز دما را در مقطع  $X/D_j = 5$  و w - w نشان می دهد. با توجه به این خطوط همتراز مشاهده می شود که گسترش عمودی (در جهت Y) گردابه های خلاف جهت گرد در دو مدل تقریباً برابر بوده اما، همانطور که بالاتر ذکر شد پخش عرضی این گردابه ها در مدل  $w^2 - k - w$  کمتر از مدل عرضی این گردابه ها در مدل  $w^2 - k - w$  کمتر از مدل و جوئی این مودارهای در w - w می باشد. نکته دیگری که در رابطه با این نمودار و جود (۶ و ۲) می باشد. نکته دیگری که در رابطه با این نمودار و جود  $v^2 f - k \omega$  دارد، عدم تقارن موجود در نمودار حاصل از مدل و مدل  $v^2 - k - w$ 

که مدل  $\overline{v^2} f - k \omega$  ساختارهای پیچیده این نوع جریان، یعنی جریانهای برشی چند لایه و جت دیواره را، با دقت SST و  $k-\omega$  بیشتری در مقایسه با مدلهای دو معادله ماد  $k-\omega$ شبیهسازی میکند. همچنین، کیفیت بهتر نتایج حاصل از مدل بهدلیل جریان آشفته بسیار غیر ایزوترویے است.  $v^2 f - k \omega$ که خصوصاً در نواحی پاییندست و نزدیک به خروجی جت، بهجهت حضور دیواره از یایین و جت خمشده از بالا تولید می شود. علاوہ ہر این، مشاہدہ شـد کـه ایـن مـدل، گسـترش عرضی و عمودی گردابههای خلاف جهت همگرد که مهمترین ساختارهای گردابهای موجود در جریان خنککاری لایهای به شمار می رود را، با دقت بیشتری در مقایسه با مدل های دو معادلهای موجود شبیهسازی میکند. این برتری، به خصوص در نواحی نزدیک به جت و واقع در پاییندست آن، آشکار می باشد. بنابراین، مشاهده می شود که مدل  $\overline{v^2}f - k\omega$ ، با وجود اینکه تنها یکی از مؤلفههای تنش رینولـدز را شـبیهسازی مسـتقیم میکند، در مدل کردن جریان پیچیدهای مثل جریان مورد بحث که ساختارهای گردابهای موجود در آن یک جریان آشفته به شدت غیر ایزوتروپ را تولید می کند، در مقایسه با مدل های دو معادلهای رایج کاملاً موفق است. بنابراین، با وجود اینکه این مدل دقت مدل های مستقیمی مانند انتقال تنش های رینولدز را ندارد، ولی در مقایسه با مـدلهـای دو معادلـهای رایـج، كـاملاً موفق می باشد. با این تفاوت که این مدل، چه از نظر پایداری و چه از نظر هزینه محاسباتی، بهتر از مدل انتقال تنشهای رينولدز رفتار مي كند.

پینوشتھا

- Film Cooling
- ۲ Hot Section
- Jet into Cross Flow
- F Direct Numerical Simulation (DNS)
- ۵ Curve Fitting
- ۶ Elliptic Relaxation
- v Bump
- A Boussinesq Assumption
- ۹ Eddy Viscosity
- 1. Shear Stress Transport
- 11 Reynolds Stress Models
- Counter Rotating Vortex Pair (CRVP)

مجدد نمودارهای مؤلفه افقی سرعت در شکل (۴)، مشاهده می شود که مدل های مختلف آشفتگی در این مورد به خصوص در ناحیه دنباله جت پیش بینی های متفاوتی داشته اند. بنابر این، مطابق با شکل (۹)، ملاحظه می شود که نتایج حاصل برای انرژی جنبشی آشفتگی نیز تا حدود زیادی متفاوت است. همچنین، مشاهده می شود که مدل های دو معادله ای موجود در مقایسه با مدل  $\overline{v}^2 f - k\omega$ ، نتوانسته اند مقدار انرژی جنبشی آشفته را به خصوص در نواحی دنباله جت به خوبی پیش بینی کنند.



شکل ۹- مقایسه نمودارهای انرژی جنبشی آشفتگی با نتایج تجربی [۱۶] در صفحه  $Z\,/\,D=0$ 

## نتيجهگيرى

در این تحقیق، مسئله خنککاری لایهای با استفاده از رهیافت  $v^2 f - k\omega$  رنس و مدلهای مختلف آشفتگی از جمله مدل شریه منان می دهد شبیه سازی عددی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد

- [10] Lien, F-S, Durbin, P. A., and Parneix, S., 1997 "Non-linear v2
- [11] Hanjalic, K., Popovac, M., And Hadziabdic, M., 2004 "A Robust Near-Wall Elliptic-Relaxation Eddy-Viscosity Turbulence Model for CFD," Int. J. Heat Fluid Flow 25, 1047-1051.
- [12] Laurence, D.R. Uribe, J.C., and Utyuzhnikov, S.V., 2004 "A Robust Formulation of the V2-F Model," Flow, Turbulence and Combustion, J., pp. 169-185.
- Jones, R.M., 2003 "Advance Turbulence Modeling for Industrial Flow," Ph.D. Dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- [14] Davidson, L., 2003 "An Introduction to Turbulence Models," Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology.
- [15] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 1995 "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method," Longman, Malaysia.
- [16] Ajersch, P., Zhou, J.M., Ketler, S., Salcudean, M., and Gartshore, I.S., 1995 "Multiple Jets in a Crossflow: Detailed Measurements and Numerical Simulations," International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. ASME Paper 95-GT-9, Houston, TX, pp. 1-16.
- [17] Kh. Javadi, M. Taeibi-Rahni, M. Darbandi, 2007 "Jet in to Cross-Flow Boundary Layer Control: Innovation in Gas Turbine Blade Cooling' AIAA Journal, Vol. 45, No. 12, 2910-2925.

سال سیردهم، سماره اول

- [1] Ramezanizadeh, M., Taeibi-Rahni, M., and Saidi, M.H., 2007 "Investigation of Density Ratio Effects on Normally Injected Cold Jets into a Hot Cross Flow," Archive of Applied Mechanics, Vol. 77, No. 11, pp. 835–847.
- [2] Dhungel, A., 2007 "Film Cooling from a Row of Holes Supplemented With Anti Vortex Holes," M.S Thesis, B.L., Regional Engineering College-Rourkela.
- [3] Hoda, H., Acharya, S., 2000 "Predictions of a Film Coolant Jet in Crossflow With Different Turbulence Models," J. Turbomach, Vol. 122, No 3, pp.558-570.
- [4] Medic, G., Durbin, P.A., 2002 "Toward Improved Film Cooling Prediction," ASME J. Turbomachinery 124, 193-199.
- [5] Durbin, P., 1991 "Near-Wall Turbulence Closure Modeling without Damping Function," Theoretical Computational Fluid Dynamics, pp.1-3.
- [6] Durbine, P.A., 1993 "Application of a Near-Wall Turbulence Model to Boundary Layers and Heat Transfer," Heat and Fluid Flow. J., Vol. 14, No. 4, pp. 316-323.
- [7] Durbin, P.A., 1995 "Separated Flow Computations with the V2F Model," AIAA Journal, Vol. 33, No. 4, pp. 659-664.
- Parneix, S., Durbine, P.A., and Behnia, M., 1998
   "Computation of 3-D Turbulent Boundary Layers Using the V2F Model," Flow, Turbulence and Combustion J., pp. 19-46.
- [9] Jones, R., Acharya, S., and Harvey, A., 2005 "Modeling and Simulation of Turbulent Heat Transfer", Witt Press, New York.

منابع و مراجع