

## Investigation and Analysis of Turbulence Models in Turbulent Flow in Tubular Thermal Economizers

Ahmad Reza Rahmati\* and Mohammad Karimi

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

**Abstract:** Turbulence models serve as essential tools for analyzing and simulating the behavior of turbulent flows in tubular thermal economizers. This study presents a comprehensive and in-depth assessment of several turbulence models, each characterized by its specific capabilities and applications. These models facilitate an improved understanding of heat transfer mechanisms and flow behavior under varying operating conditions. For the economizer of the Isfahan thermal power plant with a capacity of 120 MW, the evaluated results indicate that the actual heat transfer coefficient of the outlet water is  $98.68 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , while that of the outlet flue gas is  $78.16 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . The simulations and analyses were conducted using ANSYS Fluent. According to the obtained results, the LES model was identified as the most accurate approach, achieving a turbulence prediction accuracy of 99.39%. Furthermore, the LES model estimated the outlet water heat transfer coefficient as  $80.68 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  and the outlet gas heat transfer coefficient as  $67.16 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , values that closely match the actual measurements from the Isfahan power plant. These findings not only demonstrate the superior performance of the LES model but also highlight its potential for application in the design optimization and performance enhancement of thermal economizers.

**Keywords:** Tubular Economizer, Turbulence models, Turbulent flow, LES.

Received: Jan. 4, 2026; Revised: May. 1, 2026; Accepted: May. 03, 2026; Published Online: Jun. 16, 2026.

\* Corresponding Author: [ar\\_rahmati@kashanu.ac.ir](mailto:ar_rahmati@kashanu.ac.ir)

How to Cite: Rahmati Ahmad Reza, Karimi Mohammad, Investigation and analysis of turbulence models in turbulent flow in tubular thermal economizers, Journal of Computational Methods in Engineering; 2025, 45(1), 91-125; [doi.org/10.47176/jcme.45.1.1072](https://doi.org/10.47176/jcme.45.1.1072).





## بررسی و تحلیل مدل‌های توربولانسی در جریان آشفته در اکونومایزرهای حرارتی لوله‌ای

احمدرضا رحمتی\*<sup>ID</sup> و محمد کریمی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

**چکیده** - مدل‌های توربولانسی به عنوان ابزارهای کلیدی در تحلیل و شبیه‌سازی رفتار جریان‌های آشفته در اکونومایزرهای حرارتی لوله‌ای شناخته می‌شوند. این پژوهش به بررسی و تحلیل جامع و عمیق مدل‌های مختلف توربولانسی می‌پردازد که هر یک دارای ویژگی‌ها و کاربردهای منحصر به فردی هستند. این مدل‌ها این امکان را فراهم می‌سازد که به درک بهتری از جابجایی حرارت و رفتار جریان در شرایط مختلف دست یافت. نتایج بررسی شده روی اکونومایزر نیروگاه حرارتی برق اصفهان با ظرفیت ۱۲۰ مگاوات نشان می‌دهند که ضریب انتقال حرارت آب خروجی واقعی برابر با ۶۸/۹۸ وات بر متر مربع کلوین و ضریب انتقال حرارت گاز خروجی برابر با ۱۶/۷۸ وات بر متر مربع کلوین است. برای شبیه‌سازی و تحلیل مدل‌ها از نرم‌افزار آنسیس فلونت استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، مدل LES به عنوان بهترین گزینه شناسایی شده است و قادر است با دقتی برابر با ۹۹/۳۹ درصد، جریان آشفته را به خوبی شبیه‌سازی کند. این مدل همچنین توانسته است ضریب انتقال حرارت آب خروجی را ۶۸/۸۰ وات بر متر مربع کلوین و ضریب انتقال حرارت گاز خروجی را ۱۶/۶۷ وات بر متر مربع کلوین در مدل‌سازی بدست آورده است که با عدد واقعی بدست آمده از نیروگاه اصفهان بسیار نزدیک است. این یافته‌ها نه تنها نشان‌دهنده کارایی بالای مدل LES هستند، بلکه می‌توانند در طراحی و بهبود عملکرد اکونومایزرهای حرارتی مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: اکونومایزر لوله‌ای، مدل‌های توربولانسی، جریان مغشوش، LES.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶

\*: نویسنده مسئول، رایانامه: [ar\\_rahmati@kashanu.ac.ir](mailto:ar_rahmati@kashanu.ac.ir)



فهرست علائم

مفهوم	نشانه	مفهوم	نشانه
بردار سرعت سیال	$\mathbf{u}(\frac{m}{s})$	ثابت تجربی (تعیین رفتار جریان آشفته در نواحی با تغییرات شدید)	$C_b$
سرعت جریان در مولفه i	$u_i(\frac{m}{s})$	ظرفیت حرارتی ویژه در حجم ثابت	$C_v(\frac{J}{kg \cdot K})$
سرعت جریان در مولفه j	$u_j(\frac{m}{s})$	ثابت تجربی (تنظیم تخریب ویسکوزیته جریان آشفته)	$C_w$
ترم اثرات اتلاف برای انرژی جنبشی آشفستگی	$Y_K$	نیروهای حجمی	$\mathbb{F}(\frac{N}{m^3})$
ترم تولید انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکم پذیری جریان	$Y_M$	نیروهای خارجی	F
ترم اثرات اتلاف برای نرخ چرخش آشفستگی	$Y_W$	ترم تولید انرژی ناشی از گردابه های متوسط برای نرخ چرخشی آشفستگی	$G_b$
ترم انتشار موثر برای انرژی جنبشی آشفستگی	$\Gamma_k$	ترم تولید انرژی ناشی از گردابه های متوسط برای انرژی جنبشی آشفستگی	$G_K$
ترم انتشار موثر برای نرخ چرخش آشفستگی	$\Gamma_w$	عبارت تولید انرژی ناشی از گردابه های متوسط	$G_w$
اثرات اضافی روی انرژی جنبشی آشفستگی	$S_k(\frac{J}{kg})$	ترم تولید انرژی ناشی از گردابه های متوسط برای انرژی جنبشی آشفستگی	$G_K(\frac{J}{kg})$
اثرات اضافی روی نرخ چرخش آشفستگی	$S_w(\frac{Rad}{s})$	عبارت تولید انرژی ناشی از گردابه های متوسط	$G_w(\frac{J}{kg})$
ترم انتشار موثر برای انرژی جنبشی آشفستگی	$\Gamma_k(\frac{m^2}{s})$	متوسط انرژی جنبشی آشفستگی	$k(\frac{m^2}{s^2})$
نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفستگی	$\epsilon(\frac{m^2}{s^3})$	فشار سیال	p(Pa)
ضریب نسبت تولید انرژی آشفستگی به انرژی اشفتگی موجود	$C_{1\epsilon}$	ویسکوزیته سیال	$\mu(Pa \cdot s)$
ضریب نرخ تخریب انرژی آشفستگی	$C_{2\epsilon}$	ویسکوزیته جریان آشفته	$\mu_t(Pa \cdot s)$
اثرات اضافی روی انرژی جنبشی آشفستگی	$S_\epsilon(\frac{J}{kg})$	ضریب نسبت تنش های برشی و انرژی آشفستگی	$C_\mu$
میزان پراکندگی انرژی جنبشی آشفستگی	$\sigma_k$	چگالی سیال	$\rho(\frac{kg}{m^3})$
تنش برشی	$\tau(\frac{N}{m^2})$	ثابت تجربی، نسبت ویسکوزیته توربولانس به سینماتیک	$\sigma$
ضریب تبدیل فرکانس	$\alpha$	میزان پراکندگی انرژی جنبشی آشفستگی	$\sigma_\epsilon$
ضریب تخریب فرکانس	$\beta$	ویسکوزیته توربولانس	$\nu_t(\frac{m^2}{s})$

۱. مقدمه

مشاهده می شود. شبیه سازی جریان های آشفته به دلیل ناپایداری ذاتی و تطابق غیرخطی در رفتار آن ها، به چالش بزرگی در عرصه مهندسی تبدیل شده است. این امر به ویژه در سیستم های حرارتی

آشفستگی یکی از بنیادی ترین و پیچیده ترین پدیده های جریان سیالات است که در بسیاری از فرآیندهای مهندسی و علمی

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۵، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۵

ناحیه‌ای (ZDES) برای پیش‌بینی جریان‌های ثانویه در یک کمپرسور فشار بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که روش ZDES، مستقل از مدل پایه مورد استفاده، در حفاظت از لایه مرزی چسبیده، ایجاد و توسعه نوسانات آشفته حل‌شده و پیش‌بینی نواحی جدایش عملکرد مناسبی دارد. همچنین، در مقایسه با روش RANS، مدل ZDES توانایی بیشتری در بازتولید ساختارهای گردابه‌ای و نوسانات جریان، به‌ویژه در ناحیه گردابه نشی نوک پره، از خود نشان داد و پیش‌بینی دقیق‌تری از جریان‌های پیچیده و سه‌بعدی ارائه کرد.

اوکانر و همکاران [۳]، مجموعه‌ای از داده‌های زمانی و سه‌بعدی با وضوح بالا از لایه مرزی توربولانسی با استفاده از شبیه‌سازی مستقیم عددی (DNS) تولید کردند. این مجموعه داده، جریان لایه مرزی با گرادیان فشار صفر را تا اعداد رینولدز نسبتاً بالا پوشش داده و علاوه بر میدان‌های لحظه‌ای سرعت و فشار، آمار زمانی جریان را نیز ارائه می‌کند. پژوهشگران بیان کردند که این داده‌ها می‌توانند برای توسعه و ارزیابی مدل‌های آشفتگی، اعتبارسنجی روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی و بهبود درک ساختارهای جریان آشفته در گستره‌ای از اعداد رینولدز مورد استفاده قرار گیرند.

وانگ و همکاران [۴] در سال ۲۰۲۵، این مطالعه رویکردی جامع برای بهبود کارایی انتقال حرارت اکونومایزرها ارائه می‌دهد. با استفاده از یادگیری ماشین و مدل‌سازی فرآیندهای پویا، محققان به بررسی اثرات آلودگی و رسوب بر کارایی حرارتی پرداخته‌اند. این تحقیق از تکنیک‌های شبیه‌سازی عددی و مدل‌های توربولانسی برای ارزیابی تأثیرات مختلف این پارامترها استفاده کرده و می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی و استراتژی‌های عملیاتی در اکونومایزرها کمک کند.

فنگ و همکاران [۵]، عملکرد ترموهیدرولیکی و رفتار رسوب‌گذاری اکونومایزرها را مجهز به لوله‌های پره‌دار ماریچی یکپارچه برای بازیابی حرارت گازهای خروجی بررسی شد. نتایج مطالعه نشان داد که هندسه و آرایش لوله‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر انتقال حرارت، افت فشار و مقاومت حرارتی ناشی از رسوب دارند

و انتقال جرم، مانند اکونومایزرها که نیاز به کنترل دقیق دما و فشار دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

مدل‌سازی دقیق جریان آشفته مستلزم درک عمیق از دینامیک سیالات و ارتباطات بین قلمروهای مختلف فیزیکی است. به‌کارگیری مدل‌های مناسب می‌تواند به شبیه‌سازی مؤثر رفتار جریان، تحلیل عملکرد و بهینه‌سازی طراحی سیستم‌ها منجر شود. به‌منظور غلبه بر چالش‌های مربوط به پیش‌بینی رفتار جریان آشفته، روش‌های مختلفی توسعه یافته است. این روش‌ها تلاش می‌کنند تا با استفاده از اصول نظری و تجربی، پیچیدگی‌های جریان را به مدل‌های قابل مدیریت تبدیل کنند. انتخاب مدل صحیح برای شبیه‌سازی، نه تنها بر دقت نتایج تأثیر می‌گذارد، بلکه می‌تواند بر زمان محاسبات و هزینه‌های اجرایی نیز تأثیرگذار باشد.

در این پژوهش، ضمن بررسی انواع مدل‌های توربولانسی، سعی گردیده تا عملکرد آن‌ها را در شبیه‌سازی فرآیندهای جریان آشفته در اکونومایزرها لوله‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد. این ارزیابی می‌تواند به شناسایی بهترین رویکرد برای دستیابی به نتایج مطلوب کمک کند و در نهایت به بهبود عملکرد سیستم‌های حرارتی و انتقال جرم منجر شود.

در چند دهه گذشته تحقیقات متعددی در مورد مدل‌های توربولانسی صورت گرفته است.

لیو و همکاران [۱] در سال ۲۰۲۱، یک چارچوب یادگیری ماشین برای بهبود مدل‌های آشفتگی RANS ارائه شده است که در آن یک شبکه عصبی بخشی از مدل بستار آشفتگی را اصلاح می‌کند. شبکه با استفاده از داده‌های دقیق DNS آموزش داده شده و در جریان‌های آشفته پیچیده، به‌ویژه جریان‌های دارای جدایش، دقت پیش‌بینی بیشتری نسبت به مدل کلاسیک  $k-\omega$  SST نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که ادغام یادگیری ماشین با مدل‌های RANS می‌تواند قابلیت پیش‌بینی جریان‌های آشفته را به‌طور محسوسی افزایش دهد.

مارتی و اوریه [۲]، تأثیر مدل‌های مختلف آشفتگی RANS به‌عنوان مدل پایه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های جداشده

ژانگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۳، در پژوهشی به مقایسه روش های کلاسیک و یادگیری ماشین در مدل سازی آشفته گی پرداختند. این پژوهش چالش های موجود در مدل سازی دینامیک جریان را بررسی کرده و نشان می دهد که چگونه می توان از رویکردهای داده محور برای بهبود دقت پیش بینی و شبیه سازی استفاده کرد. نتایج این تحقیق برای انتخاب و طراحی مدل های کارآمدتری برای اکونومایزرها کمک می کند.

ژای و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۷، در پژوهشی به بررسی و تحلیل روی شبیه سازی لایه مرزی در سیستم های HVAC و تأثیر آن بر عملکرد اکونومایزرها تمرکز دارد، پرداختند. نویسندگان به مقایسه مدل های مختلف توربولانسی پرداخته و بهترین روش ها را برای شبیه سازی جریان های آشفته و لایه های مرزی معرفی می کنند. این تحقیق می تواند به طراحی بهینه سیستم های حرارتی منجر شود و اطلاعات مهمی در مورد اثرات جریان های آشفته فراهم کند.

بنجمادوش و مرزاری [۱۱] در سال ۲۰۱۹، در پژوهشی یک مرور دقیق از مدل های توربولانسی ارائه می دهند و نقاط قوت و ضعف هر یک از مدل ها را در زمینه سیستم های انرژی تحلیل می کنند. نویسندگان تأکید می کنند که شبیه سازی های مؤثر جریان های آشفته برای بهینه سازی عملکرد سیستم های حرارتی ضروری است. این بررسی می تواند به انتخاب صحیح ترین مدل ها برای اکونومایزرها و افزایش کارایی عمل کند.

وانگ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۰، در پژوهشی به صورت تجربی و عددی به عملکرد هیدرولیکی و حرارتی در سمت لوله یک مبدل حرارتی لوله ای مارپیچی با لوله های سه گوش پیچ دار پرداختند. داده های عددی و تجربی مبدل حرارتی لوله ای سه گوشه ی پیچ دار با لوله های مارپیچی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که به دلیل جریان ثانویه شدیدتر در مبدل حرارتی لوله های سه گوشه ی پیچ دار با لوله های مارپیچی که ناشی از هم پوشانی پیچ کلی دور لوله و پیچ خودی لوله است، ناحیه نزدیک به مرکز لوله های سه گوشه ی پیچ دار با لوله های مارپیچی دارای انرژی جنبشی توربولانسی بالاتری است، در حالی که ناحیه نزدیک

و انتخاب مناسب پارامترهای هندسی می تواند به بهبود همزمان عملکرد حرارتی و کاهش اثرات رسوب گذاری منجر شود.

یانگ و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۴، در پژوهشی به تجزیه و تحلیل تأثیر مکانیک سیالات محاسباتی در کاهش کربن و بهینه سازی سیستم های حرارتی اختصاص دادند. محققان به بررسی اهمیت شبیه سازی های عددی در پیش بینی رفتار جریان های آشفته و چگونگی اثر این شبیه سازی ها بر کاهش اثرات زیست محیطی می پردازند. آن ها بر این باورند که انتخاب مدل های مناسب و منطبق با شرایط خاص در اکونومایزرها می تواند به انجام فرآیندهای انرژی کارآمدتر و بهینه تر کمک کند. نتایج پژوهش نشان می دهند که استفاده از مدل های توربولانسی بهبود یافته می تواند به طراحی سیستم های بهینه تر کمک کند و در نهایت منجر به کاهش استفاده از سوخت های فسیلی و افزایش بهره وری انرژی بشود.

الجوحیسی و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۴، در پژوهشی به بررسی و مقایسه مدل های مختلف جریان آشفته در شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای پرواز پهپادها در آزمایش های تونل باد پرداختند. در این پژوهش، به تحلیل تأثیر انتخاب مدل های توربولانس بر دقت شبیه سازی های دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است و مدل های مختلف جریان آشفته مورد استفاده در نرم افزار انسیس، از جمله مدل های  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  مورد بررسی قرار گرفته است. آن ها با استفاده از داده های تجربی به دست آمده از آزمایش های تونل باد، نتایج شبیه سازی ها را ارزیابی کرده و نقاط قوت و ضعف هر یک از مدل ها را تحلیل کردند.

درماسنا و نصیف [۸] در سال ۲۰۲۳، در پژوهشی به بررسی روش های جدید کنترل دما و فشار در اکونومایزرها می پردازد و شامل ارزیابی عملکرد این کنترل ها در شرایط واقعی و شبیه سازی های عددی است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از مدل های توربولانسی در بهینه سازی این کنترل ها می تواند به بهبود بهره وری انرژی منجر شود. داده های تجربی این پژوهش می تواند اطلاعات مفیدی برای شبیه سازی ها و مدل سازی های جریان آشفته بهتر در این حوزه فراهم کند.

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۵، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۵

مگاواتی، اکونومایزر حرارتی لوله‌ای در نرم افزار کتیا طراحی گردیده است. در این پژوهش با توجه به داده‌های نیروگاه برق اصفهان، جنس لوله‌ها AISI304 در نظر گرفته شده است که دارای مقاومت بالا در برابر انواع خوردگی و زنگ زدگی است. ضریب انتقال حرارت این اکونومایزر  $53/4$  وات بر مترمربع کلون و نوع جریان متقابل است و تعداد ۱۷ ردیف لوله است که ۹ ردیف آن دارای ۷ لوله و ۸ ردیف آن دارای ۶ لوله است، که مجموعاً ۱۱۱ لوله است. با توجه به الزام ایمنی، شیرهای اطمینان و سیستم‌های کنترل دما و فشار روی اکونومایزر نصب گردیده و به‌گونه‌ای است که دسترسی به لوله‌ها و اجزای داخلی به آسانی صورت پذیرد. در ادامه در جدول ۱، ابعاد و پارامترهای طراحی شده در نرم افزار کتیا آمده است.

در ادامه در شکل ۱، ۲ و ۳ به شماتیک و طراحی اکونومایزر حرارتی لوله‌ای در نرم افزار کتیا با توجه به اطلاعات جدول ۱، آمده است.

### ۳. معادلات حاکم

معادلات توربولانس به توصیف رفتار جریان‌های آشفته می‌پردازند. آشفتگی، به عدم پیروی توده‌های متوالی در یک جریان از یک مسیر مشخص اشاره دارد. به عبارت دیگر، هر توده جریان ممکن است به‌طور تصادفی موقعیت خود را تغییر دهد و نمی‌توان به‌طور قطع موقعیت آن را تعیین کرد. این پدیده ذاتاً ناپایدار و وابسته به زمان است. سوال اصلی این است که چگونه می‌توان درباره کل جریان با وجود عدم اطمینان به موقعیت هر توده سیال تصمیم‌گیری کرد. پاسخ این است که می‌توان به‌طور آماری و با دقت قابل توجهی درباره میانگین وقایع درون جریان نظر داد و پیش‌بینی‌هایی انجام داد. در این نوع جریان‌ها، نوسانات و تغییرات سریع در سرعت و فشار وجود دارد که باعث پیچیدگی در تحلیل و مدل‌سازی می‌شود.

به دیواره لوله‌های سه‌گوشه‌ی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی زاویه هم‌سویی بهتری را نشان می‌دهد. دو معیار ارزیابی، معیار ارزیابی عملکرد و عدد هم‌سویی میدانی معرفی شده‌اند تا عملکرد کلی را به‌طور جامع ارزیابی کنند. نتایج نشان می‌دهد که لوله‌های سه‌گوشه‌ی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی در عملکرد هیدرودینامیکی و حرارتی نسبت به لوله‌های مارپیچی بیضوی، لوله‌های مارپیچی ساده و لوله‌های سه‌گوشه عملکرد بهتری دارد. علاوه بر این، نسبت افزایش در عدد ناسلت مبدل حرارتی لوله‌ای سه‌گوشه‌ی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی نسبت به لوله‌های مارپیچی ساده بیش از ۱۹ درصد تا ۳۱ درصد است، در حالی که نسبت افزایش مقاومت جریان از ۲۴ درصد تا ۳۸ درصد می‌رسد. همبستگی‌های جدیدی که برای مبدل حرارتی لوله‌ای سه‌گوشه‌ی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی پیشنهاد شده‌اند با داده‌های شبیه‌سازی سازگار هستند.

نوید و دیوان [۱۳] در سال ۲۰۲۶، در پژوهشی به بررسی پژوهش‌های جاری در مدل‌سازی آشفته‌گی در سیستم‌های حرارتی می‌پردازند. این پژوهش تلاش می‌کند تا به تحلیل مدل‌های مختلف توربولانسی و توانایی آنها در بهبود شبیه‌سازی عملکرد اکونومایزرها بپردازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به شناخت مدل‌های آماری و تجربی و مقایسه آنها در شبیه‌سازی‌های عددی کمک کند.

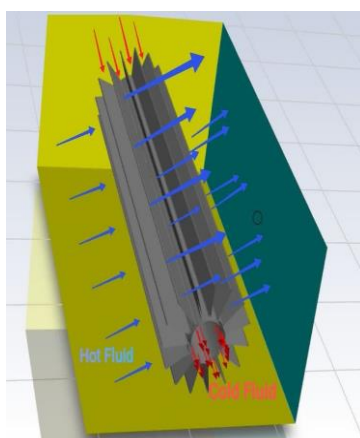
نوآوری پژوهش حاضر، دسترسی کامل و جامع به تحلیل تمامی مدل‌های توربولانسی برای تحلیل و شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در اکونومایزر حرارتی لوله‌ای است و این امکان را برای پژوهشگران فراهم می‌سازد در نیروگاه‌ها و تمام مبدل‌های صنعتی، جهت تحلیل جریان آشفته و با توجه به نیاز پژوهش مورد نظر پژوهشگران، مدل بهینه را انتخاب و با تنظیمات ارائه شده در ضرایب مدل مناسب را انتخاب کنند. همچنین در انتها بهترین مدل تحلیل و بررسی برای اکونومایزرهای لوله‌ای ارائه شده است.

### ۲. معرفی هندسه

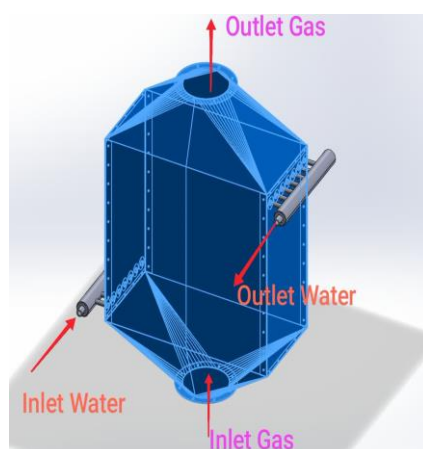
در این بخش با توجه به داده‌ها و نتایج ساختاری اکونومایزر بدست آمده از نیروگاه حرارتی برق اصفهان در واحد ۱۲۰

جدول ۱. ابعاد و اندازه پارامترهای طراحی اکونومایزر لوله ای

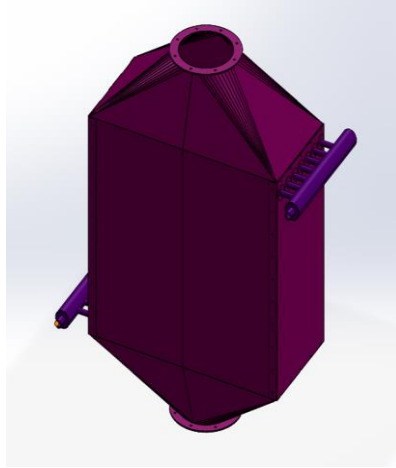
اندازه	واحد	پارامترها
۱۲۰۶/۳۴	سانتیمتر	ارتفاع اکونومایزر
۵۶۷/۲۵	سانتیمتر	عرض اکونومایزر
۱۵۰۸	سانتیمتر	طول اکونومایزر
۴۱۵/۶	سانتیمتر	قطر دایره مخروطی اکونومایزر
۳۵/۶	سانتیمتر	قطر داخلی لوله ها
۴۳/۸	سانتیمتر	قطر خارجی لوله ها
۱۱۱	عدد	تعداد لوله های داخلی
۸۸/۹	سانتیمتر	قطر لوله خارجی در ورودی
۸۸/۹	سانتیمتر	قطر لوله خارجی در خروجی
۱۵	سانتیمتر	ضخامت لوله ها
۱۷	ردیف	تعداد ردیف لوله ها



شکل ۱. شماتیک نمای کلی از نمای بیرونی اکونومایزر



شکل ۲. محدوده شبیه سازی شده در اکونومایزر لوله ای با پره صاف



شکل ۳. محدوده شبیه‌سازی شده برای ورود و خروج هر دو سیال آب و گاز

- معادله نرخ تخریب انرژی جنبشی آشفتگی  $\epsilon$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\epsilon u) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) \\ &- C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{3\epsilon} = 1.3$

که  $G_b$  ترم تولید انرژی ناشی از بویانسی (برای جریان‌های بدون جاذبه و انتقال حرارت صفر است و  $S_\epsilon$  اثرات اضافی روی انرژی جنبشی آشفتگی است.

۳-۲- معادله مدل آشفتگی  $k - \omega$

مدل  $k - \omega$ ، یکی از مدل‌های رایج برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتخته است که به‌ویژه در شرایطی که جریان نزدیک به دیواره‌ها وجود دارد، عملکرد بهتری دارد. این مدل به دو معادله اصلی متکی است که به توصیف انرژی جنبشی توربولانس و نرخ چرخش آن می‌پردازند. این مدل، برای شبیه‌سازی جریان در نواحی نزدیک به دیواره بیرونی اکونومایزر و جریان عبوری از پره‌ها، به کار برده شده است [۷].

۳-۱- معادله مدل آشفتگی  $k - \epsilon$

مدل  $k - \epsilon$ ، یکی از مدل‌های رایج برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتخته است. این مدل به دو معادله اصلی متکی است که به توصیف رفتار انرژی جنبشی توربولانس و نرخ تخریب آن می‌پردازند. از این مدل جهت شبیه‌سازی جریان آشفتخته در درون لوله اکونومایزر حرارتی، به کار برده شده است [۷].

- معادله انرژی جنبشی آشفتگی  $k$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k \\ &+ G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (1)$$

$C_{\mu} = 0.09, G_k = 1.0, \mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon}$

که  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی،  $\epsilon$  نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی،  $\rho$  چگالی سیال،  $u$  مولفه  $x$  بردار سرعت،  $\mu_t$  ویسکوزیته آشفتگی،  $\sigma_k$  میزان پراکندگی انرژی جنبشی آشفتگی،  $G_k$  ترم تولید انرژی ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط جریان،  $G_b$  ترم تولید انرژی ناشی از بویانسی،  $Y_M$  ترم تولید انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکم‌پذیری جریان (برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر صفر است) و  $S_k$  اثرات اضافی روی انرژی جنبشی آشفتگی است.

- معادله انرژی جنبشی آشفتگی  $k$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) + G_k \\ &- Y_k + S_k \end{aligned} \quad (3)$$

که  $\Gamma_k$  ترم انتشار موثر و  $Y_k$  ترم اثرات اتلاف است.

- معادله انرژی جنبشی توربولانسی کی

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( v_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

که  $\varepsilon$  نرخ تخلیه انرژی جنبشی توربولانس،  $v_t$  ویسکوزیته موثر توربولانس،  $k$  انرژی جنبشی توربولانس،  $P_k$  تولید انرژی جنبشی توربولانس است،  $u$  مولفه ی بردار سرعت جریان در امتداد محور  $x$  و  $t$  زمان است.

- معادله نرخ چرخش  $\omega$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \omega u) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega \\ &- Y_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (4)$$

که  $u$  مولفه  $x$  بردار سرعت متوسط،  $G_\omega$  ترم تولید انرژی ناشی از گردابه های متوسط است.  $S_\omega$  اثرات اضافی روی انرژی جنبشی آشفتگی،  $\Gamma_\omega$  ترم انتشار موثر و  $Y_\omega$  ترم اثرات اتلاف است.

- معادله نرخ تخلیه انرژی اسپیلون

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon^2 \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

که  $\varepsilon$  نرخ تخلیه انرژی جنبشی توربولانس،  $v_t$  ویسکوزیته موثر توربولانس،  $k$  انرژی جنبشی توربولانس،  $P_k$  تولید انرژی جنبشی توربولانس،  $C_{\varepsilon 1}$  ثابت تجربی و  $C_{\varepsilon 2}$  ثابت تجربی است.

- معادله نرخ تخلیه جدید

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{C_{\omega 1}}{k} P_k - C_{\omega 2} \omega^2 \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

که  $\omega$  نرخ تخلیه انرژی (ناپایداری)،  $\varepsilon$  نرخ تخلیه انرژی جنبشی توربولانس،  $v_t$  ویسکوزیته موثر توربولانس،  $k$  انرژی جنبشی توربولانس،  $P_k$  تولید انرژی جنبشی توربولانس،  $C_{\omega 1}$  ثابت تجربی و  $C_{\omega 2}$  ثابت تجربی است.

۳-۵- معادله مدل آشفتگی ترنیشن اس اس تی

یکی از مدل های آشفتگی است که برای شبیه سازی جریان های آشفته با شدت بالای تغییرات سرعت و دما تغییرات طراحی شده است [۱].

- معادله کی تلاطم

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} = P_k - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial k}{\partial x} \right) \quad (9)$$

۳-۳- معادله مدل آشفتگی اسپالارت - آلماراس

مدل اسپالارت- آلماراس، یک مدل ساده و کارآمد برای شبیه سازی جریانات توربولانسی است. این مدل برای جریان های مرزی و اعداد رینولدز متوسط کاربرد دارد [۷].

$$\frac{\partial v_t}{\partial t} + u \frac{\partial v_t}{\partial x} = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) + C_b v_t \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) - C_w v_t^2 \quad (5)$$

که  $v_t$  ویسکوزیته توربولانس است. پانویس مربوط به جریان توربولانس،  $u$  مولفه  $x$  بردار سرعت،  $C_b$  ثابت تجربی (پانویس مربوط به رفتار مدل در نواحی با تغییرات شدید جریان است)،  $C_w$  ثابت تجربی (پانویس مربوط به تنظیم نرخ تخریب ویسکوزیته توربولانس است) و  $\sigma$  ثابت تجربی است که نسبت ویسکوزیته توربولانس به ویسکوزیته سینماتیک است.

۳-۴- معادله مدل آشفتگی کی-کی-ال-اومگا

این مدل، یک مدل ترکیبی از مدل کی - اسپیلون و کی - اومگا است که مزایای هر دو مدل را دارد. این مدل برای جریانات با خصوصیات مختلف و در شرایط پیچیده جریان کاربرد دارد [۷].

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۵، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۵

که  $P_k$  تولید تلاطم،  $\beta$  ثابت تصحیح نرخ تخلیه،  $\omega$  نرخ تخلیه تلاطم و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیک است.

- معادله اومگا در حالت گذرا

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} = P_\omega - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \quad (10)$$

که  $P_\omega$  تولید تلاطم،  $\beta$  ثابت تصحیح نرخ تخلیه،  $\omega$  نرخ تخلیه تلاطم و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیک است.

۳-۶- معادله مدل آشفتگی تنش رینولدز

این مدل برای تنش‌های برشی در جریان آشفتنه کاربرد دارد [۳].

- معادله تنش رینولدز

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + u_i' u_j' \quad (11)$$

که  $\tau_{ij}$  تنش رینولدز،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیک سیال،  $u_i' u_j'$  مولفه‌های نوسانی تنش و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونگر است.

۳-۷- معادله مدل آشفتگی اس ای اس

مدل آشفتگی در شبیه‌سازی مقیاس تطبیقی دارای چهار معادله که ترکیبی از معادله کی-اوسیلون و کی-اومگا است [۲].

- معادله کی - اوسیلون

۱- معادله انرژی آشفتگی

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (uk)}{\partial x} + \frac{\partial (vk)}{\partial y} + \frac{\partial (\omega k)}{\partial z} = P_k - \varepsilon \quad (12)$$

که  $k$  میزان انرژی جنبشی،  $P_k$  میزان تولید انرژی آشفتگی و  $\varepsilon$  نرخ کاهش انرژی آشفتگی است.

۲- معادله تخریب انرژی آشفتگی

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (u\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (v\varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\omega\varepsilon)}{\partial z} = \frac{\varepsilon}{k} C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon \quad (13)$$

که  $k$  میزان انرژی جنبشی،  $P_k$  میزان تولید انرژی آشفتگی،  $\varepsilon$  نرخ کاهش انرژی آشفتگی،  $C_{1\varepsilon}$  ضریب تولید انرژی آشفتگی و  $C_{2\varepsilon}$  ضریب تخریب انرژی آشفتگی است.

- معادله کی - اوسیلون

۳- معادله انرژی آشفتگی

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (uk)}{\partial x} + \frac{\partial (vk)}{\partial y} + \frac{\partial (\omega k)}{\partial z} = P_k - \beta \omega k \quad (14)$$

که  $\omega$  فرکانس آشفتگی،  $k$  میزان انرژی جنبشی،  $P_k$  میزان تولید انرژی آشفتگی،  $\alpha$  ضریب تبدیل فرکانس و  $\beta$  ضریب تخریب فرکانس است.

۴- معادله فرکانس آشفتگی

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial (u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial (v\omega)}{\partial y} + \frac{\partial (\omega\omega)}{\partial z} = \frac{\alpha}{k} P_k - \beta \omega^2 \quad (15)$$

که  $\omega$  فرکانس آشفتگی،  $k$  میزان انرژی جنبشی،  $P_k$  میزان تولید انرژی آشفتگی،  $\alpha$  ضریب تبدیل فرکانس و  $\beta$  ضریب تخریب فرکانس است.

۳-۸- معادله مدل آشفتگی دی ای اس

این مدل باری شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده و آشفتگی به ویژه در نواحی جدایی استفاده می‌شود. این مدل ترکیبی از مدل‌های LES و RANS است. در نزدیکی دیواره‌های اکنومایزر برای محاسبه تنش‌های برشی و آشفتگی از مدل RANS و در نواحی دورتر از دیواره اکنومایزر برای شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ از LES استفاده می‌شود [۲].

$$\frac{\partial (\overline{\rho u_i})}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{\rho u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\mu}_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \bar{\rho} f \quad (16)$$

که  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط سیال،  $\bar{u}_i$  مولفه  $i$  بردار سرعت متوسط،  $\bar{u}_j$  مولفه  $j$  بردار سرعت متوسط،  $\bar{P}$  فشار متوسط،  $\bar{\mu}_t$  ویسکوزیته توربولانسی سیال و  $f$  نیروی خارجی است.

۳-۹- معادله مدل آشفتگی ال ای اس

این مدل برای شبیه‌سازی دقیق جریان‌های آشفتنه و پیچیده استفاده می‌شود. این مدل بر اساس حل ادی‌های بزرگ و الگوریتم‌های اضافی برای مدل‌سازی ادی‌های کوچکتر بنا شده است. این مدل همانند مدل

سنسورهای دما ( ترموکوپل نوع K با دقت  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  )، فشار (ترانسمیتر فشار WIKA سری S-10 با دقت  $\pm 0.1 \text{ bar}$ ) و دبی جرمی (فلومتر ورتکس با دقت  $\pm 0.8\%$ ) در نقاط کلیدی دستگاه انجام شده است. داده‌ها شامل؛ دمای گاز دودکش در ورودی و خروجی اکونومایزر، دمای آب تغذیه در ورودی و خروجی، فشار بخار دیگ و فشار گاز خروجی، دبی جرمی بخار و آب تغذیه؛ دبی هوای احتراق و نرخ مصرف سوخت گازی هستند. داده‌ها در بازه زمانی ۲۰ دقیقه‌ای و با دوره نمونه‌برداری ۵ ثانیه ثبت شده و میانگین زمانی مقادیر پایدار برای صحت‌سنجی عددی استفاده شده است.

هرچند ثبت پارامترهای موضعی مانند توزیع دما و سرعت درون لوله‌ها، به دلیل شرایط عملیاتی صنعتی ممکن نبود، داده‌های کلان شامل بار حرارتی کل، اختلاف دمای ورودی-خروجی و افت فشار کلی، با دقت کافی استخراج گردید که برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی مناسب است. هرچند جامعیت داده‌های میدان در سطح مطالعات آزمایشگاهی کنترل شده نیست، اما دامنه و دقت داده‌های موجود برای ارزیابی عملکرد مدل‌های توربولانسی در کاربرد صنعتی اکونومایزر، کفایت دارد.

#### ۴-۱- شرایط مرزی ورودی سیال سرد (داخل لوله اکونومایزر)

دمای آب ورودی به لوله اکونومایزر  $30^\circ\text{C}$  کلوین است و سرعت ورودی آب به لوله اکونومایزر  $3/86$  متر بر ثانیه است و فشار ورودی در لوله اکونومایزرها  $3$  مگا پاسکال است.

- اطلاعات ورودی مختص سیال آب عبارت است از:

چگالی آب برابر با  $996$  کیلوگرم بر متر مکعب، و ظرفیت حرارتی ویژه  $4/18$  کیلو ژول بر کیلوگرم کلوین، و هدایت حرارتی برابر با  $0.606$  وات بر متر کلوین، و ویسکوزیته برابر  $0.9$  پاسکال ثانیه است.

#### ۴-۲- شرایط مرزی خروجی سیال سرد (داخل لوله اکونومایزر)

دمای آب خروجی از اکونومایزر برابر با  $423$  کلوین، سرعت خروجی آب  $3/57$  متر بر ثانیه و فشار خروجی  $2/9$  مگا پاسکال

شبيه‌سازی ادى جدا بر اساس معادله ناویر- استوکس می‌کند [۷].

- معادله بقای حرکت (معادله ناویر- استوکس)

$$\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{u}) + \nabla\bar{P} = \rho\bar{f} + \nabla \cdot \tau - \nabla \cdot (\bar{\rho}\bar{u}) \quad (17)$$

که  $\rho$  چگالی،  $\bar{u}$  بردار سرعت سیال،  $P$  فشار،  $\tau$  تنش ویسکوز و  $f$  نیروی حجمی (مانند نیروی گرانش) است.

- معادله ال ای اس

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_j} = \mu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right] - \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_j} \quad (18)$$

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i\bar{u}_j - \bar{u}_i\bar{u}_j = C_{ij} + L_{ij} + R_{ij}$$

$$C_{ij} = \alpha\Delta^2(\bar{u}_i\nabla^2\bar{u}_j + \bar{u}_j\nabla^2\bar{u}_i)$$

$$L_{ij} = \frac{\gamma_L}{2}\nabla^2(\bar{u}_i\bar{u}_j)$$

$$\gamma_L = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 dx \int_{-\infty}^{+\infty} G(x,y,z) dydz$$

$$R_{ij} = 2\nu_t\bar{S}_{ij}$$

$$\Delta = (\Delta x\Delta y\Delta z)^{\frac{1}{3}}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = (C_s\Delta)^2 \sqrt{\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$$

$$0.1 \leq C_s \leq 0.3$$

که  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط سیال،  $u_i$  مولفه  $i$  بردار سرعت متوسط،  $u_j$  مولفه  $j$  بردار سرعت متوسط،  $\bar{P}$  فشار متوسط سیال،  $\mu_t$  ویسکوزیته توربولانسی سیال،  $\tau_{ij}$  تنش برشی،  $C_{ij}$  نمایانگر تنش‌های ناشی از نیروهای داخلی و خارجی است.  $L_{ij}$  نشان دهنده طول‌های نازک مرتبط به گردابه‌ها و ساختارهای آشفته در سیال و  $R_{ij}$  نمایانگر شتاب‌های موضعی در سیال است.

#### ۴. شرایط مرزی

داده‌های تجربی این پژوهش از اکونومایزر واحد بخار نیروگاه حرارتی اصفهان با ظرفیت نامی  $120$  مگاوات استخراج شده‌اند. اندازه‌گیری‌ها توسط سامانه‌های ابزار دقیق کالیبره شده شامل

روش‌های عددی در مهندسی، سال ۴۵، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۵

است.

دماهای بالا انتخاب گردد، در این پژوهش جنس دیواره‌ها از مدل Stainless Steel 316 انتخاب گردیده است. ضخامت دیواره‌ها ۱۲ سانتیمتر است. برای دیواره‌های اکونومایزر، شرایط انتقال حرارت همرفتی و هدایتی در نظر گرفته شده است. همچنین، فرض می‌شود که شرایط عدم لغزش در دیواره‌ها برقرار است. دیواره‌های کناری برای هر لوله پرئودیک است و دیواره‌های بالایی و پایینی و دیواره‌های جلویی و پشت لوله متقارن است.

## ۵. اعتبارسنجی

وانگ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۰، در پژوهشی به صورت تجربی و عددی به عملکرد هیدرولیکی و حرارتی در سمت لوله یک مبدل حرارتی لوله‌ای مارپیچی با لوله‌های سه‌گوش پیچ‌دار پرداختند. داده‌های عددی و تجربی مبدل حرارتی لوله‌ای سه‌گوشی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مبدل حرارتی لوله‌های سه‌گوشی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی، جریان ثانویه شدت بیشتری دارد. علت این جریان ثانویه قوی‌تر، هم‌پوشانی «پیچ کلی دور لوله» و «پیچ خود لوله» است.

در اثر این وضعیت، در ناحیه‌ی نزدیک به مرکز لوله‌های سه‌گوشی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی، انرژی جنبشی توربولانسی بیشتر است. در مقابل، ناحیه‌ی نزدیک به دیواره‌ی این لوله‌ها زاویه‌ی هم‌سویی بهتری را نشان می‌دهد. دو معیار ارزیابی، معیار ارزیابی عملکرد و عدد هم‌سویی میدانی معرفی شده‌اند تا عملکرد کلی را به‌طور جامع ارزیابی کنند. نتایج نشان می‌دهد که لوله‌های سه‌گوشی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی در عملکرد هیدرودینامیکی و حرارتی نسبت به لوله‌های مارپیچی بیضوی، لوله‌های مارپیچی ساده و لوله‌های سه‌گوشی عملکرد بهتری دارد. علاوه بر این، نسبت افزایش در عدد نوسلت مبدل حرارتی لوله‌ای سه‌گوشی پیچ‌دار با لوله‌های مارپیچی نسبت به لوله‌های مارپیچی ساده بیش از ۱۹ تا ۳۱ درصد است.

- اطلاعات مختص سیال آب عبارت است از:

چگالی آب برابر است با ۹۹۶ کیلوگرم بر متر مکعب و ظرفیت حرارتی ویژه ۴/۱۸ کیلو ژول بر کیلوگرم کلون است و هدایت حرارتی برابر است با ۰/۶۰۶ وات بر متر کلون و ویسکوزیته برابر ۰/۹ پاسکال ثانیه است.

### ۳-۴- شرایط مرزی ورودی سیال گرم (بیرون لوله اکونومایزر)

دمای ورودی گازها به اکونومایزر ۸۷۳ کلون است و سرعت ورودی آب برابر است با ۱۴ متر بر ثانیه و فشار ورودی ۶ مگا پاسکال است.

- اطلاعات مختص سیال گاز خروجی از بویلر عبارت است از:

چگالی گاز برابر با ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و ظرفیت حرارتی ویژه ۱۰۰۶/۴۳ ژول بر کیلوگرم کلون و هدایت حرارتی برابر با ۰/۴۲ وات بر متر کلون و ویسکوزیته ۱۷/۸۹۴ میکرو پاسکال ثانیه است.

### ۴-۴- شرایط مرزی خروجی سیال گرم (بیرون لوله

اکونومایزر)

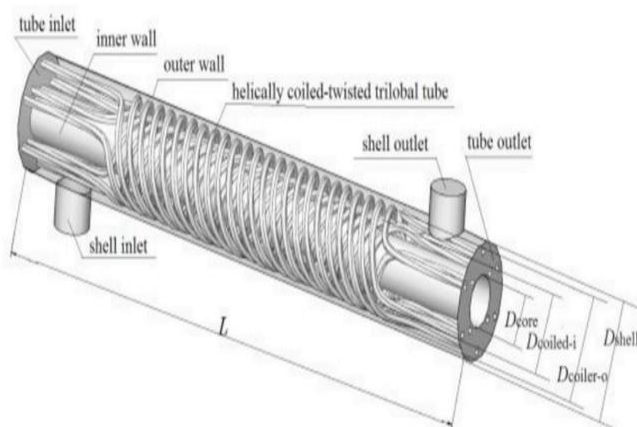
دمای خروجی گازها از اکونومایزر ۵۹۳ کلون و سرعت خروجی ۸ متر بر ثانیه و فشار خروجی گاز ۳ مگا پاسکال است.

- اطلاعات مختص سیال گاز خروجی از بویلر عبارت است از:

چگالی گاز برابر با ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، و ظرفیت حرارتی ویژه ۱۰۰۶/۴۳ ژول بر کیلوگرم کلون و هدایت حرارتی برابر است با ۰/۴۲ وات بر متر کلون و ویسکوزیته ۱۷/۸۹۴ میکرو پاسکال ثانیه است.

### ۵-۴- شرایط مرزی دیواره‌ها

برای طراحی دیواره‌ها در یک اکونومایزر حرارتی، شرایط مرزی مشخصی وجود دارد که باید به دقت رعایت شود. برای مارپیچی جنس دیواره‌ها باید فولاد ضد زنگ یا آلیاژهای کربنی با تحمل



شکل ۴. نمایش شماتیک هندسه مبدل حرارتی سه گوشه ای با لوله های مارپیچ [۱۲]

در ادامه اطلاعات و داده های مقایسه ای برای نتایج کار وانگ [۱۲] با کار حاضر در جدول ۲، برای عدد ناسلت و در جدول ۳، برای افت فشار و در جدول ۴، برای ضریب اصطکاک آمده است. همچنین در شکل های ۵، ۶ و ۷ نمودارهای مقایسه ای برای پارامترهای فوق آمده است.

#### ۶. استقلال از شبکه و معیارهای همگرایی

برای اطمینان از استقلال نتایج از اندازه شبکه، سه سطح شبکه شبکه درشت: ۲/۱ میلیون المان، شبکه متوسط: ۳/۶ میلیون المان، و شبکه ریز: ۵/۴ میلیون المان تعریف شد. خروجی های مقایسه شامل ضریب انتقال حرارت کلی، افت فشار کلی و دمای خروجی آب تغذیه بودند. نتایج نشان داد با افزایش اندازه شبکه از درشت به متوسط، اختلاف ضریب انتقال حرارت تقریباً ۳/۲ درصد و افت فشار حدود ۴/۲ درصد تغییر می کند، اما تفاوت بین اندازه شبکه متوسط و ریز کمتر از ۱/۳ درصد است. بنابراین شبکه ریز با ۵/۴ میلیون سلول به عنوان شبکه نهایی انتخاب شد. نوع المان ها عمدتاً پلی هدال سه بعدی همراه با پنج لایه مرزی نزدیک دیواره است و مقدار  $y^+$  متوسط در مجاورت دیواره ها حدود ۲/۵ حفظ شده تا توابع دیواره به درستی حضور یابند.

در حالی که نسبت افزایش مقاومت جریان تا ۲۴ تا ۳۸ درصد می رسد. در ادامه در شکل ۴، هندسه طراحی پژوهش وانگ و همکاران آمده است.

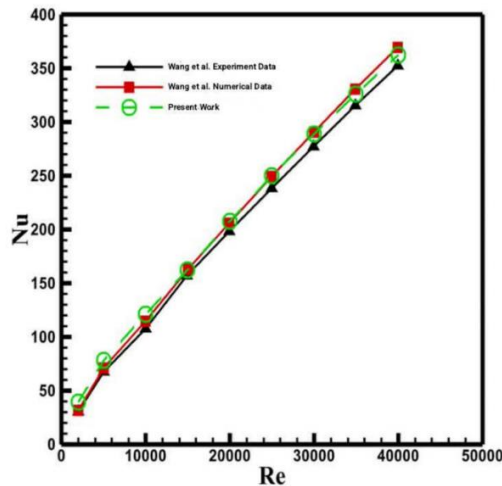
#### ۵-۱- نتایج حاصل از شبیه سازی و مقایسه با نتایج پژوهش

##### وانگ [۱۲]

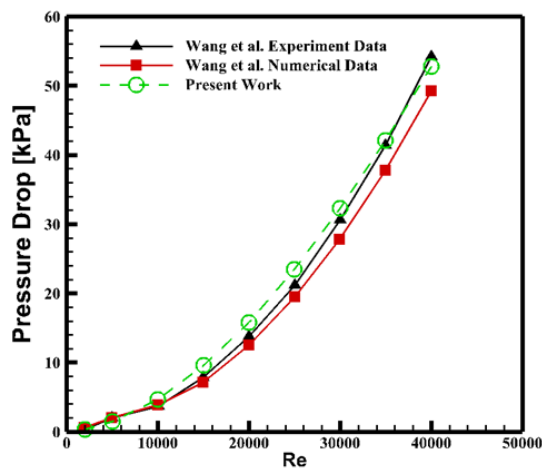
در این بخش به مقایسه نتایج شبیه سازی انجام شده با داده های موجود در پژوهش وانگ و همکاران [۱۲] پرداخته شده است. نتایج حاضر علاوه بر داده های تجربی نیروگاه، با داده های عددی منتشر شده در پژوهش وانگ [۱۲] مقایسه شده اند. آن مطالعه مبدل مارپیچی با مقطع مثلثی را بررسی نموده است که از نظر هندسه با اگونومایزر لوله ای این پژوهش متفاوت است؛ با این حال، اصول فیزیکی حاکم بر جریان آشفته و انتقال حرارت جابجایی اجباری در هر دو سامانه مشابه اند. توسعه لایه مرزی، جدایش موضعی جریان، اختلاط تلاطمی و وابستگی ضریب انتقال حرارت به عدد رینولدز در هر دو هندسه رخ می دهد. بنابراین، پژوهش وانگ صرفاً به عنوان یک مرجع تطبیقی برای اعتبار مدل های توربولانسی مورد استفاده قرار گرفته است، و برای مقایسه مستقیم عددی مورد بررسی قرار نگرفته است. تمرکز بر تطبیق روند کلی تغییرات ضریب انتقال حرارت و افت فشار با تغییر عدد رینولدز است تا توانایی مدل ها در باز تولید رفتار فیزیکی مشابه در هندسه های متفاوت سنجیده شود.

جدول ۲. مقایسه نتایج کار وانگ [۱۲] با کار حاضر برای عدد ناسلت

درصد اختلاف با روش عددی	درصد خطا با نتایج تجربی	عدد ناسلت در تحقیق حاضر	عدد ناسلت روش عددی وانگ	عدد ناسلت روش تجربی وانگ	عدد رینولدز
۲/۴۱	۹/۳۷	۳۲/۳۶۶	۳۱/۳۵۶	۳۰/۵۰۸	۲۰۰۰
۱/۶۰	۶/۶۹	۷۱/۱۵۲	۷۱/۰۱۷	۶۷/۶۲۷	۵۰۰۰
۲/۲۲	۸/۶۶	۱۱۴/۹۵۱	۱۱۴/۴۰۷	۱۰۷/۶۲۷	۱۰۰۰۰
۰/۳۶	۳/۴۱	۱۶۲/۱۲۵	۱۶۲/۷۱۲	۱۵۶/۷۸۰	۱۵۰۰۰
۰/۹۵	۴/۸۳	۲۰۶/۸۹۰	۲۰۵/۹۳۲	۱۹۸/۳۰۵	۲۰۰۰۰
۰/۴۴	۵/۰۹	۲۴۹/۲۵۰	۲۴۹/۱۵۲	۲۳۸/۱۳۶	۲۵۰۰۰
۰/۶۱	۴/۲۵	۲۸۹/۸۹۳	۲۹۰/۶۷۸	۲۷۷/۱۱۹	۳۰۰۰۰
۱/۳۸	۳/۴۰	۳۲۹/۹۵۸	۳۳۰/۵۰۹	۳۱۵/۲۵۴	۳۵۰۰۰
۱/۸۶	۲/۸۶	۳۶۸/۶۲۰	۳۶۹/۴۹۱	۳۵۲/۵۴۲	۴۰۰۰۰



شکل ۵. مقایسه نتایج تجربی و عددی وانگ [۱۲] با تحقیق حاضر برای اعداد ناسلت در اعداد رینولدز یکسان



شکل ۶. مقایسه نتایج تجربی و عددی وانگ [۱۲] با تحقیق حاضر برای افت فشار در اعداد رینولدز متفاوت

جدول ۳. مقایسه نتایج وانگ [۱۲] با تحقیق حاضر برای افت فشار

درصد اختلاف با کار عددی	درصد خطا با کار تجربی	افت فشار ( $\Delta P$ ) در کار حاضر (کیلو پاسکال)	افت فشار ( $\Delta P$ ) عددی در کار وانگ (کیلو پاسکال)	افت فشار ( $\Delta P$ ) تجربی در کار وانگ (کیلو پاسکال)	عدد رینولدز
۴/۶۷	۳/۲۸	۰/۳۸۸	۰/۳۹۲	۰/۳۷۴	۲۰۰۰
۴/۹۳	۴/۹۸	۱/۹۶۲	۱/۹۷۸	۱/۹۷۹	۵۰۰۰
۰/۴۷	۴/۹۳	۳/۸۶۶	۳/۸۵۸	۳/۶۵۹	۱۰۰۰۰
۳/۴۴	۵/۸۵	۷/۸۹۹	۷/۹۳۰	۷/۸۲۸	۱۵۰۰۰
۵/۴۵	۲/۸۱	۱۲/۱۷۳	۱۲/۴۹۳	۱۳/۷۸۶	۲۰۰۰۰
۳/۴۰	۴/۰۶	۱۸/۴۱۹	۱۹/۹۴۶	۲۱/۱۳۹	۲۵۰۰۰
۵/۳۰	۴/۵۱	۲۹/۲۶۶	۲۹/۷۹۴	۳۰/۵۸۰	۳۰۰۰۰
۲/۹۷	۱/۶۰	۳۹/۰۷۸	۳۸/۹۷۳	۴۱/۴۱۵	۳۵۰۰۰
۲/۲۰	۲/۴۶	۵۰/۸۱۰	۴۹/۲۶۴	۵۳/۱۴۰	۴۰۰۰۰

جدول ۴. مقایسه نتایج وانگ [۱۲] با تحقیق حاضر برای ضریب اصطکاک

درصد اختلاف با روش عددی	درصد خطا با روش تجربی	ضریب اصطکاک ( $f$ ) در تحقیق حاضر	ضریب اصطکاک ( $f$ ) عددی وانگ	ضریب اصطکاک ( $f$ ) تجربی وانگ	عدد رینولدز
۰/۵۱	۱/۹۷	۰/۰۹۶۱۲۲	۰/۰۹۶۶۳۳	۰/۱۰۰۰۹۲	۲۰۰۰
۰/۸۴	۱/۴۰	۰/۰۹۰۸۷۴	۰/۰۹۰۲۱۶	۰/۰۹۳۱۸۱	۵۰۰۰
۰/۰۷	۱/۶۵	۰/۰۸۴۹۸۷	۰/۰۸۴۲۱۴	۰/۰۸۵۲۷۳	۱۰۰۰۰
۱/۳۵	۲/۹۶	۰/۰۸۰۶۵۴	۰/۰۷۹۷۷۷	۰/۰۸۴۱۴۲	۱۵۰۰۰
۱/۴۶	۱/۳۱	۰/۰۷۷۴۷۸	۰/۰۷۶۰۸۲	۰/۰۸۰۵۲۹	۲۰۰۰۰
۱/۶۴	۳/۳۴	۰/۰۷۴۲۲۴	۰/۰۷۳۲۹۲	۰/۰۷۷۸۲۱	۲۵۰۰۰
۲/۰۸	۲/۱۶	۰/۰۷۲۹۷۸	۰/۰۷۱۰۷۹	۰/۰۷۵۶۰۸	۳۰۰۰۰
۰/۵۵	۳/۱۶	۰/۰۶۹۲۳۶	۰/۰۶۹۱۹۵	۰/۰۷۳۵۵۹	۳۵۰۰۰
۲/۶۹	۳/۷۴	۰/۰۶۹۵۴۷	۰/۰۶۷۷۲۳	۰/۰۷۲۲۵۲	۴۰۰۰۰

#### معیارهای همگرایی عددی

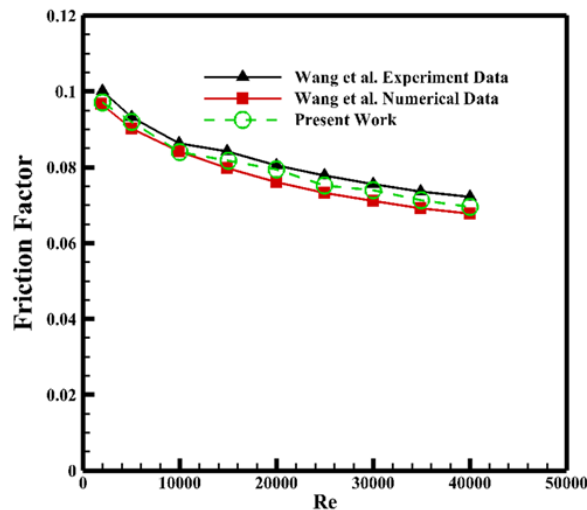
همگرایی عددی در دو سطح بررسی شد:

الف) همگرایی مبتنی بر اندازه باقی مانده ها<sup>۱</sup>

برای مدل های RANS، با کاهش اندازه باقی مانده های معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و کمیت های تلاطم به کمتر از  $10^{-5}$  اطمینان حاصل شد؛ برای LES به دلیل ناپایداری ذاتی، حد  $10^{-4}$  پذیرفته شد.

#### ب) همگرایی فیزیکی

اندازه ضریب انتقال حرارت کلی، افت فشار و دمای خروجی در طول حداقل ۱۵۰ تکرار (برای حالت پایدار) یا ۱۰ دوره گذرا (برای حالت ناپایدار) پایش شد. وقتی تغییر نسبی این پارامترها کمتر از ۱ درصد گردید، همگرایی فیزیکی برقرار اعلام شد.



شکل ۷. مقایسه نتایج تجربی و عددی وانگ [۱۲] با تحقیق حاضر برای ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز متفاوت

۲) شبکه‌بندی: با تغییر هر مدل شبکه‌بندی نیز تغییر می‌کند. شبکه باید به اندازه کافی ریز باشد و همچنین در نواحی بحرانی، شبکه‌بندی باید دقیق‌تر باشد.

در مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ، مستلزم دقت بالاتری نسبت به بقیه مدل‌ها در شبکه‌بندی است، به این صورت که شبکه باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند گردابه‌های با مقیاس تیلور را شبیه‌سازی کرد.

همچنین تحلیل و نمایه‌سازی توزیع انرژی در فرکانس‌های مختلف در مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ، با استفاده از نمودار PSD انجام گردید. در این نمودار محور افقی نشان دهنده فرکانس است و نمودار عمودی نشان دهنده مقدار انرژی نوسانات در هر فرکانس (چگالی توان) است. با توجه به طراحی سه‌بعدی شیب نمودار باید  $-\frac{5}{3}$  باشد که با توجه به نمودار شکل ۵ نتایج مورد تایید است و گردابه‌های بزرگ قابل حل هستند.

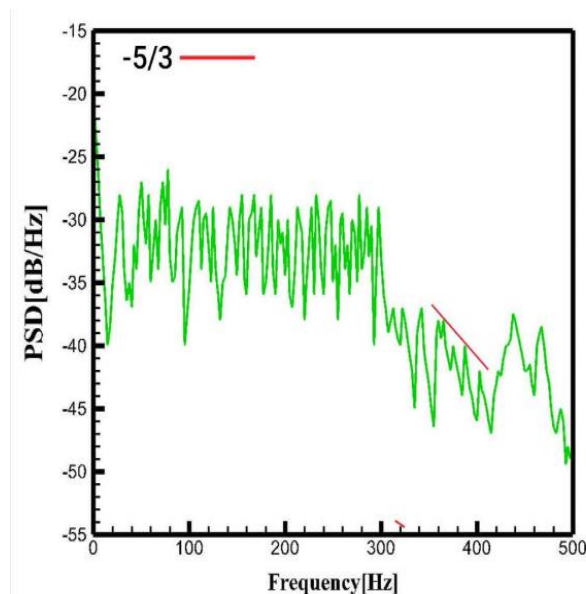
۳) گام زمانی: مدل‌های متفاوت مستلزم دقت متفاوت‌تری است و هر مدل نیاز به بررسی گام زمانی متفاوت است. گام زمانی در هر مدل به گونه‌ای تنظیم شده است که نوسانات و رفتارهای آشفته به درستی شبیه‌سازی شود.

در نهایت، این ترکیب از معیارهای عددی و فیزیکی، پایداری نتایج را تضمین کرد.

## ۷. نتایج شبیه‌سازی

مدل‌های توربولانسی، ابزارهای اساسی برای تحلیل و شبیه‌سازی رفتار جریان‌ها در داخل و خارج لوله اکونومایزر به شمار می‌روند. هر یک از مدل‌ها ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. این مدل‌ها این امکان را فراهم می‌سازند تا درک عمیق‌تری از چگونگی جابجایی حرارت و رفتار جریان در شرایط مختلف بدست آید. در ادامه نتایج بررسی حالت‌های مختلف مدل‌های توربولانسی آمده است. با تغییر هر مدل از مدل‌های توربولانسی، ملاحظات زیر اعمال گردیده است:

۱)  $y^+$  (پارامتر لایه مرزی بی بعد): این پارامتر نشان‌دهنده فاصله عمودی از دیواره به شبکه محاسباتی است و در شبیه‌سازی‌های جریان آشفته برای ارزیابی رفتار لایه‌های مرزی استفاده می‌شود. با تغییر هر مدل توربولانسی مقدار  $y^+$  تغییر می‌کند.



شکل ۸: طیف انرژی مربوط به انرژی جنبشی نوسانات جریان در مرکز میدان حل برای مدل LES با داده‌های عددی با گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه

به‌عنوان شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۷-۲- شرایط تنظیمی مدل کی - اومگا

در این مدل  $\gamma^+$  برابر با شش است و زمان شبیه‌سازی در حالت گذرا ۱۰ ثانیه و گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه است. برای شبکه‌بندی هندسه از المان شش وجهی<sup>۳</sup> و توری<sup>۴</sup> استفاده شده است و برای اطمینان شبکه‌بندی مناسب و انطباق گره‌ها از میچ کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر، ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:

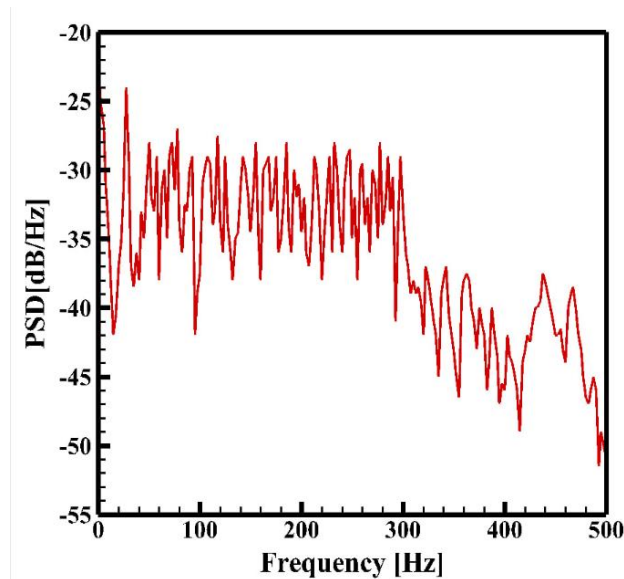
فشار برابر با ۰/۴، تکانه برابر با ۰/۵، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با یک، انرژی جنبشی برای برابر با ۰/۷۰، انرژی کل برابر با ۰/۷۰، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با ۰/۸۵ و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با ۰/۹۵ لحاظ گردید. این مقادیر به‌عنوان شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

در نهایت، نتایج با داده‌های تجربی و داده‌های شبیه‌سازی‌های قبلی مقایسه و اعتبار سنجی شده است. در ادامه در شکل‌های ۸ و ۹، طیف انرژی مربوط به انرژی جنبشی نوسانات جریان نشان داده شده است.

#### ۷-۱- شرایط تنظیمی مدل توربولانسی کی-اپسیلون (استاندارد، ریلایزبل، آر ان جی)

در این مدل  $\gamma^+$  برابر با ۲۵ است و زمان شبیه‌سازی در حالت گذرا ۲۰ ثانیه و گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه است. برای شبکه‌بندی هندسه از المان چهار وجهی<sup>۲</sup> استفاده شده است و برای اطمینان شبکه‌بندی مناسب و انطباق گره‌ها از میچ کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر، ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:

فشار برابر با ۰/۵، تکانه برابر با ۰/۵، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با یک، انرژی جنبشی آشفتگی برابر با ۰/۷۵، انرژی کل برابر با ۰/۷۵، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با ۰/۷۵ و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با یک لحاظ گردید. این مقادیر



شکل ۹. طیف انرژی مربوط به انرژی جنبشی نوسانات جریان در مرکز میدان حل برای مدل LES با داده‌های تجربی با گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه

است و برای اطمینان شبکه‌بندی مناسب و انطباق گره‌ها از میج کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر، ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:

فشار برابر با ۰/۵، تکانه برابر با ۰/۶، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با ۰/۹، انرژی جنبشی آشفتگی برابر با ۰/۷۰، انرژی کل برابر با ۰/۷۰، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با ۰/۷۰ و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با یک لحاظ گردید. این مقادیر به‌عنوان شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۷-۵- شرایط تنظیمی مدل ترنزشن اس اس تی

در این مدل  $y^+$  برابر با چهار است و زمان شبیه‌سازی در حالت گذرا ۲۰ ثانیه و گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه است. برای شبکه‌بندی هندسه از المان چهار وجهی و بادی سائزینگ<sup>۶</sup> استفاده شده است و برای اطمینان شبکه‌بندی مناسب و انطباق گره‌ها از میج کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر،

#### ۷-۳- شرایط تنظیمی مدل اسپالارت - آلماراس

در این مدل  $y^+$  برابر با ۴۵ است و زمان شبیه‌سازی در حالت گذرا ۱۵ ثانیه و گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه است. برای شبکه‌بندی هندسه از المان چهار وجهی و روش خودکار<sup>۵</sup> استفاده شده است و برای اطمینان شبکه‌بندی مناسب و انطباق گره‌ها از میج کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر، ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:

فشار برابر با ۰/۷، تکانه برابر با ۰/۵، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با ۱، انرژی جنبشی آشفتگی برابر با ۰/۸۵، انرژی کل برابر با ۰/۸۵، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با ۰/۸۵ و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با ۰/۹۵ لحاظ گردید. این مقادیر به‌عنوان شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۷-۴- شرایط تنظیمی مدل کی-کی-ال-اومگا

در این مدل  $y^+$  برابر با چهار است و زمان شبیه‌سازی در حالت گذرا ۱۰ ثانیه و گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه است. برای شبکه‌بندی هندسه از المان چهار وجهی و المان شش وجهی استفاده شده

فشار برابر با  $0/5$ ، تکانه برابر با  $0/5$ ، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با یک، انرژی جنبشی آشفتگی برابر با  $0/75$ ، انرژی کل برابر با  $0/75$ ، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با  $0/75$  و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با یک لحاظ گردید. این مقادیر به عنوان شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۷-۸- شرایط تنظیمی مدل دی ای اس

در این مدل  $y^+$  برابر با  $0/85$  است و زمان شبیه سازی در حالت گذرا  $20$  ثانیه و گام زمانی  $0/05$  ثانیه است. برای شبکه بندی هندسه از المان چهار وجهی استفاده شده است و برای اطمینان شبکه بندی مناسب و انطباق گره ها از میج کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر، ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:

فشار برابر با  $0/4$ ، تکانه برابر با  $0/5$ ، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با یک، انرژی جنبشی آشفتگی برابر با  $0/70$ ، انرژی کل برابر با  $0/70$ ، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با  $0/75$  و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با یک لحاظ گردید. این مقادیر به عنوان شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۷-۹- شرایط تنظیمی مدل ال ای اس

در این مدل  $y^+$  برابر با  $0/9$  است و زمان شبیه سازی در حالت گذرا  $20$  ثانیه و گام زمانی  $0/05$  ثانیه است. برای شبکه بندی هندسه از المان چهار وجهی استفاده شده است و برای اطمینان شبکه بندی مناسب و انطباق گره ها از میج کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر، ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:

فشار برابر با  $0/6$ ، تکانه برابر با  $0/5$ ، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با  $1$ ، انرژی جنبشی آشفتگی برابر با  $0/70$ ، انرژی کل برابر با  $0/70$ ، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با  $0/75$  و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با یک لحاظ گردید. این مقادیر به عنوان

ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:

فشار برابر با  $0/6$ ، تکانه برابر با  $0/7$ ، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با یک، انرژی جنبشی آشفتگی برابر با  $0/85$ ، انرژی کل برابر با  $0/70$ ، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با  $0/75$  و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با یک لحاظ گردید. این مقادیر به عنوان شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

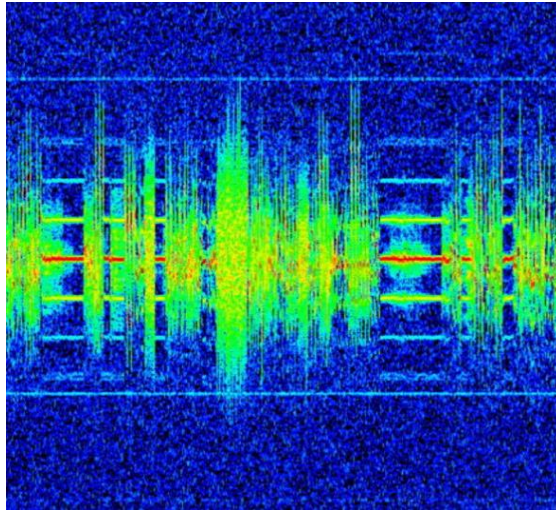
#### ۷-۶- شرایط تنظیمی مدل تنش رینولدز

در این مدل  $y^+$  برابر با  $35$  است و زمان شبیه سازی در حالت گذرا  $20$  ثانیه و گام زمانی  $0/05$  ثانیه است. برای شبکه بندی هندسه از المان چهار وجهی استفاده شده است و برای اطمینان شبکه بندی مناسب و انطباق گره ها از میج کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر، ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:

فشار برابر با  $0/5$ ، تکانه برابر با  $0/5$ ، چگالی برابر با یک، نیروی حجمی برابر با یک، انرژی جنبشی آشفتگی برابر با  $0/85$ ، انرژی کل برابر با  $0/70$ ، نرخ اتلاف آشفتگی برابر با  $0/70$  و در نهایت ویسکوزیته آشفتگی برابر با یک لحاظ گردید. این مقادیر به عنوان شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۷-۷- شرایط تنظیمی مدل اس ای اس

در این مدل  $y^+$  برابر با  $0/9$  است و زمان شبیه سازی در حالت گذرا  $10$  ثانیه و گام زمانی  $0/05$  ثانیه است. برای شبکه بندی هندسه از المان چهار وجهی استفاده شده است و برای اطمینان شبکه بندی مناسب و انطباق گره ها از میج کنترل استفاده شده است. استفاده از معادله حاکم مناسب برای حل که در بخش معادلات حاکم آمده است. جهت همگرایی بهتر، ضرایب زیر تخفیف در قسمت کنترل به صورت زیر تنظیم گردیده است:



شکل ۱۰. طیف انرژی مربوط به انرژی جنبشی نوسانات جریان در مرکز میدان حل برای مدل LES

جدول ۵. داده‌های تجربی اکونومایزر در واحد نیروگاه برق اصفهان

Unit No.	Nominal Power (MW)	Production			Fuel consumption			h	h	T (k)	T (k)	Load Factor %	
		Gross (MWH)	Internal Consumption (MWH)	Net (MWH)	Fuel Oil (LIT)	Gas Oil (LIT)	Gas (MC)	(w/m <sup>2</sup> k) water outlet	(w/m <sup>2</sup> k) Gas outlet	Water Outlet	Gas Outlet		
1	35	21155.00	1244.000	19911.00	0	0	7080000	25.97	10.57	240	287	84.18 %	
2	35	19454.00	1150.000	18304.00	0	0	6646000	27.23	12.23	273	325	83.46 %	
3	120	61998.00	3935.000	58063.00	0	0	17366000	68.98	16.78	423	593	89.39 %	
4	320	0.000	198.000	-198.00	0	0	0	110.45	42.27	610	689	0.00%	
5	320	202986.0	14974.000	188012.0	0	0	54074000	115.68	48.37	619	699	96.99 %	
TOTAL	830	305593.0	21545	284048	0	0	85166000					93.43 %	
Total fuel consumption from first of this year till end this month					0	0	642993000						
					0.00%	0.00%	100.00%						

برای تحلیل و بررسی دقت هر مدل، پارامترهای دارای اهمیت مثل ضریب انتقال حرارت و غیره را در هر مدل محاسبه شده است و در ادامه با توجه به داده‌های نیروگاه برای اکونومایزر، بررسی شده است که کدام مدل دارای دقت بالاتر و بهتری است.

روش‌های عددی در مهندسی، سال ۴۵، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۵

شرایط پایه برای تحلیل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند. نمودار طیف انرژی مربوط به انرژی جنبشی نوسانات جریان در مدل توربولانسی ال ای اس تا فرکانس ۱۰۰۰ در شکل ۱۰، آمده است.

جدول ۶. داده‌های تجربی اکونومایزر در بخش ۱۲۰ مگاواتی نیروگاه با توجه به جدول ۵ جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی

۶۹/۹۸	ضریب انتقال حرارت آب خروجی (وات بر متر مربع کلوین)
۱۶/۷۸	ضریب انتقال حرارت گاز خروجی (وات بر متر مربع کلوین)
۴۲۳	دمای آب خروجی (کلوین)
۵۹۳	دمای گاز خروجی (کلوین)
۲۷۶/۵۸	افت فشار داخل لوله (پاسکال)

جدول ۷. نتایج شبیه‌سازی برای مدل‌های توربولانسی

نام مدل‌های توربولانسی	دما ورودی (کلوین)	افت فشار داخل لوله (پاسکال)	ضریب انتقال حرارت آب خروجی (وات بر متر مربع کلوین)	ضریب انتقال حرارت گاز خروجی (وات بر متر مربع کلوین)
(Standard) $k - \epsilon$	۳۰۰	۲۷۸/۱۶	۷۲/۷۴	۱۰/۴۱۹
$k - \epsilon$ (RNG)	۳۰۰	۲۷۳/۷۳	۷۵/۶۸	۱۱/۱۱۶
$k - \epsilon$	۳۰۰	۲۷۵/۱۵	۷۰/۹۷	۱۲/۱۴۰
(Relaizable) $k - \epsilon$	۳۰۰	۲۵۰/۸۲	۷۷/۲۳	۷/۴۸۷
$k - \omega$	۳۰۰	۱۶۸/۱۸	۷۹/۷۶	۱۰/۹۶۸
Spalart-Almaras	۳۰۰	۲۸۶/۴۴	۴۰/۲۳	۹/۵۸۷
$k - kl - \omega$	۳۰۰	۲۶۰/۵۷	۸۴/۷۴	۱۴/۵۸۷
SST Transition	۳۰۰	۲۶۲/۴۸	۷۹/۲۸	۱۳/۱۳۵
Reynolds Stress	۳۰۰	۲۷۲/۵۷	۵۸/۷۵	۱۴/۱۲۶
SAS	۳۰۰	۲۷۵/۹۱	۶۶/۴۵	۱۶/۴۵۷
DES	۳۰۰	۲۷۸/۹۷	۶۷/۹۸	۱۶/۹۸۴
LES	۳۰۰	۲۷۶/۱۶	۶۸/۸۰	۱۶/۶۶۷

لایه مرزی متصل و جریان‌های آیرودینامیکی با جدایش محدود توسعه یافته است. در این مدل تنها یک معادله انتقال برای کمیتی شبه‌ویسکوزیته تدوین شده و اثرات مقیاس‌های مختلف تلاطم، به‌ویژه نرخ اتلاف انرژی، به‌صورت ضمنی و ساده‌شده وارد می‌شود. همین ساده‌سازی بنیادی سبب می‌شود که مدل نتواند رفتار واقعی جریان در هندسه‌های پیچیده نظیر اکونومایزرها را که با جدایش‌های گسترده، بازگردش‌های محلی، تغییرات ناگهانی سطح مقطع و تلاطم ثانویه همراهند، بازنمایی کند. از آنجا که در اکونومایزرها جریان اغلب به دلیل تغییر جهت

در ادامه در جدول‌های ۵ و ۶، نمونه داده‌های واقعی از نیروگاه برق اصفهان جهت بررسی دقت و عملکرد مدل‌های توربولانسی آمده است. در جدول ۷، نتایج شبیه‌سازی و محاسبات بدست آمده در هر مدل آمده است.

## ۸. دلایل تفاوت در نتایج بدست آمده در مدل‌های

### توربولانسی

مدل Spalart-Almaras از مدل‌های تک‌معادله‌ای مبتنی بر ویسکوزیته گردابه‌ای است که اساساً برای شبیه‌سازی جریان‌های

دقت در نزدیکی دیواره آن است که  $\omega$  نسبت به تغییرات گرادیان سرعت و نرخ تغییرات لایه مرزی حساس تر است. با وجود این مزیت، مدل  $k - \omega$  در نواحی دور از دیواره حساسیت شدیدی باعث ایجاد ناپایداری‌های عددی، افزایش خطا و نوسان در پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت می‌شود. در اکونومایزرها که جریان شامل ترکیب پیچیده‌ای از نواحی نزدیک دیواره، نواحی جریان آزاد و نواحی بازگشتی است، این حساسیت به شرایط مرزی می‌تواند موجب شود مدل در برخی نقاط بیش‌برآورد و در برخی نقاط کم برآورد قابل توجهی از شدت تلاطم ارائه دهد. بنابراین، اگرچه این مدل در پیش‌بینی گرادیان‌های دیواره‌ای دقیق تر از  $k - \epsilon$  است، اما در سایر بخش‌های دامنه جریان ممکن است عملکرد نامطمئن و متزلزلی داشته باشد.

مدل اس اس تی انتقالی ترکیبی از مدل اس اس تی گذرا و مدل‌های مدرن گذار آرام به آشفته است. این مدل قادر است فرآیند گذار طبیعی لایه مرزی را که تحت تأثیر عوامل متعددی مانند عدد رینولدز محلی، گرادیان سرعت، شدت تلاطم جریان ورودی و گرادیان دمایی است، پیش‌بینی کند. در اکونومایزرها که جریان اغلب در بخش ورودی آرام تر است و سپس با برخورد به موانع یا اجزای داخلی دچار افزایش سریع تلاطم و گذار کامل به حالت آشفته می‌شود، این مدل بهترین توصیف را از مکان و مکانیزم پیدایش تلاطم ارائه می‌دهد.

مزیت اصلی این مدل در آن است که ضخامت لایه مرزی، توزیع سرعت، شدت انتقال حرارت و جدایش‌های احتمالی با دقتی به مراتب بیشتر از مدل‌های غیرانتقالی محاسبه می‌شوند. همچنین استفاده از ساختار اس اس تی (که در نزدیکی دیواره مشابه مدل کی-اومگا و در دور از دیواره مشابه کی-اپسیلون عمل می‌کند) سبب می‌شود که مسئله حساسیت به شرایط مرزی تا حد زیادی رفع گردد. این مدل از نظر انتقال حرارت در اکونومایزرها معمولاً یکی از دقیق ترین مدل‌ها محسوب می‌شود. مدل کی ال اومگا، یک مدل گذار پیشرفته است که سه معادله برای انرژی تلاطم، انرژی تلاطم در مقیاس‌های کوچک، و نرخ

ناگهانی، برخورد با لوله‌ها یا صفحات داخلی و تغییرات دمایی شدید، دچار گرادیان‌های قوی سرعت و تشکیل گردابه‌های بزرگ و ناپایا می‌شود، عدم وجود معادلات مستقل برای انرژی تلاطم و نرخ اتلاف باعث می‌گردد مدل Spalart-Almaras قادر به پیش‌بینی صحیح شدت تلاطم و اختلاط عرضی نباشد. این ضعف منجر به تخمین کمتر از واقع انتقال حرارت جابجایی و همچنین پیش‌بینی نامناسب ناحیه جدایش می‌شود. بنابراین، خطای بالاتر این مدل کاملاً مبتنی بر ماهیت تک‌معادله‌ای، فرض همسانگردی گردابه‌ها و عدم توانایی در بازتولید ساختارهای گردابه ای دو یا سه‌بعدی است.

مدل  $k - \epsilon$  مبتنی بر حل دو معادله برای انرژی تلاطم و نرخ اتلاف انرژی است و با فرض همسانگرد بودن تنش‌های رینولدز، انتقال تلاطم را مدل می‌کند. این مدل در جریان‌های کانالی ساده، لایه مرزی‌های پایدار و جریان‌های با جدایش محدود عملکرد رضایت‌بخشی دارد، اما در هندسه‌های داخلی نظیر اکونومایزرها که جریان سه‌بعدی، پیچیده و دارای اختلاط شدید است، فرض همسانگردی تلاطم و تقریب‌های ساده‌شده آن برای تولید و اتلاف انرژی تلاطم، منجر به خطاهای سیستماتیک می‌شود.

در اکونومایزرها، وجود نواحی ری سیرکولیشن<sup>۷</sup>، چرخش‌های شدید، برخوردهای متوالی جریان با سطح لوله‌ها و گرادیان‌های دمایی قابل‌ملاحظه، ساختار تلاطم را به شدت ناهمسانگرد می‌کند. مدل کی - اپسیلون به دلیل ساختار ریاضی خود قادر به بازتولید تنش‌های غیرهمسانگرد نبوده و بنابراین در پیش‌بینی شدت انتقال حرارت، افت فشار و محل جدایش دقت کافی ندارد. علاوه بر این، این مدل برای عملکرد صحیح نیاز به استفاده از تابع دیواره<sup>۸</sup> دارد که خود وابسته به مقدار  $y^+$  است. در صورتی که شبکه در نزدیکی دیواره نتواند این شرایط را برآورده کند، خطاهای مدل در ناحیه نزدیک دیواره تشدید می‌گردد و به تمام دامنه جریان منتقل می‌شود.

مدل  $k - \omega$ ، با حل دو معادله برای انرژی تلاطم و نرخ اتلاف ویژه، رفتار تلاطم را در مقاطع نزدیک دیواره با دقت بالاتری نسبت به کی - اپسیلون پیش‌بینی می‌کند. دلیل اصلی این

کند و هنگامی که شبکه درشت تر است، مدل با رویکرد RANS عمل می کند. در اکونومایزرها که نواحی جدایش ناپایدار، چرخش های بزرگ و اختلاط های شدید محلی وجود دارند، مدل اس ای اس می تواند رفتار واقعی تر و غیرایستایی جریان را پیش بینی کند.

برتری SAS نسبت به RANS در این است که محدود به فرض همسانگردی تلاطم نیست و قادر است پدیده های ناپایدار مثل پدیده رهایی گردابه فون کارمن<sup>۸</sup> یا نوسانات دمایی ناشی از جت های گرم را بازنمایی کند. نقص اصلی آن این است که در نواحی با مش درشت، عملکرد آن مشابه RANS می شود و ممکن است برخی ویژگی های مهم جریان از دست برود.

مدل DES نیز مانند SAS یک مدل هیبریدی است، با این تفاوت که ناحیه نزدیک دیواره را به طور کامل با مدل RANS حل می کند و جریان آزاد را با ال ای اس بازنمایی می کند. این ویژگی برای جریان هایی که جدایش در بخش دور از دیواره اتفاق می افتد مناسب است. در اکونومایزرها، چنانچه مش به اندازه کافی ریز باشد، مدل دی ای اس قادر است رفتار گردابه های بزرگ را از طریق ال ای اس و رفتار نزدیک دیواره را با RANS مدل کند. این امر باعث افزایش چشمگیر دقت در پیش بینی مومتوم، انتقال حرارت و نوسانات جریان می شود.

ضعف اصلی این مدل در حساسیت شدید آن به اندازه سلول در نزدیکی دیواره است. اگر  $y^+$  یا اندازه مش در ناحیه انتقال از RANS به LES مناسب نباشد، "منطقه تفکیک" به اشتباه تعیین شده و مدل دچار پیش بینی بیش از حد<sup>۹</sup> یا کم پیش بینی<sup>۱۱</sup> شدید در انتقال حرارت می شود.

مدل LES دقیق ترین مدل غیر مستقیم تلاطم است زیرا اساس آن حل مستقیم گردابه های بزرگ جریان و مدل سازی تنها گردابه های کوچک تر از اندازه مش است. در اکونومایزر، مدل ال ای اس قادر است ساختارهای ناپایدار و جریان های کاملاً سه بعدی را با جزئیات فیزیکی بالا، از جمله جدایش ناپایدار، نوسانات انتقال حرارت، اختلاط پیچیده و رفتار غیرایستایی ناشی از برخورد جریان های گرم و سرد مدل کند.

اتلاف حل می کند. در این مدل گسترش مقیاس های کوچک تلاطم و تشدید ناپایداری های محلی در فرآیند گذار با جزئیات بیشتری شبیه سازی می شود. به دلیل آنکه اکونومایزرها همراه با تغییرات سریع ویسکوزیته، گرادیان های دمایی و تغییرات عدد رینولدز محلی هستند، مدل کی-کی-ال-او مگا قادر است موقعیت آغاز تلاطم، نرخ رشد تلاطم و ضخامت لایه مرزی را نسبت به سایر مدل ها بسیار دقیق تر محاسبه کند و به ویژه، در نواحی قبل از برخورد جریان با سطوح گرم و سپس افزایش ناگهانی گرادیان دما، این مدل می تواند انرژی تلاطم پیش انتقالی را باز تولید کرده و به همین دلیل توزیع سرعت در طول کانال و مقدار انتقال حرارت را با دقت بیشتری ارائه دهد. از سوی دیگر، هزینه محاسباتی این مدل به دلیل وجود معادلات بیشتر، بالاتر از مدل های دو معادله ای است.

مدل تنش رینولدز جامع ترین مدل RANS است زیرا فرض همسانگردی تلاطم را کنار گذاشته و به صورت مستقیم شش مؤلفه تنش های رینولدز را حل می کند. با این روش، تمامی اثرات ناهمسانگردی، چرخش، برش، جدایش و برهم کنش های پیچیده بین مؤلفه های مختلف سرعت به صورت مستقیم مدل می شوند. از آنجا که جریان در اکونومایزر در بسیاری مواقع دارای چرخش های سه بعدی، جدایش پیچیده، اختلاط شدید و نوسانات دمایی است، با این حال، تعداد زیاد معادلات و وجود ضرایب تجربی متعدد سبب می شود همگرایی این مدل دشوارتر شده و حساسیت آن نسبت به اندازه شبکه و شرایط مرزی افزایش یابد. این موضوع در برخی موارد می تواند باعث افزایش خطای عددی یا ناپایداری در حل گردد. با وجود این، در صورت استفاده از شبکه مناسب و تنظیم صحیح شرایط مرزی، مدل تنش رینولدز یکی از دقیق ترین مدل ها برای شبیه سازی اکونومایزر محسوب می شود.

مدل اس ای اس یک مدل هیبریدی است که بسته به مقیاس جریان و اندازه مش، رفتار خود را بین RANS و LES تغییر می دهد. هنگامی که شبکه به اندازه کافی ریز باشد، مدل قادر است گردابه های بزرگ و ناپایای جریان را مشابه LES باز تولید

- (Relaizable)  $k - \epsilon$ : ۸۷/۲۳ درصد
- $k - \omega$ : ۸۳/۲۳ در صد
- Spalart- Almaras: ۶۸/۸۹ درصد
- $k - kl - \omega$ : ۷۹/۷۵ درصد
- LES: ۹۹/۳۹ درصد

### ۱۰. نتیجه گیری

مدل‌های توربولانسی، ابزارهای اساسی برای تحلیل و شبیه‌سازی رفتار جریان‌ها در داخل و خارج لوله اکونومایزر به شمار می‌روند. هر یک از مدل‌ها ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. این مدل‌ها این امکان را فراهم می‌سازند تا درک عمیق‌تری از چگونگی جابجایی حرارت و رفتار جریان در شرایط مختلف بدست آید. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل LES بهترین حالت و دارای بالاترین دقت (۹۹/۳۹ درصد) برای شبیه‌سازی جریان آشفته است.

### ۱۱. تشکر و قدردانی

در پایان، از مدیر محترم واحد آموزش نیروگاه برق اصفهان جناب آقای مهندس علامه که با همکاری ایشان، اطلاعات آماری و ساختاری دستگاه‌های نیروگاه برق، در اختیار این تحقیق قرار داده شد، کمال قدردانی و تشکر می‌شود.

واژه نامه

- |                               |                     |
|-------------------------------|---------------------|
| 1. Residuals                  | 2. Tetrahedron      |
| 3. Hexahedron                 | 4. Inflation        |
| 5. Automatic method           | 6. Body Sizing      |
| 7. Recirculation              | 8. Wall Function    |
| 9. Von Kármán vortex shedding |                     |
| 10. Overprediction            | 11. Underprediction |

با وجود دقت فوق‌العاده بالا، مدل LES هزینه محاسباتی بسیار سنگینی دارد. برای عملکرد مطلوب باید مش تا نزدیکی دیواره‌ها ریز شود، به گونه‌ای که  $y^+$  حدود یک باشد. این موضوع در شبیه‌سازی‌های صنعتی یا دامنه‌های بزرگ باعث می‌شود LES عملاً زمان‌بر و بسیار پرهزینه باشد. به همین دلیل، LES معمولاً معیار ارزیابی برای دقت سایر مدل‌هاست، اما خود در پروژه‌های صنعتی کمتر به کار می‌رود.

### ۹. بررسی نتایج مربوط به مدل‌های مختلف توربولانس

در ادامه نتایج بررسی حالت‌های مختلف مدل‌های توربولانسی آمده است. ضریب انتقال حرارت آب خروجی واقعی در اکونومایزر نیروگاه حرارتی برق اصفهان در واحد ۱۲۰ مگاواتی برابر با ۶۸/۹۸ وات بر متر مربع کلوین و ضریب انتقال حرارت گاز خروجی برابر ۱۶/۷۸ وات بر متر مربع کلوین است. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل LES بهترین حالت و دارای بالاترین دقت (۹۹/۳۹ درصد) برای شبیه‌سازی جریان آشفته است. این مدل ضریب انتقال حرارت آب خروجی را ۶۸/۸۰ وات بر متر مربع کلوین و ضریب انتقال حرارت گاز خروجی ۱۶/۶۶۷ بدست آورده است.

درصد دقت بقیه مدل‌ها به شرح زیر است:

- DES: ۹۸/۱۲ درصد
- SAS: ۹۴/۱۸ درصد
- Rynolds Stress: ۸۳/۷۸ درصد
- SST Transion: ۸۴/۷۵ درصد
- $k - \epsilon$ : ۹۴ درصد
- (Standard)  $k - \epsilon$ : ۹۲ درصد
- (RNG)  $k - \epsilon$ : ۸۹ درصد

## منابع

1. Liu, W., Fang, J., Rolfo, S., Moulinec, C. Emerson, D. An iterative machine-learning framework for RANS turbulence modeling. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2021; 90:108822. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108822>
2. Marty J, Uribe C. Impact of Underlying RANS Turbulence Models in Zonal Detached Eddy Simulation: Application to a Compressor Rotor. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*. 2020; 5(3):22. <https://doi.org/10.3390/ijtp5030022>
3. O'Connor, J., Whalley, R. D., Wynn, A., Laizet, S. A dataset of high-resolution snapshots of the viscous sublayer from direct numerical simulation of a turbulent boundary layer up to  $Re_\theta=2400$ . *Data in Brief*. 2026; 66: 112767. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2026.112767>
4. Wang, N., Shi, Y., Cui, F., Wen, J., and Jia, J. Improving the Heat Transfer Efficiency of Economizers: A Comprehensive Strategy Based on Machine Learning and Quantile Ideas. *Energies*. 2025; 18(16): 4227. <https://doi.org/10.3390/en18164227>
5. Feng, Z., Xin, C., Zhou, T., Zhang, J., Fu, T. Airside thermal-hydraulic and fouling performances of economizers with integrally-molded spiral finned tubes for residual heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 211: 118365. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118365>
6. Yang, X. I. A., Zhang, W., Abkar, M., and Anderson, W. Computational Fluid Dynamics: its Carbon Footprint and Role in Carbon Emission Reduction. *J. Renewable Sustainable Energy*. 2024; 16(5): 055906. <https://doi.org/10.1063/5.0217320>
7. Aljuhaishi, S., Timimi, Y. K. Al., and Wahab, B. I. Comparing turbulence models for CFD simulation of UAV flight in wind tunnel experiments. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2024; 52(3): 301–309. <https://doi.org/10.3311/PPtr.24004>
8. Dharmasena, P., and Nassif, N. Testing, Validation, and Simulation of a Novel Economizer Damper Control Method. *Buildings*. 2024; 14(9): 2937. <https://doi.org/10.3390/buildings14092937>
9. Zhang, Y., Jiang, H., and Zhang, D. Review of Challenges and Opportunities in Turbulence Modeling: A Comparative Analysis of Data-Driven Machine Learning Approaches. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023; 11(7): 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse11071440>
10. Zhai, Z. J., Zhang, Z., Zhang, W., and Chen, Q. Y. Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1—Summary of Prevalent Turbulence Models. *HVAC&R Research*, 2007; 13(6): 853–870. <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10391459>
11. Benhamadouche, S., Merzari, E. Modelling and Simulation of Turbulence in Energy Systems. 1st Edition, Woodhead Publishing, 2019. <https://www.amazon.ca/-/fr/Sofiane-Benhamadouche/dp/0081023952>
12. Wang, G., Dbouk, T., Wang, D., Pei, Y., Peng, X., Yuan, H., and Xiang, S. Experimental and numerical investigation on hydraulic and thermal performance in the tube-side of helically coiled-twisted trilobal tube heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020; 153: 106328. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106328>
13. Naved, M., and Dewan, A. Turbulence modeling and machine learning for performance optimization of solar air heaters: State-of-the-art and future directions. *Applied Energy*. 2026; 407: 127321. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127321>