

Investigation of the Influence of SSTk – ω Turbulence-Model Parameters on Numerical Simulation Results of Heat Transfer of Turbulent Flow Inside a Tube with a Short-Twisted Tape

Erfan Navaei Malekidouz, Amin Rasam*

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: October 05, 2025

Revised: November 04, 2025

Accepted: November 08, 2025

ePublished: November 20, 2025

ABSTRACT

Short twisted tapes are used to enhance mixing and heat transfer in tubes. The turbulent flow in these tubes exhibits particular complexities due to the generation of secondary flows and helical vortices, and its numerical simulation using the Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations with two-equation models such as the SST k- ω model often involves errors because the coefficients of these models are not universal.

It is for the first time in this study, that effects of modeling the parameter β_{∞}^* and turbulent Prandtl number Pr_t on SST k- ω simulations of turbulent heat transfer in a tube fitted with a short-length twisted tape are investigated and compared with experimental data. The goal is to improve numerical predictions of two key quantities: the friction factor and the Nusselt number by choosing suitable turbulence model parameters. Reducing β_{∞}^* from its default value of 0.09 to 0.06 decreased the simulation error in the friction factor from 12.5% to 0.9% relative to the reference experimental data. With the turbulent Prandtl number held constant, lowering β_{∞}^* also increased the Nusselt number. The influence of β_{∞}^* on pressure drop, helical vortex structures, and enstrophy flux were also examined.

To improve heat-transfer predictions, the turbulent Prandtl number was raised from the default 0.85 to 1.5, which reduced the turbulent heat flux and lowered the simulation error for the Nusselt number from 13.7% to 2%. The effects of these modifications on wall temperature were analyzed, and the relationship between the periodic rise in wall temperature and the rotating vortices formed in the flow was discussed.

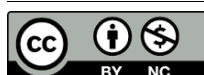
Keywords: Short Twisted Tape, Turbulent Swirling Flow in Pipe, Heat Transfer, SST k- ω Model, Modelling Parameters Pr_t and β_{∞}^*

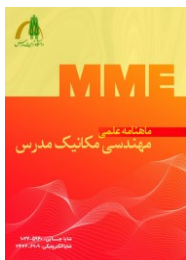
How to cite this article

Navaei Malekidouz E, Rasam A, Investigation of the Influence of SSTk- ω Turbulence-Model Parameters on Numerical Simulation Results of Heat Transfer of Turbulent Flow Inside a Tube with a Short-Twisted Tape. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(10):667-681.

*Corresponding author's email: a_rasam@sbu.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-3173-7502





بررسی تاثیر پارامترهای مدل آشفته‌گی $\omega - SST k$ بر نتایج شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در جریان آشفته درون یک لوله دارای نوار پیچ‌خورده کوتاه

عرفان نوائی ملکی دوز، امین رسام* 

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

نوارهای پیچ‌خورده کوتاه برای بهبود اختلاط جریان و افزایش انتقال حرارت در لوله‌ها به‌کار می‌روند. جریان آشفته در این لوله‌ها به لحاظ به وجود آمدن جریان‌های ثانویه و گردابه‌های مارپیچی دارای پیچیدگی‌های ویژه‌ای بوده و شبیه‌سازی عددی آن‌ها با استفاده از معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز و مدل‌های دو معادله‌ای نظیر $\omega - SST k$ ، به دلیل عمومیت نداشتن ضرایب این مدل‌ها، اغلب با خطا همراه است.

در این پژوهش، برای نخستین بار است که تاثیر پارامترهای مدل‌سازی β_{∞} و عدد پرانتل آشفته‌گی Pr_t در شبیه‌سازی‌های عددی انتقال حرارت به روش $\omega - SST k$ در جریان آشفته داخل یک لوله مجهز به نوار پیچ‌خورده کوتاه در مقایسه با داده‌های تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بهبود پیش‌بینی‌های عددی دو پارامتر ضریب اصطکاک و عدد ناسلت با انتخاب مناسب پارامترهای مدل آشفته‌گی مورد نظر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که کاهش β_{∞} از مقدار پیش‌فرض ۰/۰۹ به ۰/۰۶ منجر به کاهش خطای ضریب اصطکاک از مقدار ۱۲/۵٪ به ۰/۹٪ نسبت به داده‌های تجربی مرجع گردید. با توجه به ثابت بودن Pr_t ، کاهش β_{∞} منجر به افزایش عدد ناسلت نیز می‌گردد. تاثیر پارامتر β_{∞} بر افت فشار، ساختارهای گردابه‌ای مارپیچی و شار انستروپی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای بهبود پیش‌بینی‌های انتقال حرارت، مقدار عدد پرانتل آشفته‌گی از مقدار پیش‌فرض ۰/۸۵ به ۱/۵ افزایش یافت که منجر به کاهش شار حرارتی آشفته‌گی و کاهش خطای شبیه‌سازی‌های عددی برای عدد ناسلت جریان از ۱۳/۷٪ به ۲٪ می‌گردد. اثر این تغییرات بر دمای دیواره نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین رابطه رفتار تناوبی افزایشی دمای دیواره با گردابه‌های چرخشی به وجود آمده در جریان مورد بحث قرار می‌گیرد.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹

کلیدواژه‌ها: نوار پیچ‌خورده کوتاه، جریان آشفته چرخشی در لوله، انتقال حرارت، مدل $\omega - SST k$ ، پارامترهای مدل‌سازی β_{∞} و Pr_t

نحوه ارجاع به این مقاله

نوائی ملکی دوز عرفان، رسام امین، بررسی تاثیر پارامترهای مدل آشفته‌گی $\omega - SST k$ بر نتایج شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در جریان آشفته درون یک لوله دارای نوار پیچ‌خورده کوتاه، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۸۱-۷۷۷(۱۰):۲۵؛۱۴۰۴.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: a_rasam@sbu.ac.ir

*شناسه اُرکید نویسنده عهده دار مکاتبات: 0000-0002-3173-7502



۱- مقدمه

قرار دادن نوارهای پیچ‌خورده درون لوله‌ها با ایجاد دو گردابه‌ی مارپیچی متقارن و چرخشی در امتداد محور لوله، موجب به هم‌ریختگی لایه مرزی حرارتی، افزایش اختلاط شعاعی، و تشدید انتقال حرارت جابجایی می‌شوند. این جریان‌های پیچشی منجر به ایجاد گرادیان سرعت بالا در نزدیکی دیواره می‌گردند و بدین‌وسیله موجب بهبود چشمگیر عملکرد حرارتی می‌شوند. با این حال، این بهبود حرارتی همواره با افزایش افت فشار همراه است که ضرورت بهینه‌سازی هندسی نوارها را دوچندان می‌سازد.

در همین راستا، تحقیقات اخیر بر روی نوعی از نوارهای اصلاح‌شده موسوم به نوارهای پیچ‌خورده‌ی کوتاه متمرکز شده‌اند. مطالعات عددی و تجربی نشان داده‌اند که نوارهای پیچ‌خورده‌ی کوتاه توانایی تولید جریان‌های چرخشی قوی و ساختارهای گردابه‌ای پایدار در ناحیه‌ی پایین دست نوار را دارند. این ساختارها، علی‌رغم محدودیت فضایی، با حفظ چرخش محوری منظم، نقش مهمی در بهبود انتقال حرارت به‌ویژه در رژیم‌های گذرا و آشفته ایفا می‌کنند. مطالعات متعددی در زمینه ساختار دنباله بعد از نوار پیچ‌خورده صورت گرفته است. این مطالعات شامل مدل‌سازی‌های ریاضی، تحلیل‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی می‌باشد که همگی به روشن‌تر شدن نقش نوارهای پیچ‌خورده در افت فشار و انتقال حرارت کمک کرده‌اند. بررسی این پدیده از دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد و در دهه‌های بعد، با پیشرفت روش‌های عددی و تجربی، گسترش یافته است.

در پژوهش‌های تجربی، تأثیر پارامترهای متعدد هندسی مورد بررسی قرار گرفته که از این موارد می‌توان به مطالعه گام پیچش نوار [۱] ناهمواری‌های سطحی متفاوت [۲-۴]، تغییر مسیر نوار پیچ‌خورده [۵] تغییر طول [۶، ۷]، عرض [۸] و مکان نوار پیچ‌خورده [۹] اشاره کرد. این تغییرات هندسی زمانی که با تغییر خواص سیال - از جمله استفاده از نانوسیال‌ها با هدایت و ویسکوزیته متفاوت یا حضور فازهای دوگانه - همراه شوند [۱۰]، موجب تغییرات مهمی در انتقال حرارت، توزیع تنش‌های برشی و تمایل جریان به جدایش می‌گردند. در کنار این‌ها، پدیده‌هایی مانند شکست جریان [۱۱]، تولید و تکامل گردابه‌ها [۱۲-۱۴] و تأثیر دیواره‌ها بر ساختار گردابه‌ای [۱۵] نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، کاربرد هوش مصنوعی و مدل‌های یادگیری ماشین نیز به‌عنوان رویکردی نوین در این حوزه مطرح شده است؛ به‌گونه‌ای که الگوریتم‌هایی مانند جنگل تصادفی و شبکه‌های عصبی قادر بوده‌اند عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و شاخص عملکرد حرارتی را با دقت بالا پیش‌بینی کرده و نقش موثری در بهینه‌سازی هندسه و شرایط جریان ایفا کنند. [۱۶]

در دهه‌های اخیر، شبیه‌سازی‌های عددی برای بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت و اصطکاک در جریان‌های داخل لوله‌های مجهز به

نوارهای پیچ‌خورده به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰-۱۷]. این شبیه‌سازی‌ها نقش مهمی در بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های انتقال حرارت ایفا کرده و با تحلیل پارامترهای مختلف هندسی و متغیرهای جریانی، اطلاعات ارزشمندی را برای کاربردهای صنعتی فراهم می‌کنند.

اسکوی و کوی [۲۱] با استفاده از روش حجم محدود به بررسی جریان چرخشی داخل لوله مستقیم پرداختند. این تحقیق نشان داد که مدل توربولانسی $k-\epsilon$ RNG در چرخش کوچک و مدل تنش رینولدز (RSM) در اعداد چرخش بالا عملکرد بهتری دارند. محدودیت‌های این مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان‌های در حال توسعه نشان داد که روش‌های پیشرفته مانند شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) می‌توانند دقت بیشتری ارائه دهند.

کازوهیسا و همکاران [۲۲] از شبیه‌سازی‌های عددی برای بررسی تأثیر جریان ثانویه بر انتقال حرارت در جریان لایه‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که نسبت پیچش و عدد رینولدز به‌طور قابل توجهی بر الگوهای جریان ثانویه و انتقال حرارت تأثیر دارند. همچنین، تغییرات دوره‌ای عدد ناسلت تحت تأثیر جابه‌جایی طبیعی در شرایط جابه‌جایی مختلط مورد بررسی قرار گرفته است.

ایامسا و همکاران [۲۳] با استفاده از مدل‌های مختلف آشفته‌گی نشان دادند که مدل $k-\omega$ SST دقیق‌ترین پیش‌بینی‌های عددی را ارائه می‌دهد. همچنین نوارهای پیچ‌خورده با اتصالات ناکامل و نسبت لقی $(cr=0.1)$ نرخ انتقال حرارت را تا ۴۶/۶٪ افزایش می‌دهند. بهترین عملکرد حرارتی با نوارهای دارای اتصال کامل بدون فاصله یا فاصله کم مشاهده شد.

لیو و بائی [۲۴] تأثیر پیچش نوار بر تشکیل گردابه‌های مارپیچی در جریان‌های آشفته را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که شدت گردابه‌ها با افزایش عدد رینولدز جریان بیشتر گردیده و این گردابه‌ها به‌طور موثری به اختلاط سیال کمک می‌کنند.

نوربخش و همکاران [۲۵] تأثیر تعداد باله‌ها و ایجاد حفره بر نوارهای پیچ‌خورده را بررسی کردند. افزایش تعداد باله‌ها منجر به بهبود انتقال حرارت همراه با افزایش افت فشار شد. ایجاد حفره‌ها تأثیر محدودی بر عملکرد کلی داشت اما توانست تا حدی افت فشار را کاهش دهد.

شارما و پاتل [۲۶] نشان دادند که استفاده از نوار پیچ‌خورده با شکاف نیم دایره‌ای می‌تواند عدد ناسلت را تا ۱/۸ برابر افزایش دهد، اما افت فشار نیز به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. همچنین نوارهای کوتاه‌تر عملکرد حرارتی مشابهی با نوارهای تمام‌طول ارائه دادند و بنابراین گزینه‌ای اقتصادی محسوب می‌شوند.

زابلی و همکاران [۲۷] با مقایسه مدل‌های مختلف توربولانسی با استفاده از روش حجم محدود نشان دادند که روش‌های مدل‌سازی نزدیک دیواره تأثیر قابل توجهی بر دقت شبیه‌سازی دارند. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های آشفته‌گی $k-\epsilon$

استاندارد به همراه روش پیشرفته مدل سازی دیواره و مدل SST k - ω تطابق مناسبی با داده های تجربی داشتند.

کابل و همکاران [۲۸] به بررسی لوله های مارپیچی با مقاطع شیاردار و نوارهای پیچ خورده پرداختند. افزایش مساحت بخش پیچ خورده باعث بهبود عدد ناسلت و افزایش افت فشار شد. همچنین، استفاده از نوارهای مرکز خالی توانست به تعادلی بین انتقال حرارت و افت فشار دست یابد.

اسحاقی و همکاران [۲۹] به بررسی عددی جریان و انتقال حرارت در لوله ای مجهز به نوار پیچ خورده پرداخته و همبستگی های نیمه تجربی برای طول های ورودی هیدرو دینامیکی و حرارتی ارائه کردند. بیرون و همکاران [۳۰] انتقال حرارت در لوله دایره ای مجهز به نوار پیچ خورده با زوایای ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، نوار ۱۲۰ درجه بهترین عملکرد حرارتی را با ضریب عملکرد ۱/۴۲ داشته و همچنین تاثیر نانو سیال بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت.

فجر و همکاران [۳۱] اثر خارج از مرکز بودن نوار پیچ خورده در لوله ای با جریان آشفته ی هوا را با استفاده از شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نوار مرکزی بیشترین انتقال حرارت را دارد، اما نوارهای خارج از مرکز با افت فشار کمتر عملکرد حرارتی-هیدرولیکی مناسبی ارائه می دهند.

روچا و همکاران [۳۲] تاثیر تنظیم پارامتر β^* مدل SST k - ω را بر نتایج شبیه سازی های عددی یک توربین بادی محور افقی مقیاس کوچک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که تغییر پارامتر β^* بیشترین تاثیر را بر اصطکاک ویسکوز روی پره ها داشته و تنظیم صحیح آن توانسته پیش بینی های عددی را با داده های تجربی منطبق سازد.

ساکاموتو و همکاران [۳۳] به بررسی انطباق پارامترهای مدل آشفتگی SST k - ω در شبیه سازی جریان های اطراف بدنه کشتی می پردازد. آزمایش ها ابتدا روی ایرفویل دوبعدی NACA4412 با جدایش ملایم انجام شد و سپس نتایج حاصل برای چهار هندسه بدنه کشتی به کار گرفته شده است. یافته ها نشان داد که اصلاح پارامترها، به ویژه افزایش مقدار β^* موجب بهبود توزیع سرعت محوری در صفحه پروانه شده، در حالی که تغییر قابل ملاحظه ای در ضریب مقاومت کلی ایجاد نکرده است.

با وجود مطالعات گسترده انجام شده در مورد اثرات هندسی نوارهای پیچ خورده بر انتقال حرارت و افت فشار که در این بخش به اختصار مورد بررسی قرار گرفت، تاثیر پارامترهای مدل سازی آشفتگی بر این نوع جریان های داخلی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. به ویژه، اغلب مطالعات مقدار عدد پراکتل آشفتگی، Pr_T را ثابت فرض کرده و تاثیر تغییر آن بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، اثر تغییر پارامترهای موثر بر مدل سازی جریان های آشفته که می توانند ساختار گردابه های

مارپیچی و استهلاك انرژی را تغییر دهند، نیز تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته اند. در این راستا، در پژوهش حاضر برای نخستین بار به بررسی تاثیر پارامترهای مدل آشفتگی SST k - ω ، که از روش های پر کاربرد در شبیه سازی های عددی انتقال حرارت در جریان های آشفته داخلی می باشد، پرداخته می شود. همچنین تحلیل کمی تاثیر جریان های چرخشی بر انتقال حرارت در ناحیه پایین دست نوار پیچ خورده ی کوتاه مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور و جهت صحت سنجی نتایج شبیه سازی عددی و بررسی تاثیر پارامترهای آشفتگی، از نتایج بررسی های آزمایشگاهی مرجع [۶] جهت مقایسه استفاده می شود.

۲- معادلات حاکم و مدل آشفتگی

در این پژوهش، معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس متوسط گیری شده، به صورت گسسته در شبیه سازی های عددی مورد استفاده قرار گرفته اند. این معادلات با استفاده از نمایش اندیسی و قانون جمع اندیس های تکراری برای جریان های تراکم ناپذیر و پایا به صورت زیر می باشند [۳۷]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \quad (2)$$

در این معادلات، U_i سرعت متوسط، u_i نوسانات سرعت، P فشار متوسط، x_i مولفه های مختصات، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، $\langle \rangle$ به معنای متوسط یک کمیت و $\langle \rho u_i u_j \rangle$ تانسور تنش رینولدز می باشد. برای مدل سازی $\langle \rho u_i u_j \rangle$ از فرضیه بوسینسک به صورت زیر استفاده می شود [۳۷].

$$\langle \rho u_i u_j \rangle - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = -2\mu_T S_{ij}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

در این رابطه، μ_T ویسکوزیته آشفتگی و S_{ij} تانسور نرخ کرنش متوسط می باشد. در تحقیق حاضر مدل آشفتگی ترکیبی SST k - ω برای مدل سازی μ_T مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش μ_T با استفاده از انرژی جنبشی آشفتگی k و نرخ استهلاك مخصوص $\omega = \epsilon/k$ و از رابطه (۴) مدل سازی می شود [۳۴، ۳۵].

$$\mu_T = \left(\frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{1}{\max \left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{|S| F_2}{a_1 \omega} \right)} \quad (4)$$

در این رابطه α^* ضریب تصحیحی رینولدز پائین، a_1 ضریب مدل (جدول ۱) و $|S| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ اندازه تانسور نرخ کرنش متوسط می باشد. مقادیر F_2 و α^* از روابط زیر محاسبه می شوند [۳۴].

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right], \quad (5)$$

$$\alpha^* = \frac{0.024 + \rho k / 6\mu \omega}{1 + \rho k / 6\mu \omega}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \langle \rho u_j T' \rangle \quad (12)$$

که در آن T دمای متوسط، T' نوسانات دما، Γ ضریب انتشار حرارتی و $\langle \rho u_j T' \rangle$ بردار شار حرارتی آشفتگی بوده و بایستی مدل‌سازی شود. با استفاده از فرضیه گرادیان پخش [۳۱] عبارت $\langle \rho u_j T' \rangle$ به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\langle u_j T' \rangle = -\Gamma_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (13)$$

در این رابطه Γ_T ضریب انتشار حرارتی آشفتگی بوده و برحسب عدد پرانتل آشفتگی Pr_t و به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Gamma_T = \nu_T / Pr_t \quad (14)$$

در این پژوهش مقدار Pr_t ثابت (بدون تغییر مکانی) در نظر گرفته شده است و مقدار پیش‌فرض آن ۰/۸۵ می‌باشد.

مدل آشفتگی SST k- ω به دلیل ترکیب مزایای دو مدل $k-\epsilon$ و $k-\omega$ انتخاب شده است. این مدل با استفاده از تابع F_1 در نواحی نزدیک دیواره از فرمول‌بندی $k-\omega$ و در نواحی دور از دیواره از مزایای $k-\epsilon$ بهره می‌گیرد. بر اساس مطالعات متعدد نظیر مراجع [۳۴، ۳۵]، مدل SST k- ω نسبت به مدل‌های استاندارد، در پیش‌بینی جدایش جریان و گرادیان فشار معکوس دقت بالاتری دارد، رفتار نزدیک دیواره را بدون نیاز به توابع تجربی مدل‌سازی می‌کند، و نسبت به مدل $k-\omega$ حساسیت کمتری به شرایط مرزی جریان آزاد دارد [۳۵].

۳- هندسه و شبکه به کار رفته در شبیه‌سازی‌های عددی

دامنه محاسباتی این مطالعه در شکل نمایش داده شده است. این دامنه شامل یک لوله دایره‌ای با قطر داخلی ۲۳/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. هندسه مورد بررسی مربوط به نوار پیچ‌خورده کوتاه با نسبت طول $LR = 0.29$ می‌باشد. نوار دارای ضخامت یکنواخت ۰/۸ میلی‌متر و عرض ۲۳ میلی‌متر بوده و دارای یک پیچش کامل (۳۶۰ درجه) حول محور لوله بوده و نسبت پیچش آن نیز برابر با ۴ است. هندسه مورد استفاده شامل سه بخش اصلی می‌باشد: ناحیه ورودی به طول $10.32D$ به منظور توسعه جریان، ناحیه آزمایشی به طول $27.12D$ جهت استقرار نوار پیچ‌خورده و بررسی جزئیات جریان، و ناحیه خروجی به طول $4.84D$ است. این پیکربندی شرایطی را فراهم می‌سازد تا آن‌ها بر ارتقای تبادل مومنتم و بهبود انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار گیرد. شایان ذکر است که دامنه شبیه‌سازی عددی کاملاً مشابه با پژوهش ایامسا و همکاران [۶] در نظر گرفته شده است.

در این رابطه، y فاصله عمودی تا نزدیکترین دیوار می‌باشد. جمله بیشینه در مخرج معادله (۴) اجازه نمی‌دهد تا مقادیر بزرگ و غیرواقعی برای ویسکوزیته آشفتگی و در نتیجه تنش برشی آشفتگی به دست آید.

برای محاسبه k و ω نیز از معادلات (۶) و (۷) استفاده می‌شود [۳۴، ۳۵].

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon_k, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + P_\omega - \epsilon_\omega + D_\omega \quad (7)$$

در معادلات (۶) و (۷) نرخ تولید آشفتگی P_k و تولید استهلاك مخصوص P_ω از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۳۴].

$$P_k = \mu_T |S|^2, \quad P_\omega = \rho \frac{\alpha \alpha^*}{\mu_T} P_k \quad (8)$$

جملات استهلاك مربوط به k و ω نیز به صورت زیر مدل‌سازی می‌شوند [۳۴].

$$\epsilon_k = \rho \beta_i^* k \omega, \quad \beta_i^* = \beta_\infty^* \left[\frac{4/15 + (k/8\nu\omega)^4}{1 + (k/8\nu\omega)^4} \right] \quad (9)$$

$$\epsilon_\omega = \rho \beta_i \omega^2, \quad \beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2}$$

در این معادله، F_1 از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۴].

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{y^2 \rho \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega,2}^+ y^2} \right]^4 \right\} \quad (10)$$

$$D_{\omega,2}^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right]$$

همچنین مقدار جمله انتشار ضربدری D_ω در معادله (۷) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۴].

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (11)$$

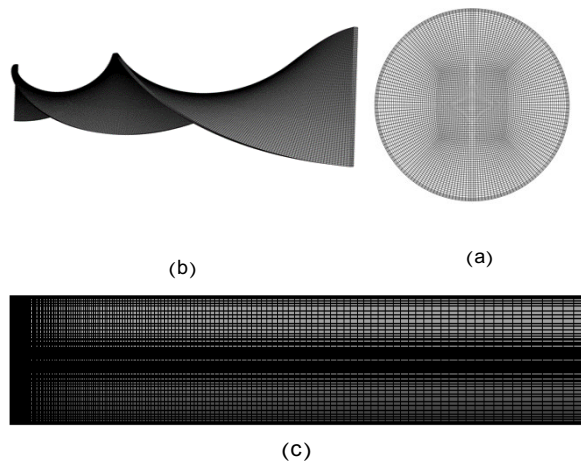
ثابت‌های مورد استفاده در مدل آشفتگی SST k- ω مانند اعداد پرانتل مربوط به k و ω (σ_k و σ_ω) که در معادلات (۴) تا (۱۱) ظاهر شده‌اند در جدول ۱ آورده شده‌اند [۳۴].

جدول ۱ ثابت‌های مورد استفاده در مدل آشفتگی SST k- ω

Number	Constant	Value	Constant	Value
1	α	0.556	$\sigma_{k,1}$	1.176
2	$\beta_{i,1}$	0.075	$\sigma_{k,2}$	1
3	$\beta_{i,2}$	0.0828	σ_ω	$\frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_1)/\sigma_{k,2}}$
4	α_1	0.31	σ_k	$\frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}}$
5	$\sigma_{\omega,1}$	2.0	$\sigma_{\omega,2}$	1.168

همچنین معادله انرژی به صورت زیر می‌باشد:

سلولی مناسب طراحی شده تا رفتار غیرخطی جریان آشسته به درستی بازسازی شود.



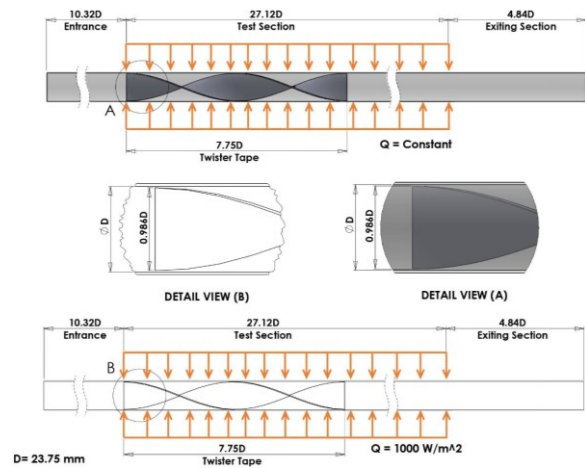
شکل ۱ نمایشی از شبکه ۳ به کار رفته در پژوهش حاضر. سطح مقطع عمود بر جریان (a)، نوار پیچ خورده (b) و یک مقطع عمودی x-y (c)

Fig. 2 View of the employed mesh 3 in the present study. Cross section perpendicular to the flow (a), the twisted tape (b) and an x-y perpendicular plane (c).

ارزیابی کیفیت شبکه بر اساس معیارهای هندسی نشان می‌دهد که ساختار شبکه تولید شده به طور کامل با الزامات حل عددی معادلات ناویر-استوکس در چارچوب روش حجم محدود سازگار بوده و شبیه‌سازی‌های عددی از پایداری مطلوبی برخوردار هستند. نتایج تحلیل کیفیت شبکه بیانگر آن است که میزان تعامد همواره بزرگ‌تر از 0.73 بوده، نسبت ابعاد سلول حداکثر حدود $37/4$ و میزان انحراف یا کجی معادل 0.28 در کل دامنه محاسباتی حفظ شده‌است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که شبکه حاضر از کفایت هندسی لازم جهت تضمین دقت و پایداری شبیه‌سازی‌های عددی برخوردار می‌باشد (نمایی از شبکه ۳ (جدول ۱) در شکل ۱ نمایش داده شده‌است).

۴- شرایط مرزی و حلگر عددی

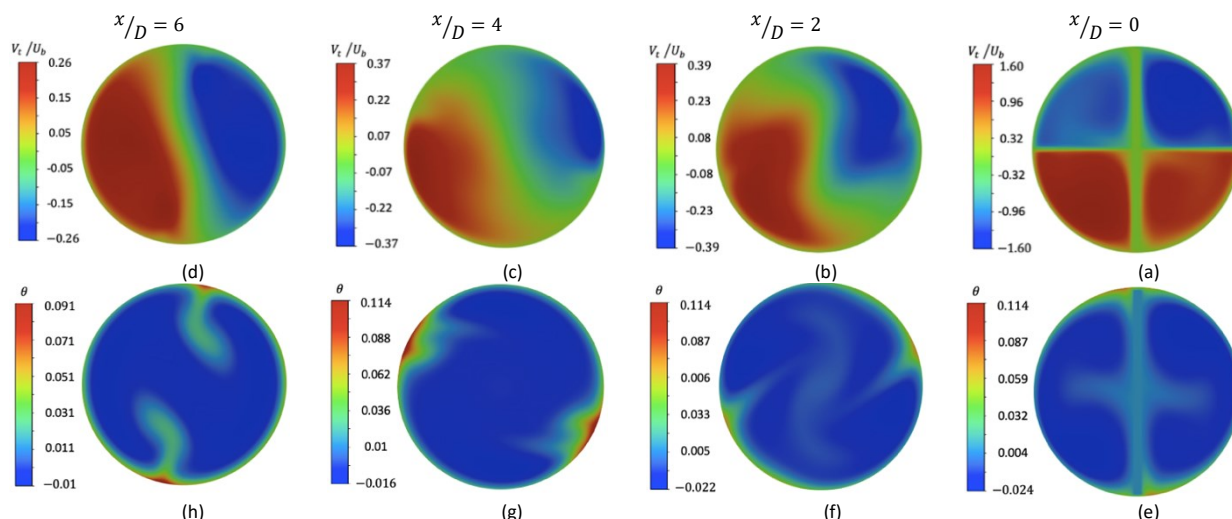
شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش حجم محدود در نرم‌افزار Fluent صورت گرفته‌اند. جریان سیال به صورت پایا، تراکم‌ناپذیر و آشسته در نظر گرفته شده و سیال عامل هوا با خواص ثابت با چگالی $1/225$ کیلوگرم بر متر مکعب و ویسکوزیته دینامیکی 0.000181 پاسکال-ثانیه می‌باشد. بر اساس قطر داخلی لوله و سرعت ورودی، عدد رینولدز جریان برابر با 4000 می‌باشد. در مرز ورودی جریان، سرعت و دما ثابت و به ترتیب برابر با $2/46$ متر بر ثانیه و 298 کلوین می‌باشند. شدت آشفتگی جریان با توجه به رابطه $I = 0.16 Re^{-1/8}$ برابر $4/56\%$ می‌باشد. در مرز دیگر لوله، شرط مرزی جریان خروجی در نظر گرفته شده‌است. مقدار شار حرارتی 1000 وات بر مترمربع به ناحیه آزمایشی لوله وارد می‌شود.



شکل ۱ طرحواره‌ای از هندسه نوار پیچ خورده کوتاه درون لوله و دامنه به کار رفته در شبیه‌سازی‌های عددی. انتقال حرارت در ناحیه Test section صورت گرفته است. ابعاد هندسی برحسب قطر لوله D بیان شده که برابر 23.75 میلی‌متر می‌باشد.

Fig. 1 A schematic of the short twisted-tape geometry inside the tube and the numerical simulation domain. Heat addition is performed in the test section. The geometrical sizes are expressed in terms of the tube diameter, which is equal to 23.75 mm.

طراحی شبکه محاسباتی، به ویژه در مسائلی که شامل تعاملات پیچیده بین لایه‌های مرزی، جدایش جریان و سازوکارهای تولید گردابه هستند، یکی از مؤلفه‌های اساسی برای شبیه‌سازی‌های عددی دقیق جریان‌های آشسته به شمار می‌آید. در این پژوهش، شبکه‌ای با دقت بالا و ساختاری کاملاً منظم طراحی شده‌است تا توانایی حل گر در پیش‌بینی جزئیات میدان جریان تضمین گردد. همچنین، هم‌راستایی سلول‌ها با جریان به طور ویژه مدنظر قرار گرفته‌است. این موضوع باعث کاهش اثرات ناشی از پراکندگی عددی و افزایش دقت محاسبات، به ویژه در نواحی با گردان‌های شدید سرعت و تنش برشی، می‌شود. همچنین سلول‌ها به شکل سازمان‌یافته و هماهنگ با جریان شکل گرفته‌اند، تا انتقال انرژی و گردابه‌ها با کمترین خطای عددی شبیه‌سازی شوند. به منظور مدل‌سازی دقیق رفتار لایه مرزی، توزیع مناسبی از سلول‌ها در جهت عمود بر سطوح جامد در نظر گرفته شده‌است. در ناحیه نزدیک دیواره، اندازه سلول‌ها به گونه‌ای می‌باشد که فاصله بی‌بعد $y^+ < 5$ برای اولین سلول شبکه حاصل گردد. این مقدار تضمین می‌کند که تمامی سلول‌های مرزی در مجاورت دیواره در زیرلایه ویسکوز قرار داشته و مدل آشفتگی $k-\omega$ SST قادر به شبیه‌سازی مستقیم جریان در مجاورت دیواره، بدون استفاده از تقریب‌های تجربی نظیر توابع دیواره خواهد بود. دقت در طراحی شبکه تنها به ناحیه نزدیک دیواره محدود نبوده، بلکه در سرتاسر دامنه محاسباتی، به ویژه ناحیه اطراف نوار پیچ خورده و دنباله جریان، نیز رعایت شده‌است. در این مناطق، شبکه با تراکم هدفمند و توزیع



شکل ۲ توزیع سرعت مماسی بدون بعد (V_t/U_b) (سطر اول) و توزیع دمای بدون بعد (θ) (سطر دوم) در نقاط $x/D = [0, 2, 4, 6]$ پائین دست نوار پیچ‌خورده در شبیه‌سازی عدد پژوهش حاضر. مبدأ $x = 0$ انتهای نوار پیچ‌خورده می‌باشد.

Fig. 3 Contour plots of the non-dimensionalized tangential velocity (V_t/U_b) (first row) and non-dimensional temperature (θ) (second row) at the twisted tape for the current numerical simulations. The origin $x = 0$ is at the end of the twisted tape, downstream positions $x/D = [0, 2, 4, 6]$

$$e_2^{(k)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{t,i}^{(k+1)} - V_{t,i}^{(k)})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{t,i}^{(k)})^2}} \quad (15)$$

در این رابطه $V_{t,i}^{(k)}$ مقادیر سرعت مماسی در نقطه i روی خط عمودی برای شبکه‌ی k بوده و N تعداد نقاط روی خط عمودی و برابر ۹۹۹ می‌باشد. نتایج بررسی استقلال از شبکه در جدول ۲ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، خطای e_1 برای شبکه ۳ برابر ۰/۲۲٪ و خطای e_2 برای این شبکه ۱/۳۵٪ می‌باشد. با توجه به کوچک بودن این مقادیر، شبکه‌ی ۳ با تعداد سلول بیش از ۶ میلیون به‌عنوان شبکه مناسب برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی که در قسمت بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند انتخاب شده‌است.

جدول ۲) مقایسه معیارهای e_1 و e_2 برای شبکه‌های مختلف

Table 2) Comparison of the e_1 and e_2 for different meshes.

Number	Number of elements	e_1	e_2
1	1,676,840	0.442	11.02
2	3,353,680	0.367	6.35
3	6,364,370	0.220	1.35
4	8,993,960	--	--

۶- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، ابتدا به بررسی کلی جریان و دما در مقاطعی از جریان در پائین دست نوار پیچ‌خورده پرداخته خواهد شد. ستائیر پارامترهای مدل‌سازی آشفتگی بر جریان و انتقال حرارت مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۶-۱- توزیع سرعت مماسی و دما در مقاطع مختلف جریان

توزیع سرعت مماسی بدون بعد V_t/U_b در مقاطع مختلف جریان در $x/D = [0, 2, 4, 6]$ در شکل ۲ (d-a) نمایش داده شده‌است.

که در شکل مشخص شده‌است. همچنین در کلیه سطوح جامد، شرط عدم لغزش و نفوذناپذیری در نظر گرفته شده‌است. حل عددی معادلات جریان با استفاده از حلگر مبتنی بر فشار و تحت شرایط پایدار انجام می‌گیرد. برای اتصال فشار و سرعت از الگوریتم Coupled استفاده گردید تا پایداری عددی و نرخ همگرایی مناسبی داشته باشد. گسسته‌سازی مکانی معادلات فشار، مومنتوم، آشفتگی و انرژی به روش مرتبه دوم پادبادسو صورت گرفته‌است تا دقت گسسته‌سازی مرتبه دو حفظ شود. برای مدل‌سازی آشفتگی، از مدل $k-\omega$ SST استفاده گردیده‌است که تعادلی مناسب بین دقت مدل‌سازی در نواحی نزدیک دیواره و پیش‌بینی جدایش جریان فراهم می‌کند. این مدل به‌ویژه برای جریان‌هایی با گرادیان فشار معکوس و آشفتگی‌های پیچیده در مجاورت دیواره، همانند جریان‌های ثانویه ناشی از نوار پیچ‌خورده، مناسب است. معیار همگرایی در شبیه‌سازی‌های عددی حاضر کاهش مقدار باقی‌مانده نرمال شده کلیه معادلات حاکم به کمتر از 10^{-5} و همچنین ناچیز بودن تغییرات کمی متغیرهای کلیدی در گام‌های متوالی در نظر گرفته شده‌است.

۵- بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی‌های عددی از شبکه

برای اطمینان از وابسته نبودن نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به شبکه مورد استفاده، دو کمیت عدد ناسلت Nu و توزیع سرعت مماسی V_t روی یک خط عمودی در یک نقطه پائین دست جریان بررسی شده‌است. چهار شبکه با تعداد تقریبی ۱/۵، ۳، ۶ و ۹ میلیون گره ایجاد و تغییرات این دو کمیت در هر شبکه نسبت به شبکه قبلی مورد بررسی قرار گرفته‌است. در مورد کمیت V_t از خطای نسبی به روش نرم دوم و به صورت زیر استفاده شده‌است:

بلافاصله پس از نوار پیچ خورده در $x/D = 0$ ، میدان سرعت مماسی دارای چهار ناحیه‌ی کاملاً مجزا با علامت‌های متناوب است. این الگو ناشی از تشکیل دو گردابه‌ی اصلی مارپیچی در ناحیه مرکزی و دو گردابه‌ی ثانویه در نزدیکی دیواره می‌باشد. گردابه‌های اصلی مستقیماً در اثر پیچش نوار و اعمال گشتاور به جریان شکل می‌گیرند، در حالی‌که گردابه‌های ثانویه به دلیل اندرکنش جریان چرخشی با دیواره و وجود گرادیان فشار شعاعی در مرز سیال و دیواره ایجاد می‌شوند [۹]. جهت چرخش متناوب این گردابه‌ها موجب توزیع متقاطع سرعت مماسی در مقطع شده و چهار ناحیه‌ی مجزا از سرعت مماسی مثبت و منفی را ایجاد میکند (شکل ۲a). با افزایش فاصله از نوار پیچ‌خورده ($x/D = 2, 4, 6$) شدت این گردابه‌ها کاهش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند ضعیف شدن تدریجی ساختارهای گردابه‌ای به دلیل پخش ویسکوز و آشفتگی جریان و نیز انتقال بخشی از تکانه زاویه‌ای به جریان محوری باشد. در نتیجه، در مقاطع پایین‌دست‌تر، ساختار چهارگردابه‌ای به دو گردابه‌ی اصلی و سپس به میدان متقارن و ضعیف‌تر تبدیل می‌شود (شکل‌های ۳b، c و d). از دیدگاه دینامیکی، در ناحیه‌ی خروجی نوار، وجود چرخش شدید سیال باعث شکل‌گیری گرادیان فشار شعاعی قابل توجهی می‌شود؛ به گونه‌ای که فشار در ناحیه‌ی مرکزی کمتر و در نزدیکی دیواره بیشتر است. این گرادیان فشار موجب افزایش سرعت مماسی در اطراف محور و کاهش آن در نزدیکی دیواره می‌گردد. با فاصله گرفتن از نوار، این گرادیان کاهش یافته و میدان سرعت مماسی به سمت توزیع یکنواخت‌تر و متقارن‌تر میل می‌کند.

توزیع دمای متوسط بدون بعد θ نیز در مقاطع $x/D = [0, 2, 4, 6]$ در شکل ۲ (h-e) نمایش داده شده است. این کمیت را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

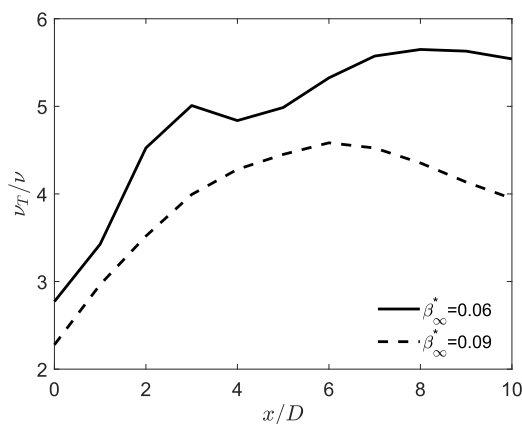
$$\theta = \frac{T - T_b}{\frac{q'' D}{k}} \quad (16)$$

در این رابطه، T دمای متوسط در یک مقطع از جریان، q'' شار حرارتی، k ضریب هدایت حرارتی و T_b متوسط دمای ورودی و خروجی جریان می‌باشد. الگوی دما با توزیع سرعت مماسی هم‌بستگی دارد، زیرا میدان دما در این ناحیه تحت تأثیر مستقیم گردابه‌های مارپیچی ایجاد شده در اثر نوار پیچ‌خورده قرار دارد. همانطور که در شکل ۲ (e) مشاهده می‌شود، حضور گردابه‌های قوی موجب افزایش اختلاط سیال و انتقال حرارت از دیواره‌ی گرم به نواحی مرکزی لوله می‌شود. در نتیجه، دمای سیال در مرکز افزایش یافته و نواحی نزدیک دیواره، به ویژه گوشه‌ها، دمای پایین‌تری دارند. این اختلاف دمای موضعی بیانگر نقش گردابه‌های مارپیچی در بهبود جابه‌جایی حرارتی و ایجاد الگوی حرارتی ناهمگن در ناحیه‌ی نزدیک خروجی نوار است.

با فاصله گرفتن از نوار و افزایش x/D ، در اثر وجود گردابه‌ها و اختلاط آشفتنه توزیع دما همگن‌تر شده و حداقل دما نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲ f، g و h). دو نقطه با دمای بالاتر از مقدار میانگین در محیط لوله در پائین دست لوله پیچ‌خورده شکل می‌گیرد که مربوط به نقاط کمینه سرعت در اثر اندرکنش ساختارهای آشفتگی جریان می‌باشد و در شکل ۲ (f، g و h) در مقاطع $x/D = [2, 4, 6]$ مشاهده می‌شود.

۶-۲- اثر تغییرات پارامتر β^* بر کمیت‌های انتگرالی جریان

دقت شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز (RANS) و مدل‌های آشفتگی به پارامترهای مورد استفاده در این مدل‌ها بستگی دارد. از آنجایی که این پارامترها عمومیت ندارند برای هر جریان می‌توان مقدار بهینه آن‌ها را مشخص کرد. به عنوان مثال می‌توان به پژوهش‌های صورت گرفته در مراجع [۳۳، ۳۲] اشاره کرد. عملکرد روش $k - \omega$ SST نیز به تنظیم پارامترهای تجربی آن، از جمله β^* ، وابسته می‌باشد. این پارامتر به‌طور مستقیم در معادله انتقال نرخ استهلاک ویژه انرژی جنبشی آشفتگی ϵ_k ظاهر می‌شود (معادله ۹) و بر رفتار ویسکوزیته آشفتگی و میزان استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد. در این بخش، ابتدا اثر تغییر پارامتر β^* بر ویسکوزیته آشفتگی، و سپس بر ضریب اصطکاک و عدد ناسلت جریان مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. برای بررسی اثر تغییر β^* بر ویسکوزیته آشفتگی، تغییرات ویسکوزیته آشفتگی بدون بعد ν_T/ν برای دو مقدار $\beta^* = 0.06$ و $\beta^* = 0.09$ (حسب فاصله بدون بعد از انتهای صفحه پیچ‌خورده ($x/D = 0$)) در شکل ۳ نمایش داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش β^* از مقدار استاندارد ۰/۰۹ به مقدار بهینه ۰/۰۶ مقدار ν_T افزایش می‌یابد.



شکل ۳ تغییرات ویسکوزیته آشفتگی بدون بعد (ν_T/ν) در راستای جریان x/D

Fig. 4 Variation of the dimensionless eddy viscosity, ν_T/ν , with the non-dimensional streamwise distance, x/D

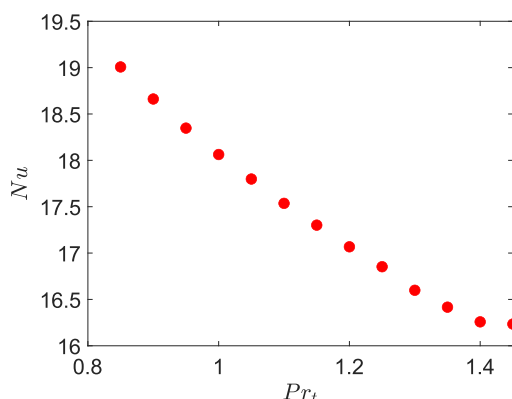
همچنین رابطه تجربی زیر از پژوهش ایامسا و همکاران [۶] به دست آمده است:

$$f = 2.8 Re^{-0.386} LR^{0.19} \quad (۱۸)$$

با استفاده از دو رابطه (۱۷) و (۱۸) می‌توان مقدار β_{∞}^* را پیش از انجام شبیه‌سازی‌های عددی برای شبیه‌سازی‌های حاضر تعیین نمود.

۳-۶- تاثیرات پارامتر آشفته‌گی Pr_t بر عدد ناسلت جریان

عدد پراختل آشفته‌گی Pr_t نقش مهمی در پیش‌بینی‌های عددی انتقال حرارت آشفته دارد. در شکل ۵ تاثیر پارامتر Pr_t بر روی عدد Nu جریان برای شبکه ۳ مشاهده می‌شود. تغییرات Nu با افزایش Pr_t از ۰/۸۵ تا ۱/۴۵ روندی یکنواخت و کاهشی دارد؛ به‌طوری که مقدار Nu از ۱۹/۰۰ در $Pr_t = 0.85$ به ۱۶/۲۳ در $Pr_t = 1.45$ کاهش یافته و معادل ۱۴/۶٪ کاهش را نشان می‌دهد. کاهش عدد ناسلت با افزایش Pr_t نشان‌دهنده کاهش انتقال حرارت می‌باشد. با استفاده از تعریف Pr_t که در رابطه (۱۴) نشان داده شده‌است می‌توان فهمید که افزایش Pr_t موجب کاهش ضریب انتشار آشفته‌گی Γ_T و در نتیجه کاهش شار حرارتی آشفته‌گی می‌گردد. کاهش شار حرارتی آشفته‌گی نیز موجب کاهش انتقال حرارت و در نتیجه عدد ناسلت جریان خواهد شد.



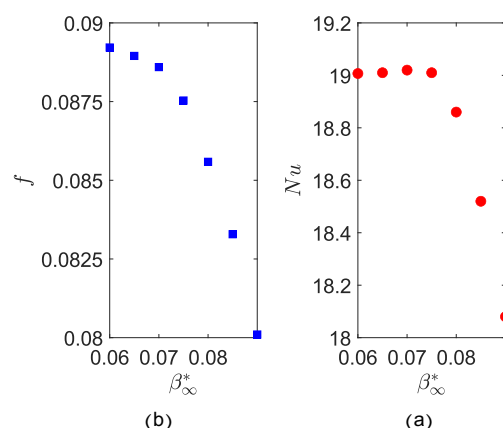
شکل ۵ تاثیر پارامتر Pr_t بر روی عدد Nu جریان برای شبکه ۳
Fig. 6 Effect of the Pr_t parameter on the flow Nu number for mesh 3.

مقایسه با داده‌های تجربی ($Nu = 15.9$) نشان می‌دهد که در مقدار متداول $Pr_t = 0.85$ خطای مدل به حدود ۱۹/۵٪ می‌رسد. با این حال، افزایش کنترل‌شده Pr_t تا مقدار بهینه حدود ۱/۴۵ منجر به کاهش خطا به کمتر از ۲٪ می‌شود. این همگرایی تدریجی با داده‌ی مرجع بیانگر آن است که Pr_t نه صرفاً یک پارامتر عددی ثابت، بلکه یک ضریب کالبراسیون فیزیکی برای بخش حرارتی مدل آشفته‌گی محسوب می‌شود. به بیان دیگر، تنظیم دقیق Pr_t می‌تواند به‌طور مستقیم بر دقت پیش‌بینی شار حرارتی اثر گذاشته و نواقص ذاتی مدل‌های RANS را در پیش‌بینی انتقال حرارت جبرانی نماید.

این افزایش مستقیماً موجب افزایش تنش‌های رینولدز در معادله (۲) و افزایش اثرات آشفته‌گی در جریان می‌گردد. اثر تغییرات پارامتر β_{∞}^* بر ضریب اصطکاک f و عدد ناسلت Nu جریان در شکل ۴ آورده شده‌است. نتایج بیانگر آن است که کاهش β_{∞}^* از مقدار استاندارد ۰/۰۹ به ۰/۰۶ منجر به افزایش هم‌زمان f و Nu می‌گردد. به‌طور مشخص، ضریب اصطکاک از ۰/۰۸۰۱ به ۰/۰۸۹۲ افزایش یافته است که معادل حدود ۱۱/۵٪ افزایش می‌باشد (شکل ۴a).

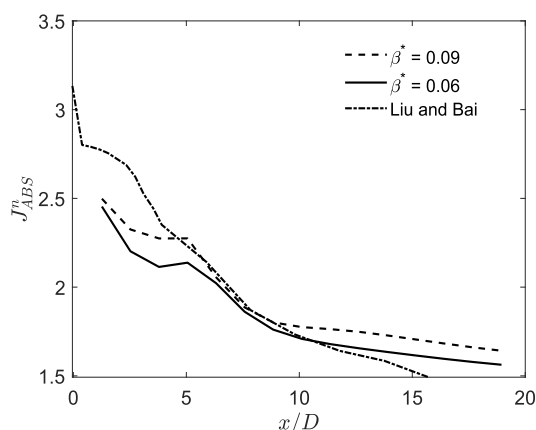
در مقابل، عدد ناسلت از ۱۸/۰۸ به ۱۹/۰۱ افزایش یافته که رشد کمتری در حدود ۵/۱٪ را نشان می‌دهد (شکل ۴b). افزایش ضریب اصطکاک، ناشی از افزایش ν_T می‌باشد. از دیدگاه فیزیکی، کاهش β_{∞}^* سبب تقویت اثرات نزدیک دیواره و افزایش شدت برش در لایه مرزی می‌شود. این پدیده مستقیماً باعث افزایش تنش برشی دیواره و در نتیجه رشد ضریب اصطکاک می‌گردد. افزایش انتقال حرارت در لوله در اثر کاهش پارامتر مدل‌سازی β_{∞}^* در اثر افزایش ضریب انتشار حرارتی می‌باشد. زیرا ویسکوزیته آشفته‌گی افزایش یافته و از آنجایی که عدد پراختل آشفته‌گی ثابت می‌باشد ($Pr_t = 0.85$) ضریب انتشار آشفته‌گی نیز افزایش می‌یابد که منجر به افزایش عدد Nu می‌گردد. مقایسه با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که مدل در β_{∞}^* استاندارد مقدار اصطکاک را کمتر از مقدار تجربی و عدد ناسلت را بیش‌تر از آن پیش‌بینی می‌کند. کاهش β_{∞}^* موجب نزدیک شدن f به مقدار تجربی می‌شود، اما همین تغییر باعث واگرایی بیشتر در پیش‌بینی Nu نسبت به مقدار مرجع می‌گردد. بنابراین، اصلاح β_{∞}^* به تنهایی قادر به بازتولید دقیق هم‌زمان رفتار دینامیکی و حرارتی جریان نمی‌باشد. با توجه به تغییرات f با پارامتر β_{∞}^* که در شکل ۴ نشان داده شده‌است می‌توان رابطه زیر را به داده‌های شبیه‌سازی عددی برازش نمود:

$$f = 0.04461 \beta_{\infty}^{*-0.253} \quad (۱۷)$$



شکل ۴ تاثیر پارامتر مدل‌سازی β_{∞}^* بر عدد ناسلت (a) و f (b) برای شبکه ۳.

Fig. 5 Effect of the model parameter β_{∞}^* on the Nusselt number Nu (a) and f (b) for mesh 3.



شکل ۶ نمایش پارامتر J_{ABS}^n (بدون بعد شده با $2U_b/D$) در پائین دست نوار پیچ خورده برای دو مقدار پارامتر β^* و شبکه ۳ برای شبیه سازی های حاضر و نتایج مرجع [۲۴].

Fig. 7 Representation of the parameter J_{ABS}^n (non-dimensionalized by $2U_b/D$) downstream of the twisted tape for two values of the parameter β^* , using mesh 3 for the present simulations and the reference data [24].

بیشینه محلی مشاهده شده در نزدیکی $5D$ ، که بر خلاف روند کاهشی مشاهده شده می باشد ناشی از برهم کنش و ادغام گردابه ها در نزدیکی این نقطه می باشد. در واقع نوار پیچ خورده، گردابه های مارپیچی تولید می کند که پس از طی مسافتی معادل با چند برابر قطر لوله به تدریج در اثر فرایند انتشار و اندرکنش اب دیواره ها ضعیف و پراکنده می شوند. اما در فاصله ای حدود $5D$ ، چندین ساختار گردابه ای به یکدیگر نزدیک شده و در فرآیند ادغام جزئی، تمرکز محلی و رتیسسته افزایش می یابد که همین امر منجر به افزایش محلی مقدار J_{ABS}^n مشاهده شده در شکل می گردد.

۴-۵- تاثیر پارامتر β^* بر ساختارهای مارپیچی شکل جریان

برای شناسایی و نمایش ساختارهای گردابه ای در جریان پس از نوار پیچ خورده از معیار Q استفاده شده است. این معیار بر اساس مقایسه ای اندازه تانسورهای نرخ چرخش $||\Omega||$ و کرنش $||S||$ و به صورت زیر تعریف می شود [۳۶]:

$$Q = \frac{1}{2} (||\Omega||^2 - ||S||^2). \quad (22)$$

که در آن:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad ||\Omega|| = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (23)$$

از این روش عموماً برای مشخص نمودن نواحی از جریان که در آن ها دینامیک چرخشی غالب است استفاده می شود. شکل ۷ سطوح هم تراز شاخص Q را برای دو حالت $\beta^* = 0.06$ و $\beta^* = 0.09$ نمایش می دهد.

با استفاده از داده های نمایش داده شده در شکل ۶ می توان رابطه توانی زیر را استخراج کرد:

$$Nu = 18.061 Pr_t^{-0.3077} \quad (19)$$

همچنین رابطه تجربی زیر از پژوهش ایامسا و همکاران [۶] به برای عدد Nu جریان دست آمده است:

$$Nu = 0.0664 Re^{0.693} Pr^{0.4} LR^{0.122} \quad (20)$$

با استفاده از دو رابطه (۱۹) و (۲۰) می توان مقدار Pr_t را پیش از انجام شبیه سازی های عددی حاضر تعیین نمود.

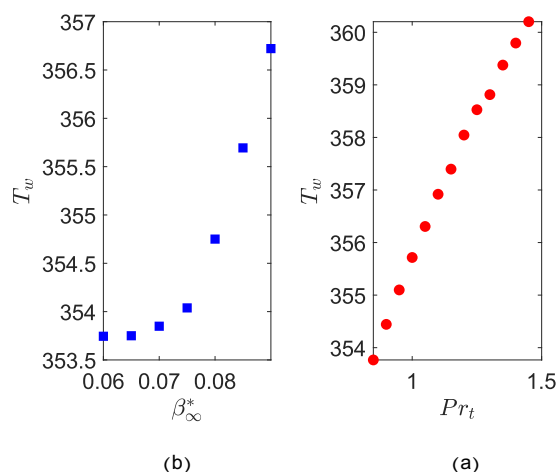
۴-۶- تاثیر پارامتر β^* بر جریان های ثانویه بعد از نوار پیچ خورده

برای بررسی تاثیر پارامتر β^* بر جریان های ثانویه به وجود آمده در اثر نوار پیچ خورده، شار جرمی انستروپی ($\zeta = |\vec{\omega}|/2$)، که به صورت زیر تعریف می شود، مورد استفاده قرار می گیرد [۲۴].

$$J_{ABS}^n = \frac{1}{\dot{m}} \int_A \zeta d\dot{m} \quad (21)$$

در این رابطه $\dot{m}$ نرخ جرم عبوری از سطح مقطع A می باشد. شکل ۶ تغییرات J_{ABS}^n بدون بعد شده را در ناحیه پس از نوار پیچ خورده در فاصله $0 < x/D < 20$ برای دو مقدار پارامتر β^* نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود، J_{ABS}^n با افزایش x در جهت جریان به طور کلی کاهش می یابد. هرچند این کاهش روندی خطی ندارد. همچنین با کاهش β^* مقدار J_{ABS}^n در تمام نقاط پائین دست جریان، کاهش یافته است.

همان طور که در شکل مشاهده می شود، رفتار پارامتر J_{ABS}^n در شبیه سازی های حاضر مشابه رفتار آن در مطالعه ای عددی لیو و بائی [۲۴] می باشد. شایان ذکر است که مطالعه عددی ذکر شده در عدد رینولدز 77000 و با زاویه پیچش 180° درجه و همچنین تفاوت هایی در ضخامت و عرض نوار پیچ خورده صورت گرفته است. با این وجود، تطابق خوبی بین نتایج شبیه سازی های حاضر و نتایج مرجع [۲۴] در بازه $5 < x/D < 10$ مشاهده می شود. این تطابق نتایج نشان می دهد که مکانیزم های غالب در این ناحیه، عمدتاً مربوط به انتشار و اتلاف گردابه ها هستند که ماهیتی عمومی داشته و کمتر تحت تأثیر جزئیات هندسی قرار می گیرند. در ناحیه نزدیک به نوار پیچ خورده اختلاف قابل توجهی میان مقادیر J_{ABS}^n دیده می شود. این تفاوت ناشی از حساسیت میدان جریان به شرایط محلی تولید جریان چرخشی و پارامترهای هندسی است.



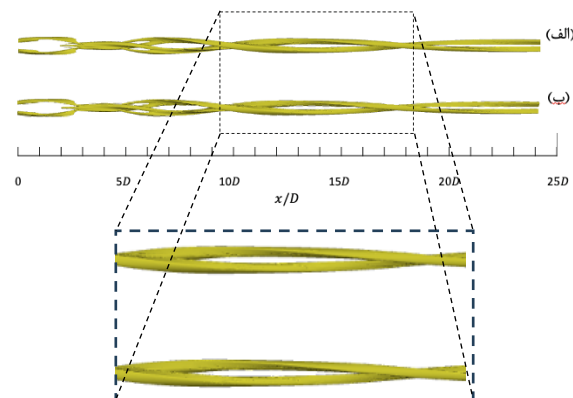
شکل ۸ تغییرات متوسط سطحی دمای دیواره، T_w ، برای ناحیه‌ای که شار حرارتی وارد می‌شود، با پارامترهای Pr_t (a) و β_{∞}^* (b).

Fig.9 Variation of the surface-averaged wall temperature, T_w , for the heated area, with respect to the parameters β_{∞}^* (b) and Pr_t (a)

مشخصی دیده می‌شود افزایش Pr_t از حدود ۰/۸۵ تا ۱/۴۵ منجر به تغییر چند درجه‌ای در T_w می‌گردد که نشان می‌دهد حساسیت پیش‌بینی دمای دیواره نسبت به انتخاب مقدار Pr_t قابل توجه است. تأثیر β_{∞}^* بر دمای دیواره به صورت غیرمستقیم و از طریق تغییر در میدان ویسکوزیته آشفتگی ν_T می‌باشد. به عبارت دیگر β_{∞}^* پارامتری است که با تنظیم رفتار مدل آشفتگی بر تولید/پخش ویسکوزیته آشفتگی مؤثر است و از این طریق به انتقال حرارت آشفتگی و در نهایت بر دمای دیواره اثر می‌گذارد. در نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش β_{∞}^* در بازه مورد بررسی، T_w به صورت صعودی افزایش می‌یابد؛ این امر بدین معناست که در این بازه پارامتری تغییر خالص ν_T ناشی از افزایش β_{∞}^* به سمت کاهش ویسکوزیته آشفتگی بوده است، و از آنجا که کاهش ν_T (در صورتی که Pr_t ثابت باشد) موجب کاهش Γ_T می‌گردد، انتقال حرارت آشفتگی کاهش یافته و T_w افزایش می‌یابد. به بیان ساده‌تر، در محدوده مورد مطالعه، β_{∞}^* رفتاری معادل «تضعیف» نفوذ حرارتی آشفتگی دارد و بنابراین دمای دیواره را بالا می‌برد. شایان ذکر است که این اثر در مقایسه با Pr_t ضعیف‌تر و با نوعی غیرخطی بودن در مقادیر بالاتر β_{∞}^* همراه است.

۶-۷-۶- تاثیر پارامتر β^* بر افت فشار

برای بررسی تاثیر تغییرات پارامتر β_{∞}^* بر روی افت فشار جریان، ضریب فشار C_{Pst} که به صورت زیر تعریف می‌شود، برای دو مقدار $\beta_{\infty}^* = 0.06$ و $\beta_{\infty}^* = 0.09$ در پائین‌دست نوار پیچ‌خورده برای شبیه‌سازی‌های عددی حاضر در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۷ نمایش سطوح هم‌تراز شاخص Q نرمال شده در فاصله 24D در پائین دست نوار پیچ‌خورده برای شبکه 3 برای (a) $\beta_{\infty}^* = 0.09$ و (b) $\beta_{\infty}^* = 0.06$. شکل پائینی بزرگنمایی ناحیه‌ای است که در شکل بالایی با نقطه چین نمایش داده شده است. ناحیه بزرگنمایی شده برای مقایسه طول ساختارهای جریان می‌باشد.

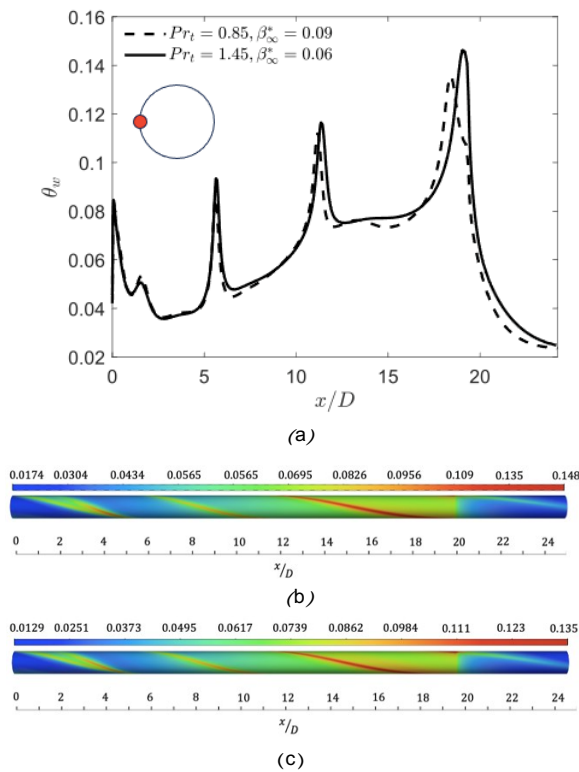
Fig.8 Iso-surfaces of the normalized Q-criterion for 24D distance downstream of the twisted tape for mesh 3 for (a) $\beta_{\infty}^* = 0.09$ and (b) $\beta_{\infty}^* = 0.06$. The lower figure presents a magnified view of the region indicated by the dashed box in the upper figure. The enlarged region is provided for a detailed comparison of the flow structure lengths.

بایستی توجه کرد که در شبیه‌سازی‌های RANS که آشفتگی جریان به طور کامل مدل‌سازی می‌شود، سطوح هم‌تراز شاخص Q جزئیات جریان را نمایش نمی‌دهند بلکه تصویری کلی از قسمت‌های چرخشی جریان ارائه می‌دهند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، ساختارهای گردابه‌ای مارپیچی در اثر وجود نوار پیچ‌خورده در جریان به وجود می‌آیند. همانطور که در سایر پژوهش‌ها نیز می‌توان مشاهده نمود، این ساختارها دارای حالت تناوبی می‌باشند. همانطور که در قسمت بزرگنمایی شده مشخص است می‌توان گفت که کاهش β_{∞}^* (از ۰/۰۹ به ۰/۰۶) موجب افزایش جزئی طول این سطوح هم‌تراز Q می‌شود. این افزایش طول که به سبب کاهش نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی، در اثر کاهش β_{∞}^* ، می‌باشد، رابطه مستقیمی با افزایش انرژی جنبشی آشفتگی دارد.

۶-۶-۶- تاثیر پارامترهای β_{∞}^* و Pr_t بر دمای متوسط سطح لوله

تغییرات دمای متوسط سطح، T_w ، برای ناحیه‌ای که شار حرارتی وارد می‌شود، برحسب دو پارامتر مدل‌سازی جریان آشفته، β_{∞}^* و Pr_t در شکل ۸ نشان داده شده است.

افزایش Pr_t در بازه مورد بررسی موجب افزایش پیوسته و تقریباً خطی دمای دیواره شده است. این رفتار منتج از کاهش نفوذ حرارتی ناشی از آشفتگی است: وقتی Pr_t افزایش یابد، برای یک مقدار مشابه ν_T ، ضریب نفوذ حرارتی آشفتگی (Γ_T) کاهش می‌یابد و بنابراین سهم انتقال حرارت آشفتگی کاهش می‌یابد. این کاهش موجب می‌گردد که برای حفظ شار حرارتی سطحی ثابت دمای دیواره بالاتر رود. در داده‌ها اثر Pr_t نسبتاً قوی و با شیب



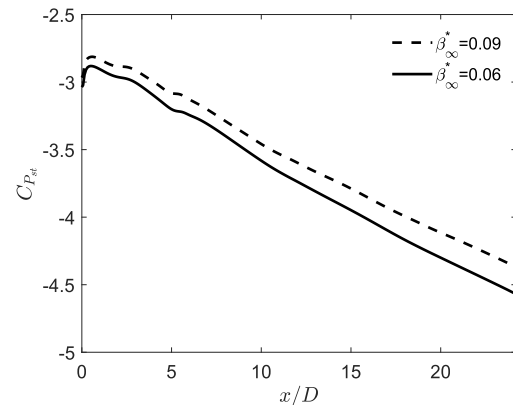
شکل ۱۰ تغییرات دمای بدون بعد $\theta_w(D/2, 180^\circ, x)$ روی دیواره در پائین دست نوار پیچ خورده برای شبیه سازی های عددی با مقادیر مختلف Pr_t و β_∞^* (a) و توزیع دمای بدون بعد θ_w در یک نمای جانبی برای پارامترهای $Pr_t = 1.45$ و $\beta_\infty^* = 0.06$ (b) و برای پارامترهای $Pr_t = 0.85$ و $\beta_\infty^* = 0.09$ (c). نقطه قرمز در شکل (a) محلی را که دمای آن رسم شده در یک مقطع از لوله نشان می دهد.

Fig.11 Variation of the non-dimensional temperature $\theta_w(D/2, 180^\circ, x)$ downstream of the twisted tape for the numerical simulations with different β_∞^* and Pr_t (a) and non-dimensional temperature contours at a side view for $Pr_t = 1.45$ and $\beta_\infty^* = 0.06$ (b) and for $Pr_t = 0.85$ and $\beta_\infty^* = 0.09$ (c). The red dot in the bottom figure shows the location of the point at the tube cross section, at which the temperature is plotted.

همانطور که مشاهده می شود، در بازه $0 < x/D < 18$ دارای روند صعودی می باشد (شکل ۱۰a). همچنین دارای بیشینه های محلی تناوبی می باشد که در هر دو شبیه سازی دیده می شود. محل این بیشینه ها به طور تقریبی در نقاط $x/D = [0.6, 12, 18]$ بوده و دارای تناوب تقریبی $6D$ می باشد. محل بیشینه های شبیه سازی های عددی با مقادیر استاندارد مدل SST k- ω نسبت به مقادیر بهینه برای $x/D > 8$ در x های کوچکتری اتفاق می افتند. همچنین مقدار این بیشینه ها نیز در این حالت کوچکتر می باشند. بعد از $x/D \approx 19$ دمای بی بعد دیواره θ_w روند نزولی داشته و در انتهای لوله به کمترین مقدار خود می رسد. شایان ذکر است، از آنجایی که شار حرارتی در ناحیه $19.37 < x/D < 7.75$ می باشد کاهش دمای دیواره پس از این بازه طبیعی می باشد.

$$C_{P_{st}} = \frac{P - P_{in}}{\frac{1}{2} \rho U_{in}^2} \quad (24)$$

در این رابطه فشار متوسط ورودی و U_{in} سرعت متوسط ورودی می باشد. همانطور که مشاهده می شود، کاهش β_∞^* منجر به کاهش مقدار $C_{P_{st}}$ در ناحیه بعد از نوار پیچ خورده گردیده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده این کاهش موجب افزایش اثرات آشفتگی و افزایش افت فشار جریان می گردد.



شکل ۹ تغییرات ضریب فشار $C_{P_{st}}$ در پائین دست نوار پیچ خورده برای شبیه سازی های عددی حاضر با $\beta_\infty^* = 0.09$ و $\beta_\infty^* = 0.06$.

Fig.10 Variation of the pressure coefficient, $C_{P_{st}}$, downstream of the twisted tape for the current numerical simulations with $\beta_\infty^* = 0.06$ and $\beta_\infty^* = 0.09$.

۸-۶- تاثیر پارامترهای β_∞^* و Pr_t بر توزیع دمای دیواره

از ویژگی های نوارهای پیچ خورده کوتاه در داخل لوله ها، افزایش اختلاط جریان و افزایش انتقال حرارت می باشد. تغییر پارامترهای مدل آشفتگی می تواند بر میزان انتقال حرارت تاثیرگذار باشد. برای مشخص شدن میزان این تاثیر و همچنین مشخص شدن تاثیر گردابه های مارپیچ بر انتقال حرارت دیواره در زمانی که پارامترهای مدل آشفتگی را تغییر می دهیم، تغییرات دمای دیواره در طول لوله در ناحیه بعد از نوار پیچ خورده را برای دو پارامتر مدل آشفتگی β_∞^* و Pr_t مورد بررسی قرار می دهیم. برای این منظور، دمای بدون بعد دیواره θ_w را در راستای یک خط روی لوله $(D/2, 180^\circ, x)$ به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$\theta_w(D/2, 180^\circ, x) = \frac{T_w(x) - T_b}{\frac{q'' D}{k}} \quad (25)$$

در این رابطه q'' شار حرارتی، k ضریب هدایت حرارتی سیال، T_w دمای دیواره در نقطه نشان داده شده در شکل ۱۰ (دایره قرمز) و T_b متوسط دمای ورودی و خروجی می باشد. نتایج شبیه سازی های عددی حاضر برای دو حالت مختلف از ترکیب پارامترهای β_∞^* و Pr_t در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

استهلاک انرژی است. علاوه بر این مشخص شد که ساختارهای مارپیچی به وجود آمده در پائین دست نوار پیچ‌خورده موجب به وجود آمدن بیشینه‌های محلی تناوبی در دمای سطح لوله می‌گردد که اندازه آن‌ها در شبیه‌سازهای عددی با مقادیر بهینه β_{∞}^* و Pr_t افزایش می‌یابد.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

فهرست علائم

p	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Pr	عدد پراتل
Pr_t	عدد پراتل آشفتهگی
u_i	سرعت (m/s)
T	دما (K)
U_b	سرعت میانگین جرمی (m/s)
V_t	سرعت مماسی (m/s)
x_i	مختصات مکانی (m)
D	قطر لوله (m)
x	مختصات مکانی در راستای جریان (m)
k	انرژی جنبشی آشفتهگی (m^2/s^2)
Q	معیار شناسایی گردابه (1/s)
S_{ij}	تانسور نرخ کرنش (1/s)
F_1, F_2	توابع ترکیبی
$C_{p_{st}}$	ضریب فشار استاتیکی
Nu	عدد ناسلت
f	ضریب اصطکاک
LR	نسبت طول نوار پیچ‌خورده به طول لوله
e_1, e_2	خطای نسبی
J_{ABS}^n	شار جرمی نرمال شده اندازه ورتیسیتی

علائم یونانی

β_{∞}^*	ضریب مدل آشفتهگی
Γ_T	ضریب پخش حرارتی آشفته (m^2/s)
ϵ_k	اتلاف آشفتهگی انرژی جنبشی (m^2/s^3)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (kg/ms)
μ_T	ویسکوزیته آشفتهگی (kg/ms)
ν	ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)
ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
σ_k, σ_w	ضرایب مدل آشفتهگی
θ	دمای بی‌بعد
ω	نرخ استهلاک ویژه (s^{-1})
Ω_{ij}	تانسور نرخ چرخش متوسط

زیرنویس‌ها

hوا air

توزیع دمای θ_w از یک نمای جانبی ($x - y$) نیز برای دو مقدار پارامترهای β_{∞}^* و Pr_t مدل در شکل ۱۰ (b) و (c) نمایش داده شده است. این توزیع دما بر روی سطح لوله یافته‌های در شکل ۱۰ (a) را تایید می‌کند. به عبارت دیگر، دما به تدریج و تا محلی که شار حرارتی وارد می‌شود افزایش می‌یابد و دارای بیشینه‌ای می‌باشد که مکان هندسی آن به صورت یک مارپیچ می‌باشد. توزیع مارپیچی دمای بیشینه در این شکل با آنچه در مورد ساختارهای مارپیچی جریان در شکل ۷ مشاهده شد هم‌خوانی دارد. همچنین این شکل مارپیچی در مقدار بیشینه توزیع دمای θ_w با آنچه در مورد مقادیر بیشینه محلی در شکل ۲ (d, e و f) عنوان شد نیز مرتبط می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی‌های عددی به روش حجم محدود و با استفاده از معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز و مدل آشفتهگی دو معادله‌ای $\omega - SST k$ برای جریان داخل یک لوله به همراه یک نوار پیچ‌خورده کوتاه انجام شده و تاثیر پارامترهای مدل‌سازی آشفتهگی β_{∞}^* و عدد پراتل آشفتهگی Pr_t در ناحیه پائین دست نوار پیچ‌خورده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که روش $\omega - SST k$ با مقادیر پیش‌فرض β_{∞}^* و Pr_t ضریب افت فشار جریان را کوچک‌تر و عدد ناسلت آن را بزرگتر از مقادیر به دست آمده در پژوهش تجربی مرجع پیش‌بینی می‌کند. نتایج بررسی استقلال از شبکه نشان می‌دهد که خطای شبیه‌سازی‌های عددی با وجود حل جریان آشفته در نزدیکی دیواره و بدون استفاده از توابع دیواره در ریزترین شبکه مورد استفاده نیز قابل ملاحظه می‌باشد. یکی از دلایل بروز خطا در پیش‌بینی‌های عددی پارامترهای مدل آشفتهگی می‌باشد.

در این پژوهش، برای نخستین بار، مقادیر بهینه پارامترهای β_{∞}^* و Pr_t برای روش $\omega - SST k$ ، با تمرکز بر پیش‌بینی عددی دو کمیت انتگرالی ضریب اصطکاک و عدد ناسلت، در مقایسه با داده‌های تجربی مرجع به دست آورده شد. نتایج نشان می‌دهد که خطای شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مقادیر بهینه نسبت به مقادیر پیش‌فرض بدون صرف هزینه محاسباتی اضافی برای این دو کمیت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این، همبستگی‌های عددی برای ضریب اصطکاک و عدد ناسلت بر حسب دو کمیت β_{∞}^* و Pr_t برای هندسه این پژوهش ارائه شده است، که با استفاده از آن‌ها می‌توان مقدار بهینه این دو کمیت را قبل از انجام شبیه‌سازی‌های عددی تعیین کرد.

نتایج بررسی‌های عددی در این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش β_{∞}^* منجر به افزایش ویسکوزیته گردابه‌ای و افت فشار می‌گردد. همچنین طول ساختارهای مارپیچی گردابه‌ای بعد از نوار پیچ‌خورده نیز با کاهش β_{∞}^* افزایش می‌یابد که ناشی از کاهش نرخ

pipe," *Physics of Fluids*, vol. 21, no. 3, p. 037102, 2009, doi: 10.1063/1.3085699.

[10] S. Khanjani, A. Tavakoli, D. Jalali Vahid, and M. Nazari, "Effect of cut twisted tape and Al2O3 nanofluid on heat transfer of double tube heat exchanger," *mdrjrn*, vol. 15, no. 11, pp. 181-190, 2016. [Online]. Available:

<http://mme.modares.ac.ir/article-15-9413-en.html>.

[11] T. Sarpkaya, "On stationary and travelling vortex breakdowns," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 45, no. 3, pp. 545-559, 1971, doi: 10.1017/S0022112071000181.

[12] C. K. Aidun and M. Parsheh, "Spatially periodic reversing core in a twisted-fin generated swirling pipe flow," *Physics of Fluids*, vol. 19, no. 6, p. 061704, 2007, doi: 10.1063/1.2738611.

[13] F. Kreith and O. K. Sonju, "The decay of a turbulent swirl in a pipe," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 22, no. 2, pp. 257-271, 1965, doi: 10.1017/S0022112065000733.

[14] E. Smithberg and F. Landis, "Friction and Forced Convection Heat-Transfer Characteristics in Tubes With Twisted Tape Swirl Generators," *Journal of Heat Transfer*, vol. 86, no. 1, pp. 39-48, 1964, doi: 10.1115/1.3687060.

[15] S. V. Alekseenko, P. A. Kuibin, V. L. Okulov, and S. I. Shtork, "Helical vortices in swirl flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 382, pp. 195-243, 1999, doi: 10.1017/S0022112098003772.

[16] R. Mehta, A. Gupta, N. Kumar, S. Eiamsa-ard, M. Pimsarn, and S. Chamoli, "Influence of perforated twisted tapes with vortex generator wings on heat transfer performance and entropy in a heat exchanger tube," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 219, p. 110192, 2026/01/01/ 2026, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.110192.

[17] A. W. Date, "Prediction of fully-developed flow in a tube containing a twisted-tape," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 17, no. 8, pp. 845-859, 1974/08/01/ 1974, doi: 10.1016/0017-9310(74)90152-5.

[18] Z.-M. Lin, D.-L. Sun, and L.-B. Wang, "The relationship between absolute vorticity flux along the main flow and convection heat transfer in a tube inserting a twisted tape," *Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 11, pp. 1351-1363, 2009/09/01 2009, doi: 10.1007/s00231-009-0511-z.

[19] P. Eiamsa-ard, N. Piriyaungroj, C. Thianpong, and S. Eiamsa-ard, "A case study on thermal performance assessment of a heat exchanger tube equipped with regularly-spaced twisted tapes as swirl generators," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 3, pp. 86-102, 2014/07/01/ 2014, doi: 10.1016/j.csite.2014.04.002.

[20] R. Cazan and C. K. Aidun, "Analysis of the secondary vortices in rotating Flow induced by a twisted tape inside a pipe," (in en), *Scientia Iranica*, vol. 25, no. Issue 6: Special Issue Dedicated to Professor Goodarz Ahmadi, pp. 3161-3172, 2018, doi: 10.24200/sci.2018.50440.1694.

مقدار متوسط Ave

دیواره w

ورودی in

شاخص مکانی (مختصات و مؤلفه‌های برداری) i, j

منابع

[1] R. M. Manglik, S. Maramraju, and A. E. Bergles, "The Scaling and Correlation of Low Reynolds Number Swirl Flows and Friction Factors in Circular Tubes with Twisted-Tape Inserts," vol. 8, no. 6, pp. 383-395, 2001-12-01 2001, doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.v8.i6.30.

[2] S. W. Chang, Y. J. Jan, and J. S. Liou, "Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, no. 5, pp. 506518, 2007/05/01/2007, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.07.009.

[3] Q. Liao and M. D. Xin, "Augmentation of convective heat transfer inside tubes with three-dimensional internal extended surfaces and twisted-tape inserts," *Chemical Engineering Journal*, vol. 78, no. 2, pp. 95-105, 2000/08/01/ 2000, doi: 10.1016/S1385-8947(00)00134-0.

[4] J. Heeraman, R. Kumar, P. K. Chaurasiya, H. Ivanov Beloev, and I. Krastev Iliev, "Experimental evaluation and thermal performance analysis of a twisted tape with dimple configuration in a heat exchanger," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 46, p. 103003, 2023/06/01/ 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103003.

[5] M. Yilmaz, O. Comakli, S. Yapici, and O. N. Sara, "Heat transfer and friction characteristics in decaying swirl flow generated by different radial guide vane swirl generators," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 2, pp. 283-300, 2003/01/01/ 2003, doi: 10.1016/S0196-8904(02)00053-5.

[6] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, and P. Promvonge, "Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 4, pp. 365-371, 2009/04/01/ 2009, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.01.006.

[7] S. Eiamsa-ard and P. Promvonge, "Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators," *Solar Energy*, vol. 78, no. 4, pp. 483-494, 2005/04/01/ 2005, doi: 10.1016/j.solener.2004.09.021.

[8] S. N. Sarada, A. S. R. Raju, K. K. Radha, and L. S. Sunder, "Augmentation of turbulent flow heat transfer in a horizontal tube with varying width twisted tape inserts," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 797-810, 2012, doi: 10.15282/ijame.6.2012.11.0065.

[9] R. Cazan and C. K. Aidun, "Experimental investigation of the swirling flow and the helical vortices induced by a twisted tape inside a circular

Thermofluids, vol. 27, p. 101260, 2025/05/01/ 2025, doi: [10.1016/j.ijft.2025.101260](https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101260).

[31] M. H. Fagr, H. M. Hasan, and Z. M. A. Alsulaiei, "Effects of acentric twisted tape on heat transfer and flow in tubes," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 75, p. 107263, 2025/11/01/ 2025, doi: [10.1016/j.csite.2025.107263](https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107263).

[32] P. A. C. Rocha, H. H. B. Rocha, F. O. M. Carneiro, M. E. Vieira da Silva, and A. V. Bueno, " $k - \omega$ SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine," *Energy*, vol. 65, pp. 412-418, 2014/02/01/ 2014, doi: [10.1016/j.energy.2013.11.050](https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.050).

[33] N. Sakamoto, T. Hino, H. Kobayashi, and K. Ohashi, "Parameter adaptation of $k - \omega$ SST turbulence model for improving resolution of moderately separated flows around 2D wing and 3D ship hulls via EnKF data assimilation," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 29, no. 4, pp. 885-909, 2024/12/01 2024, doi: [10.1007/s00773-024-01026-y](https://doi.org/10.1007/s00773-024-01026-y).

[34] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605, 1994, doi: [10.2514/3.12149](https://doi.org/10.2514/3.12149).

[35] F. Menter, "Zonal Two Equation $k - \omega$ Turbulence Models For Aerodynamic Flows," in *23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*, (Fluid Dynamics and Co-located Conferences: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993. doi: [10.2514/3.12149](https://doi.org/10.2514/3.12149).

[36] J. Jeong and F. Hussain, "On the identification of a vortex," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 285, pp. 69-94, 1995, doi: [10.1017/S0022112095000462](https://doi.org/10.1017/S0022112095000462).

[37] Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press. doi: [10.1017/CBO9780511840531](https://doi.org/10.1017/CBO9780511840531)

[21] A. Escue and J. Cui, "Comparison of turbulence models in simulating swirling pipe flows," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, no. 10, pp. 2840-2849, 2010/10/01/ 2010, doi: [10.1016/j.apm.2009.12.018](https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.12.018).

[22] Y. Kazuhisa, H. Hidetoshi, T. Saburo, and S. Chikahiro, "Numerical Simulation on Heat Transfer Enhancement in Twisted-Tape-Inserted Tubes," vol. 11, no. 4, pp. 379-390, 2004-11-04 2004, doi: [10.1615/JEnhHeatTransf.v11.i4.160](https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.v11.i4.160).

[23] S. Eiamsa-ard, K. Wongcharee, and S. Sripattanapipat, "3-D Numerical simulation of swirling flow and convective heat transfer in a circular tube induced by means of loose-fit twisted tapes," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 9, pp. 947-955, 2009/11/01/ 2009, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.014](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.014).

[24] W. Liu and B. Bai, "A numerical study on helical vortices induced by a short twisted tape in a circular pipe," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 5, pp. 134-142, 2015/03/01/ 2015, doi: [10.1016/j.csite.2015.03.003](https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.03.003).

[25] M. Noorbakhsh, M. Zaboli, and S. S. Mousavi Ajarostaghi, "Numerical evaluation of the effect of using twisted tapes as turbulator with various geometries in both sides of a double-pipe heat exchanger," *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, vol. 140, no. 3, 2020, doi: [10.1007/s10973-019-08509-w](https://doi.org/10.1007/s10973-019-08509-w).

[26] P. Sharma and V. Kumar Patel, "Computational investigation of the thermo-fluidic effects of inserting twisted tape with alternating twists with notches," *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 1968-1972, 2020/01/01/ 2020, doi: [10.1016/j.matpr.2020.05.565](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.565).

[27] M. Zaboli, M. Nourbakhsh, and S. S. M. Ajarostaghi, "Numerical evaluation of the heat transfer and fluid flow in a corrugated coil tube with lobe-shaped cross-section and two types of spiral twisted tape as swirl generator," *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, vol. 147, no. 1, 2022, doi: [10.1007/s10973-020-10219-7](https://doi.org/10.1007/s10973-020-10219-7).

[28] R. Cabello, A. E. Plesu Popescu, J. Bonet-Ruiz, D. Curc  Cantarell, and J. Llorens, "Heat transfer in pipes with twisted tapes: CFD simulations and validation," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 166, p. 107971, 2022/10/01/ 2022, doi: [10.1016/j.compchemeng.2022.107971](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107971).

[29] M. Seyd Eshaghi, M. Ameri, A. Rasam, and M. Bidi, "Hydrodynamic and thermal entrance region assessment of turbulent flow through a circular tube with a tight-fit twisted tape insert, considering multifarious operating conditions and pitch ratios," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 38, p. 101647, 2023/02/01/ 2023, doi: [10.1016/j.tsep.2022.101647](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101647).

[30] Y. E. Bizuneh, T. D. Kassie, E. B. Gebresilassie, and A. E. Bizuneh, "Numerical investigation on heat transfer of CuO-water nano-fluid in a circular pipe with twisted tape inserts," *International Journal of*