

بررسی افت فشار جریان تراکم ناپذیر مغشوش در اریفیس‌های صنعتی چند مرحله‌ای و مقایسه آن با نتایج تجربی

قنبرعلی شیخ‌زاده^۱، مجید مرادی باستانی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۱۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۲	در این تحقیق افت فشار جریان آب عبوری از اریفیس‌های صنعتی چند مرحله‌ای نصب شده در داخل یک لوله در نیروگاه حرارتی ۱۳۰۰ مگاواتی شازند اراک، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مغشوش بودن جریان آب، برای مدل‌سازی از مدل استاندارد $k - \epsilon$ استفاده شده است. به منظور دست یافتن به یک افت فشار خاص در یک دبی آب مشخص ورودی به لوله، بر اساس ترکیبی از تعداد مراحل اریفیس‌ها به همراه تغییر در تعداد سوراخ‌ها و نیز قطر آنها یک طراحی بهینه انجام شده است. در نهایت به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از مدل‌سازی فوق، با ساخت اریفیس‌های مذکور و نصب آنها در لوله مورد نظر، نتایج حل عددی با نتایج واقعی بدست آمده در نیروگاه مقایسه شده که تطابق قابل قبولی بین آنها مشاهده شده است. لازم به ذکر است این افت فشار به بازشدن بیشتر شیرهای کنترلی پس از آن منجر می‌شود که تأثیر زیادی در کاهش خوردگی این شیرها و عملکرد مناسب‌تر آنها دارد.
واژگان کلیدی: شبیه‌سازی عددی، اریفیس‌های صنعتی چند مرحله‌ای، جریان تراکم ناپذیر مغشوش، افت فشار.	

۱-مقدمه

کلی، این اریفیس‌ها که از جنس استنلس استیل آستنیتیک می‌باشند، توسط جوشکاری در داخل لوله نصب می‌گردند. در کاربردهای مهندسی به هر دیسک اریفیس که باعث افت فشار می‌گردد، یک مرحله گفته می‌شود. به منظور ایجاد افت فشار بالا و کنترل دبی سیال فرآیند، در بسیاری از تحقیقات پیشین به طراحی و مطالعه سیستم‌های ایجاد افت فشار از جمله اریفیس پرداخته شده است. الیوریا و پینهو [۱]، بوروتسکی و همکاران [۲] و مورازسکی و شاپلی [۳] مطالعات خود را بر روی افزایش افت فشار در یک انبساط ناگهانی تقارن محوری پس از یک صفحه اریفیس انجام داده‌اند. هوو و همکاران [۴] جریان سیال عبوری از یک اریفیس با شکل‌های مختلف

ایجاد افت فشار بالا در برخی خطوط فرآیند نیروگاه‌های حرارتی بسیار مورد نیاز می‌باشد. در مواقعی که نیاز به افت فشار کمی باشد، برخی از وسایل ایجاد افت فشار جریان مانند نازل‌ها، ونتوری‌ها و اریفیس‌ها تنها به صورت یک مرحله‌ای به کار گرفته می‌شوند. اما چنانچه افت فشار بیشتری مورد نیاز باشد (مانند لوله خروجی سیستم خنک کاری نیروگاه‌های هسته‌ای که افت فشار آن ممکن است تا 15Mpa برسد) ترکیب و یا چند مرحله‌ای کردن وسایل فوق به کار گرفته می‌شود. با توجه به ساختار وسایل فوق، استفاده از اریفیس‌ها به صورت چند مرحله‌ای در کنترل بسیاری از فرآیندها مورد قبول واقع شده است. در حالت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m2_bastani@yahoo.com

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

صفحه‌ای با عدد رینولدز بالا استفاده کرده‌اند. در مدل توربولانسی آنها از معادلات اساسی ادی-ویسکوزیته برای تنش‌های رینولدز استفاده شده است. آنها ضخامت صفحه اریفیس را بسیار نازک، نسبت تغییرات قطر سوراخ اریفیس به قطر لوله را بین $\beta = 0.4$ تا $\beta = 0.7$ ، عدد رینولدز را بین $10^4 \leq Re \leq 10^6$ و جریان را متقارن محوری در نظر گرفته‌اند. آنها نشان دادند که مدل $k-\varepsilon$ دقت قابل قبولی برای تعیین مشخصه‌های مهم جریان مغشوش در جریان تراکم‌ناپذیر عبوری از یک اریفیس صفحه‌ای نازک متقارن محوری دارد. گان و ریفت [۱۸] به بررسی عددی تأثیر ضخامت صفحه اریفیس بر روی افت فشار جریان در یک اریفیس با لبه‌های مربعی نصب شده در داخل داکت مربعی برای محدوده وسیعی از اعداد رینولدز پرداختند. رمامورتی و نانداکومار [۱۹] خصوصیات جریان در محدوده جدایش^۳، باز چرخش^۴ و کاویتاسیون^۵ در جریان عبوری از یک اریفیس مدور با لبه‌های تیز را تعیین کردند. تونای [۲۰] و [۲۱] خصوصیات جریان آرام و مغشوش عبوری از یک اریفیس نصب شده در داخل لوله را هم در حالت کلی و هم با ضخامت‌های مختلف صفحه اریفیس مورد بررسی قرار داد. تونای و همکاران [۲۲] و [۲۳] تأثیر شرایط مرزی مختلف بر روی حل عددی جریان آرام عبوری از یک اریفیس نصب شده در داخل لوله را با استفاده از معادلات انتقال ورتیسیتی بررسی نمودند. اوشیدا و همکاران [۲۴] افت فشار جریان چند نوع سیال ترکیبی عبوری از یک میکرو اریفیس در اندازه‌های مختلف را در اعداد رینولدز پایین مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از ساخت یک دستگاه و نصب اریفیس با ابعاد بین ۵۰ تا ۲۰۰ میکرومتر در آن نتایج آزمایشگاهی را با نتایج حاصل از حل عددی معادلات ناویر-استوکس در مختصات استوانه‌ای مقایسه کردند.

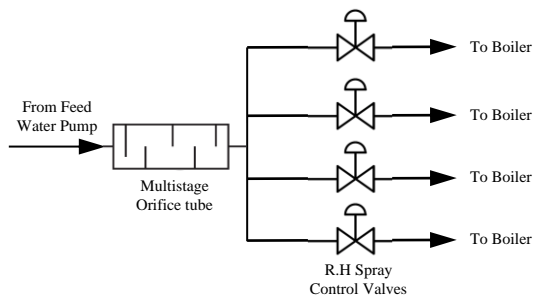
در کار حاضر یک مجموعه اریفیس صنعتی چهار مرحله‌ای در داخل یک لوله توسط نرم افزار Ansys CFX 14.5

منافذ آن را شبیه‌سازی نموده‌اند. وانگ و همکاران [۵] با طراحی یک مجموعه اریفیس شش مرحله‌ای با قطر سوراخهای مختلف و نسبتهای خروج از مرکز متفاوت که با فواصل طولی یکسان از یکدیگر درون یک لوله نصب شده‌اند، به بررسی تجربی میزان افت فشار آب در بخشی از یک سیکل نیروگاه اتمی پرداختند. ایامسا-آرد [۶]، ایوریا و همکاران [۷] و شاه و همکاران [۸]، از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مطالعه افت فشار در اریفیس‌ها استفاده نموده‌اند. ابو ال-عزم علی و همکاران [۹]، هارست و واسیلیکاس [۱۰] و سعود و واسیلیکاس [۱۱] با استفاده از روشهای تجربی به مطالعه جریان مغشوش و پارامترهای مؤثر افت فشار در اریفیس‌های خاص پرداخته‌اند. فیلهو و همکاران [۱۲] با استفاده از روش‌های حل عددی میزان افت فشار آب عبوری از صفحات سوراخدار اریفیس نصب شده در داخل یک مجموعه سوخت نیروگاه اتمی را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای این کار از چند مدل جریان مغشوش استفاده کرده و در نهایت نشان دادند که مدل استاندارد $k-\varepsilon$ دارای دقت بالاتری نسبت به سایر مدلها می‌باشد. جانکوفسکی و همکاران [۱۳] مدلی را برای پیش‌بینی افت فشار و ضریب تخلیه برای جریان تراکم‌ناپذیر عبوری از یک اریفیس با نسبت طول به قطر بزرگتر از صفر (Orifice tube) در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز ارائه نموده‌اند. میلز [۱۴] حل عددی جریان دائم، تقارن محوری، لزج و غیر قابل تراکم با عدد رینولدز پایین ($0 \leq Re \leq 50$) در اطراف اریفیس نصب شده در داخل یک لوله را مورد بررسی قرار داد که نتایج آن تطابق خوبی با نتایج تجربی جو هانسن [۱۵] داشت. حل عددی معادلات ناویر-استوکس برای جریان غیردائم آرام عبوری از اریفیس موجود در یک لوله توسط کودر و باکلی [۱۶] نیز ارائه شده است. داویس و ماتینگلی [۱۷] از دو مدل توربولانسی برای جریان عبوری از میان یک اریفیس

⁵ Cavitation

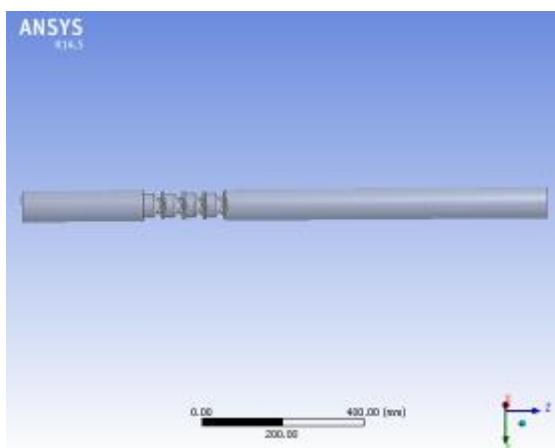
³ Separation

⁴ Attachment



شکل (۱): شماتیک نصب اریفیس مرحله‌ای در مسیر آب اسپری به داخل بخار ری هیت بویلر

به منظور بررسی میزان افت فشار آب اسپری، یک مجموعه اریفیس صنعتی چهار مرحله‌ای که درون یک لوله افقی با قطر داخلی ۷۷,۳ میلی‌متر (۳ اینچ) به طول ۱,۳ متر تعبیه شده است، با استفاده از نرم افزار Ansys CFX 14.5 مدل‌سازی عددی می‌شود. آب با دمای ۱۷۵ درجه سانتی-گراد و دبی ۲۵ متر مکعب بر ساعت وارد این لوله می‌شود. با توجه به اینکه سرعت جریان آب در این لوله ۱.۶۴ متر بر ثانیه و عدد رینولدز جریان در حدود 7.6×10^5 است، بنابراین جریان مغشوش می‌باشد. در شکل (۲) هندسه مدل مورد نظر نشان داده شده است. همچنین نمونه اریفیس صنعتی مورد استفاده به همراه نقشه آن در شکل (۳) آورده شده است.



شکل (۲): هندسه مدل‌سازی اریفیس‌های نصب شده در لوله آب اسپری بخار ری هیت بویلر در نرم افزار Ansys CFX 14.5

مدل‌سازی می‌شود. این مجموعه اریفیس به منظور ایجاد افت فشار شدید در مسیر تزریق آب اسپری به داخل بخار ری هیت بویلر نیروگاه حرارتی شازند اراک طراحی و در داخل یک لوله حاوی آب با جریان مغشوش به صورت سری نصب شده‌اند. به منظور بررسی صحت مدل‌سازی انجام شده، نتایج آن با نتایج واقعی آزمایش شده در نیروگاه مقایسه می‌شود.

۲- فیزیک مسأله و معادلات حاکم

به منظور ایجاد افت فشار شدید در مسیر آب اسپری به داخل بخار ری هیت در نیروگاه حرارتی شازند اراک استفاده از اریفیس چهار مرحله‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. آب اسپری بخار ری هیت بویلر پس از انشعاب از طبقه میانی پمپ‌های تغذیه به سمت چهار عدد شیر کنترلی هدایت می‌شود. وظیفه این شیرهای کنترلی تنظیم دبی آب اسپری به منظور کنترل دما در المان‌های ری هیت بویلر می‌باشد. از آنجائی که فشار نسبی آب اسپری قبل از شیر کنترلی در حدود ۱۰۴ بار و فشار نسبی بخار ری هیت در حدود ۴۰ بار می‌باشد و نیز با توجه به درصد بازشدگی کم این نوع شیرها و افزایش سرعت جریان آب در مجرای عبوری آن، افت فشار شدیدی در این شیرهای کنترلی ایجاد می‌شود. همچنین افزایش سرعت جریان آب باعث ایجاد خوردگی از نوع خوردگی شتاب جریان^۶ در سیت^۷ و پلاگ^۸ این شیرها شده و با ایجاد اختلال در عملکرد آن، فرآیند کنترل دما در المان‌های ری هیت بویلر را با مشکل مواجه می‌کند. برای رفع این مشکل همانطور که در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است،

یک مجموعه اریفیس چهار مرحله‌ای برای ایجاد افت فشار شدید آب اسپری قبل از شیرهای کنترلی طراحی شده است. این امر باعث باز شدگی بیشتر شیرهای کنترلی در یک دبی یکسان آب نسبت به حالت قبل شده و خوردگی شتاب جریان (FAC) در آنها را کمتر می‌کند.

⁸ Plug

⁶ Flow Accelerated Corrosion (FAC)

⁷ Seat

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - 2 \mu_{eff} \frac{v}{r^2} \right] \quad (3)$$

در روابط فوق μ_{eff} مجموع ویسکوزیته سیال μ و ویسکوزیته جریان مغشوش μ_t است:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

که μ_t با استفاده از مدل‌های ادی-ویسکوزیته مانند مدل استاندارد $k - \varepsilon$ به صورت زیر بیان می‌شود [۲۵].

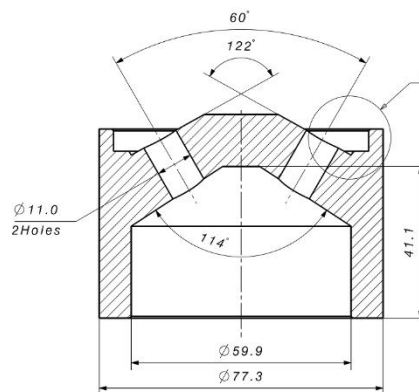
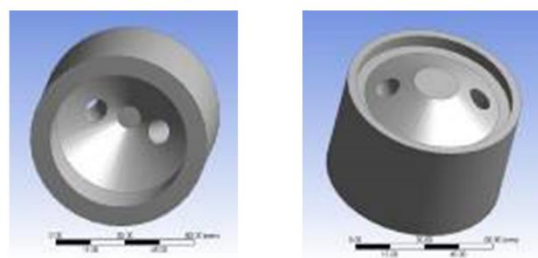
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

مدل استاندارد $k - \varepsilon$ که توانایی اقتصادی بودن و دقت مناسب برای طیف وسیعی از جریان‌های مغشوش، سبب جذابیت این مدل در شبیه‌سازی‌های جریان در صنعت گردیده است، شامل دو معادله یکی برای انرژی جنبشی جریان آشفته^۹ (k) و دیگری برای نرخ اضمحلال انرژی جنبشی جریان آشفته^{۱۰} (ε) می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۵]:

$$\rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{\partial r} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial r} \right) \right] + \{P_k - \rho \varepsilon\} \quad (6)$$

$$\rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{1}{r} \rho v \frac{\partial (r \varepsilon)}{\partial r} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) \right] + \left\{ C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k \right\} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

در رابطه فوق P_k نرخ تولید انرژی جنبشی (k) می‌باشد:



شکل (۳): اریفیس صنعتی مورد استفاده به همراه نقشه آن (تمامی ابعاد به میلی‌متر است).

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات بقاء حاکم بر جریان سیال مغشوش با در نظر گرفتن مقادیر متوسط کمیت‌های نوسانی سرعت برای جریان متقارن محوری مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین برای شبیه‌سازی تنش‌های رینولدز از رابطه اساسی ادی-ویسکوزیته بوزینسک و مدل استاندارد $k - \varepsilon$ استفاده شده است. معادلات حاکم به ترتیب شامل معادلات پیوستگی و معادلات مومنوم در جهت‌های محوری و شعاعی می‌باشند [۲۵]:

معادله پیوستگی:

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

معادله مومنوم:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \quad (2)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right]$$

¹⁰ Viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy

⁹ Turbulent Kinetic Energy (T.K.E)

در مقطع خروجی جریان از شرط مرزی فشار استاتیک^{۱۲} استفاده شده و مقدار آن برابر ۷۰ بار نسبی در نظر گرفته شده است.

۳- روش حل عددی

برای تعیین میدان سرعت و فشار، معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر، دائم و متقارن محوری در مختصات استوانه‌ای شامل معادله پیوستگی و معادلات مومنتم در جریان مغشوش (معادلات ۹-۱) باید به طریق مناسبی حل شوند. بدین منظور از نرم افزار Ansys CFX 14.5 برای شبیه‌سازی مجموعه اریفیس‌های درون لوله و حل معادلات حاکم استفاده شده است. در حل معادلات مومنتم وابستگی فشار و سرعت با استفاده از الگوریتم سیمپل برقرار گردیده است. باتوجه به مغشوش بودن جریان، از مدل استاندارد $k - \epsilon$ برای حل عددی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی بسیاری از جریان‌های مغشوش تراکم‌ناپذیر عبوری از انواع اریفیس‌ها مدل استاندارد $k - \epsilon$ مورد استفاده قرار گرفته و دقت و صحت آن مورد تأیید واقع شده است [۱۷ و ۱۲]. میزان آشفتگی جریان ۱۳ در ورودی لوله ۵٪ در نظر گرفته شده است.

برای انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار CFX، پس از تولید هندسه مورد نظر در بخش Design Modeler و ایجاد شبکه مناسب در بخش Meshing، تنظیمات مربوط به شبیه‌سازی مسأله در بخش CFX-Pre انجام می‌شود. مراحل اجرای کار در این بخش شامل تعیین نوع آنالیز جریان (دائم)، ایجاد حوزه حل برای مسأله، تعیین ماده مورد استفاده (آب)، انتخاب رژیم جریان (مغشوش)، اعمال شرایط مرزی، تنظیم حل‌گر و تنظیم خروجی است.

با توجه به شکل (۴) و نیز با فرض جریان کاملاً توسعه یافته در ورودی لوله، شرط مرزی ورودی به صورت جریان زیر صوت و در قسمت Mass and Momentum به صورت Normal Speed در نظر گرفته می‌شود. همچنین پروفیل

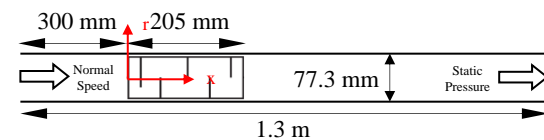
$$P_k = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (۸)$$

در روابط ۵ تا ۸ ضرایب $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_\mu$ دارای مقادیر استاندارد زیر می‌باشند:

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_\mu = 0.09. \quad (۹)$$

۲-۲- شرایط مرزی

در شکل (۴) شماتیکی از میدان حل عددی به همراه شرایط مرزی آن نشان داده شده است.



شکل (۴): شماتیک میدان حل عددی جریان داخل لوله و اریفیس صنعتی چهار مرحله‌ای به همراه شرایط مرزی آن همانطوریکه در شکل (۴) مشاهده می‌شود، به منظور از بین رفتن اغتشاشات به وجود آمده توسط اریفیس‌ها و نیز مدل‌سازی مناسب گردابه‌های پس از آن، طول لوله بعد از خروجی اریفیس‌ها به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است. جریان در ورودی لوله کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته شده و برای شرط مرزی ورودی به آن از پروفیل سرعت قانون توانی یک هفتم^{۱۱} مطابق رابطه زیر استفاده شده است.

$$u = u_{\max} \left|_{(r=0)} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}} \right)^{1/7} \right. \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق u پروفیل سرعت جریان، u_{\max} بیشینه سرعت جریان در $r = 0$ شعاع r و شعاع r_{\max} شعاع لوله می‌باشد. لازم به ذکر است که رابطه فوق برای جریان مغشوش کاملاً توسعه یافته بکار برده می‌شود.

¹³ Turbulence Intensity

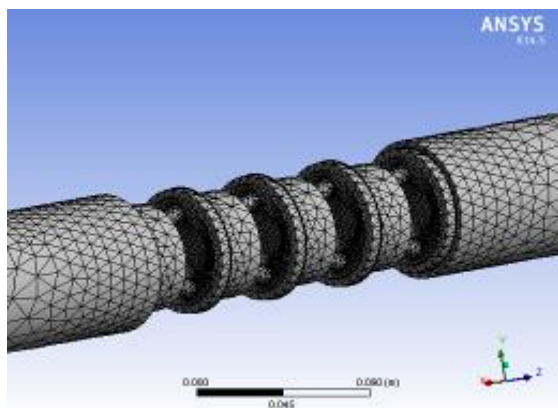
¹¹ One-Seventh Power-Law Velocity Profile

¹² Static Pressure

صنعتی‌ای مطابق با شکل (۳) ساخته شد و در چهار مرحله پشت سر یکدیگر در داخل لوله آب مسیر اسپری بخار ری‌هیت نیروگاه نصب گردید. نمایی از محل نصب مجموعه اریفیس‌های چهار مرحله‌ای درون لوله مسیر بای‌پس که توسط دو شیر از مسیر اصلی تغذیه آب اسپری ایزوله می‌شوند، در شکل (۶) نشان داده شده است.

در هنگام انجام تست، دو شیر ایزوله باز شده و شیر موجود بر روی مسیر اصلی تغذیه آب اسپری بسته می‌شود. بنابراین کل آب از مسیر بای‌پس عبور می‌کند. آب اسپری پس از عبور از مجموعه اریفیس‌های چهار مرحله‌ای، به هدر اصلی که ترانسمیتر فشار بر روی آن نصب شده است، وارد می‌شود (شکل ۷). این مرحله بطور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شد.

لازم به ذکر است کلیه مقادیر مربوط به فشار هدر اصلی آب اسپری، دبی کل آب اسپری، درصد بازشدگی کنترل ولوها و ... در مرکز کنترل نیروگاه به صورت لحظه‌ای نمایش داده شده که برای انجام هر تست این مقادیر ثبت می‌شوند.



شکل (۵): شبکه بندی نقاط مختلف سیال

جدول (۱): اثر افزایش نقاط شبکه بر افت فشار جریان آب

افت فشار آب (Bar)	تعداد المانها	تعداد نقاط
۴۰	۱۱۵۳۸۲	۲۳۲۲۰
۳۶	۱۴۵۳۹۷	۲۹۰۱۲
۳۵	۱۵۹۶۴۸	۳۰۳۵۸
۳۴٫۲	۱۶۱۰۹۹	۳۱۷۶۲
۳۴	۱۸۶۵۴۶	۳۵۸۱۷

سرعت قانون توانی یک هفتم در ورودی لوله با نوشتن رابطه (۱۰) در قسمت Expression اعمال می‌شود. برای اعمال شرط مرزی خروجی نیز گزینه Static Pressure انتخاب شده و مقدار آن برابر ۷۰ بار نسبی در نظر گرفته می‌شود. همچنین تمامی دیواره‌های بیرونی لوله به صورت شرط مرزی Wall انتخاب می‌شوند.

پس از انجام تنظیمات فوق، در قسمت حل گر نرم‌افزار، گسسته‌سازی جملات جابجایی با استفاده از روش آپویند با دقت مرتبه دوم و جملات اغتشاشی با استفاده از روش دقت بالا اعمال می‌شود. همچنین در قسمت کنترل همگرایی، دقت مورد نظر برای باقیمانده‌ها 1×10^{-5} در نظر گرفته می‌شود.

۴- شبکه‌بندی هندسه مورد نظر

در شکل (۵) شبکه‌بندی میدان حل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در نواحی که گرادیان فشار و سرعت تغییرات شدیدی دارند، به منظور مدل‌سازی بهتر لایه‌مرزی، چگالی نقاط شبکه افزایش یافته است. برای اطمینان استقلال جواب‌ها از تعداد نقاط شبکه و یافتن تعداد نقاط مورد نیاز، شبکه‌های متفاوتی برای مدل‌سازی مورد آزمایش قرار گرفته و میزان افت فشار آب پس از عبور از مجموعه اریفیس‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

نتایج بدست آمده از مدل‌سازی نمونه با شبکه‌های مختلف در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که از این نتایج بر می‌آید، برای شبکه‌هایی با تعداد نقاط بیش از ۳۱۷۶۲ افت فشار جریان آب تقریباً ثابت مانده است. بنابراین برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه محاسبات از شبکه مذکور استفاده شده است. همچنین با توجه به افزایش گرادیان‌های فشار و سرعت در سوراخ‌های اریفیس، چگالی نقاط شبکه در این نواحی افزایش یافته است.

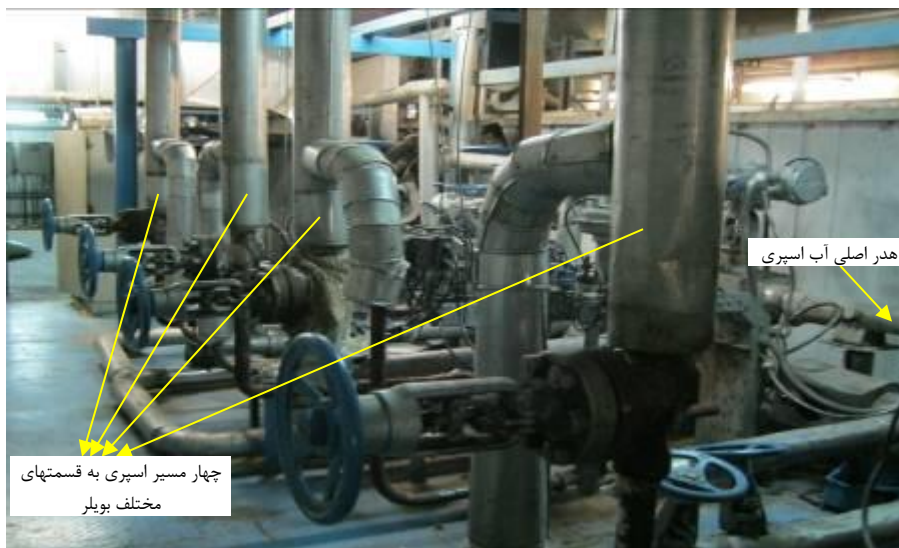
۵- تجهیزات مورد استفاده در تست واقعی

و نحوه انجام آن

برای انجام تست تجربی در فرآیند صنعتی واقعی، اریفیس



شکل (۶): ایجاد مسیر بای پس بر روی مسیر آب ورودی به هدر اصلی سیستم آب اسپری برای انجام تست تجربی

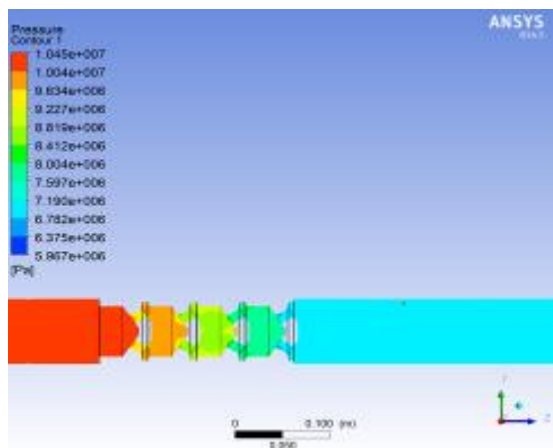


شکل (۷): هدر اصلی آب اسپری ری هیت بویلر به همراه ۴ مسیر مختلف و کنترل ولوهای مربوط به آن

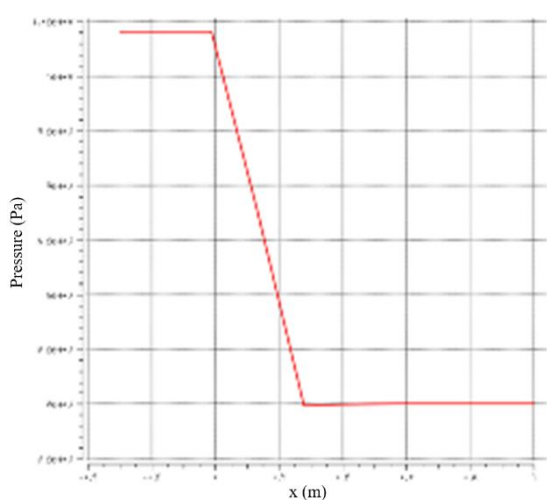
۶- بررسی نتایج

می شود. در حقیقت لایه برشی سیال باعث ایجاد نیروی باز چرخش و تولید گردابه در آن می شود. دیگر اینکه توزیع سرعت در ورود و خروج لوله به صورت تقریباً یکنواخت بوده در حالیکه این توزیع سرعت در عبور از اریفیس ها به سرعت تغییر می کند. در واقع گرادیان سرعت در این ناحیه بسیار شدید می باشد. لازم به ذکر است بیشترین سرعت جریان آب که در ورودی لوله ۱.۶۴ متر بر ثانیه می باشد، در محدوده عبور جریان آب از سوراخهای اریفیس به حدود ۴۰ متر بر ثانیه می رسد.

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و مقایسه افت فشار با نتایج واقعی پرداخته می شود. در شکل (۸) خطوط جریان و در شکل (۹) کانتور سرعت در شبیه سازی عددی اریفیس های صنعتی چهار مرحله ای نشان داده شده است. در این شکلها ذکر چند نکته حائز اهمیت است. نخست اینکه خطوط جریان در داخل لوله به صورت واضحی به خاطر حضور اریفیس ها منحرف شده اند. در این جریان به دلیل تزریق آب با سرعت بالا به دو سمت لوله توسط اریفیس مرحله آخر، گردابه هایی در آن تشکیل



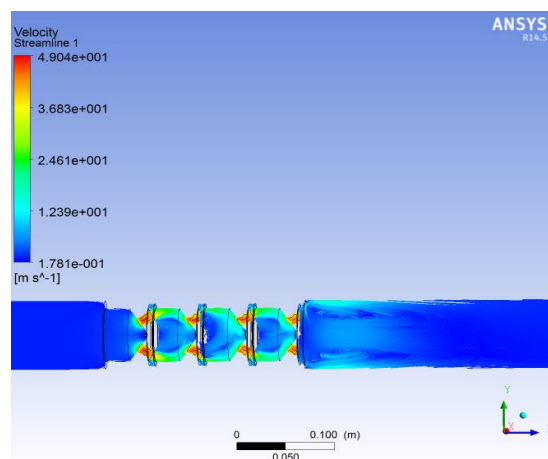
شکل (۱۰): نمایش کانتور فشار در مجموعه اریفیس‌ها



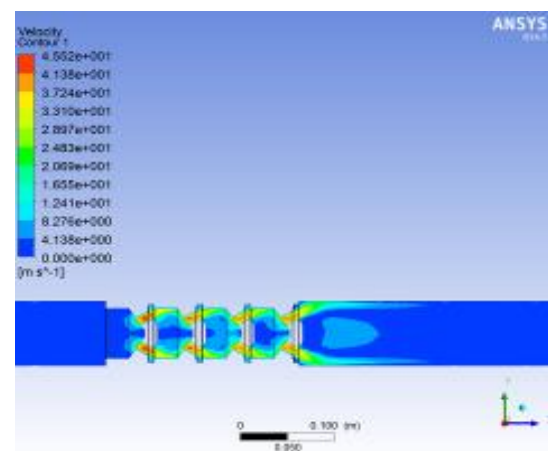
شکل (۱۱): افت فشار کلی جریان آب

در شکل (۱۲) چگونگی افت فشار آب در عبور از مراحل مختلف مجموعه اریفیس‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود افت فشار آب در هر مرحله در هنگام عبور از سوراخهای اریفیس رخ می‌دهد که در این ناحیه آب به علت کاهش سطح مقطع عبوری جریان دارای بیشترین سرعت نیز می‌باشد. پس از عبور آب از سوراخهای اریفیس، سرعت آن کاهش یافته که این امر باعث افزایش اندک فشار آب بین مراحل اریفیس‌ها می‌شود. در حقیقت آب در این ناحیه تمایل به بازگشت به سطح اولیه فشار خود را دارد که به علت وجود اصطکاک و نیز تلفات جریان مغشوش این امکان وجود ندارد. در نهایت فشار آب پس از عبور از چهار مرحله اریفیس در حدود ۳۴ بار افت پیدا می‌کند.

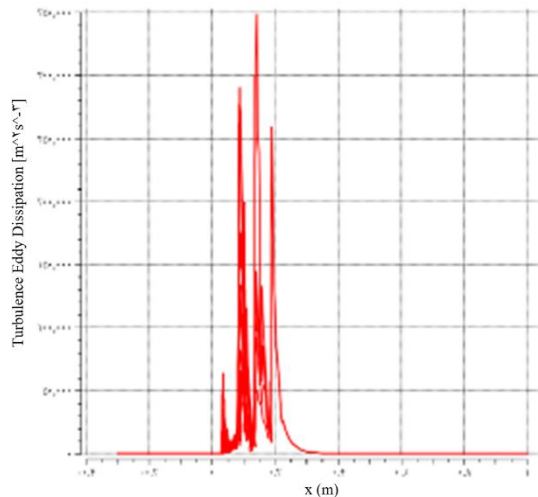
با توجه به اینکه در مدل‌سازی انجام شده شرط مرزی ورودی جریان آب به لوله، پروفیل توانی سرعت در جریان مغشوش کاملاً توسعه یافته می‌باشد و شرط مرزی خروجی جریان آب از لوله، فشار استاتیکی برابر با ۷۰ بار نسبی است؛ بنابراین هدف از این شبیه‌سازی که تعیین میزان افت فشار آب است، بدست آوردن فشار نسبی جریان آب در ورودی به لوله می‌باشد. شکل (۱۰) کانتور فشار جریان آب و شکل (۱۱) نیز نمودار افت فشار کلی جریان آب در عبور از اریفیس‌های چهار مرحله‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها می‌توان دریافت که فشار جریان آب ورودی به لوله در حدود ۱۰۴ بار نسبی می‌باشد. بنابراین افت فشار جریان آب در عبور از این مجموعه اریفیس‌های صنعتی چهار مرحله‌ای در حدود ۳۴ بار می‌باشد.



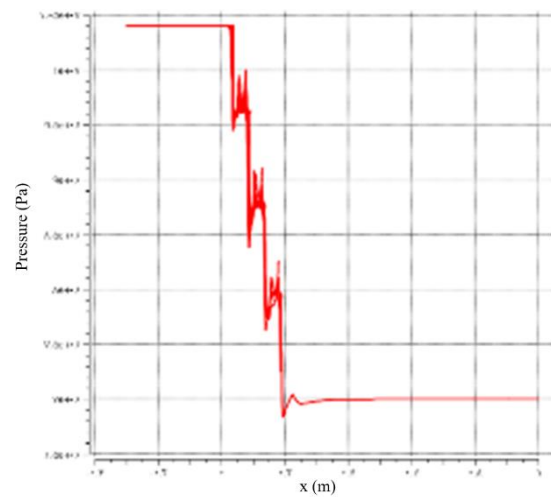
شکل (۸): نمایش خطوط جریان و گردابه‌های پشت اریفیس



شکل (۹): نمایش کانتور سرعت در مجموعه اریفیس‌ها



شکل (۱۴): نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته (\mathcal{E}) در مدل استاندارد $k - \mathcal{E}$



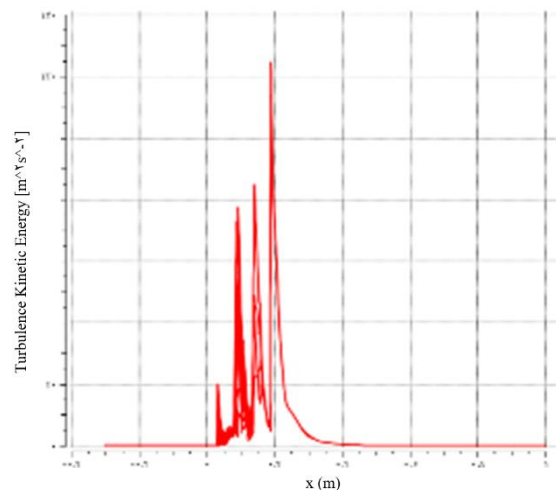
شکل (۱۲): چگونگی افت فشار آب در مراحل مختلف اریفیس

۶-۱- مقایسه نتایج عددی با نتایج تست

واقعی

به منظور بررسی صحت نتایج حل عددی، میزان افت فشار حاصل از آن با میزان افت فشار حاصل از تست واقعی انجام شده در نیروگاه حرارتی شازند اراک مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است تمامی شرایط عملکرد این تست از جمله دبی آب، اندازه لوله، فشار آب خروجی لوله و ... با مدل‌سازی انجام شده تا حد قابل قبولی مطابقت دارد. همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود چنانچه فشار آب ورودی به لوله در حدود ۱۰۴ بار نسبی باشد، فشار آب خروجی از مجموعه اریفیس‌ها در حدود ۷۲ بار خواهد شد. این بدان معنی است که مجموعه اریفیس‌های چهار مرحله‌ای طراحی شده باعث ایجاد افت فشار آب در حدود ۳۲ بار شده‌اند که با نتایج شبیه‌سازی- افت فشار آب در حدود ۳۴ بار- تطابق قابل قبولی دارند. لازم به ذکر است به منظور دست یافتن به این میزان افت فشار که مطلوب سیستم بهره‌برداری نیروگاه می‌باشد، انواع اریفیس‌ها با تغییر در تعداد سوراخ‌ها، اندازه سوراخ‌ها، زاویه سوراخ‌ها نسبت به یکدیگر و نیز تعداد مراحل اریفیس‌ها در نرم افزار Ansys CFX 14.5 مدل‌سازی شده که در نهایت بهترین حالت آن به صورت شکل (۳) طراحی گردیده است.

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب نرخ انرژی جنبشی جریان آشفته (k) و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی جریان آشفته (\mathcal{E}) در مدل استاندارد $k - \mathcal{E}$ مورد استفاده در این شبیه‌سازی، ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جریان آب در محل سوراخ اریفیس‌ها در هر یک از مراحل آن، نرخ انرژی جنبشی جریان آشفته و نیز نرخ اضمحلال انرژی جنبشی جریان آشفته افزایش می‌یابد.

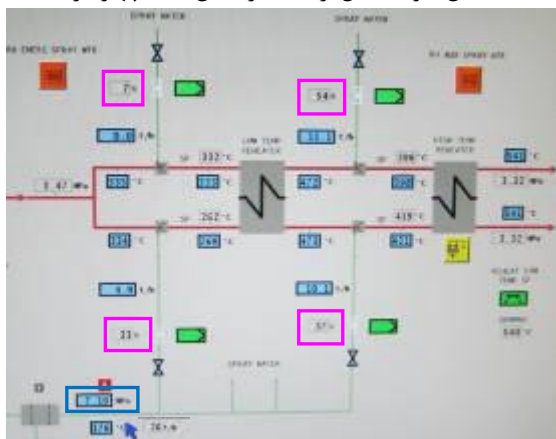


شکل (۱۳): نرخ انرژی جنبشی جریان آشفته (k) در مدل استاندارد $k - \mathcal{E}$

افت فشار آب ایجاد شده توسط مجموعه اریفیس‌ها باعث افزایش درصد بازشدگی شیرهای کنترلی مسیر آب اسپری بخار ری هیت حداکثر به میزان ۲۰ درصد نیز خواهد شد که علاوه بر کاهش میزان خوردگی شتاب جریان در این شیرها، باعث کنترل بهتر دمای المانهای ری هیت بویلر و نیز افزایش طول عمر آنها خواهد شد.



الف) نمایش شرایط قبل از نصب اریفیس‌های چهار مرحله‌ای



ب) نمایش شرایط بعد از نصب اریفیس‌های چهار مرحله‌ای

شکل (۱۵): نمایش میزان افت فشار آب و درصد بازشدگی شیرهای کنترلی مسیر آب اسپری بخار ری هیت بواسطه نصب اریفیس‌های چهار مرحله‌ای در مرکز کنترل نیروگاه حرارتی شازند اراک

۸- تشکر

نویسندگان از مدیر عامل محترم نیروگاه حرارتی شازند اراک به خاطر همکاری صمیمانه‌ای که در انجام تستها در این نیروگاه داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

با مقایسه قسمت الف و ب شکل (۱۵)، علاوه بر ایجاد افت شدید فشار آب توسط اریفیس‌های چهار مرحله‌ای، می‌توان به افزایش درصد بازشدگی شیرهای کنترلی مسیر آب اسپری بخار ری هیت-که با کادر بنفش رنگ در داخل عکس مشخص شده‌اند- حداکثر به میزان ۲۰ درصد نیز اشاره داشت. بنابراین با کاهش سرعت جریان آب در این شیرهای کنترلی، می‌توان انتظار داشت که خوردگی شتاب جریان در سیت و پلاگ آنها کمتر شده و علاوه بر اطمینان از عملکرد آنها در فرآیند کنترل دمای المانهای ری هیت بویلر، شاهد افزایش طول عمر آنها نیز بود.

لازم به ذکر است که این اریفیس‌ها برای دی‌آب ۲۵ متر مکعب بر ساعت و نصب در یک لوله با قطر داخلی ۷۷٫۳ میلیمتر (۳ اینچ) طراحی شده و با افزایش دی‌آب در لوله و یا کاهش قطر سوراخ اریفیس‌ها، افت فشار آب توسط این مجموعه بیشتر خواهد شد.

۷- نتیجه گیری

ایجاد افت فشار بالا در برخی خطوط فرآیند نیروگاههای حرارتی توسط اریفیس‌های چند مرحله‌ای انجام می‌شود. در این مقاله با استفاده از نرم افزار Ansys CFX 14.5 به بررسی میزان افت فشار آب در مسیر اسپری بخار ری هیت نیروگاه حرارتی شازند اراک توسط یک مجموعه اریفیس صنعتی چهار مرحله‌ای که درون یک لوله افقی با قطر داخلی ۷۷٫۳ میلیمتر (۳ اینچ) و طول ۱٫۳ متر تعبیه شده، پرداخته شده است. به منظور بررسی صحت نتایج مدل‌سازی عددی، مجموعه اریفیس‌ها به صورت عملی در نیروگاه حرارتی شازند اراک تست شده‌اند. در این تست با دی‌آب در حدود ۲۵ متر مکعب بر ساعت میزان افت فشار آب در حدود ۳۲ بار می‌باشد (فشار آب ورودی به لوله ۱۰۴ بار نسبی و فشار آب خروجی از مجموعه اریفیس‌ها ۷۲ بار نسبی می‌باشد). این در حالی است که میزان افت فشار آب در شبیه‌سازی عددی در حدود ۳۴ بار است که دارای تطابق خوبی با نتایج واقعی می‌باشد.

۹- تشکر

- [1] Oliveira, P.J., Pinho, F.T. (1997). "Pressure drop coefficient of laminar Newtonian flow in axisymmetric sudden expansions", *Int. J. Heat Fluid Flow* Vol. 18 (5), pp. 518–529.
- [2] Borutzky, W., Barnard, B., Thoma, J. (2002) "An orifice flow model for laminar and turbulent conditions", *Simul. Model. Practice Theory* Vol. 10 (3–4), pp. 141–152.
- [3] Moraczewski, T., Shapley, N.C. (2007). "Pressure drop enhancement in a concentrated suspension flowing through an abrupt axisymmetric contraction–expansion", *Phys. Fluids* Vol. 19.
- [4] Wu, D., Burton, R., Schoenau, G., Bitner, D. (2003). "Modelling of orifice flow rate at very small openings", *Int. J. Fluid Power* Vol. 4 (1), pp. 31–39.
- [5] Wang, H., Xie, Sh., Sai Q., Zhou C., Lin H. and Chen E. (2013). "Experiment study on pressure drop of a multistage letdown orifice tube ", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 265, pp. 633– 638.
- [6] Eiamsa-ard, S. (2008). "Numerical investigation of turbulent flow through a circular orifice", *KMITL Sci. Technol. J. Vol. 18 (1)*, 8.
- [7] Oliveira, N.M.B., Vieira, L.G.M., Damasceno, J.J.R. (2010). "Numerical methodology for orifice meter calibration", In: Salgado, L., Ambrozio, F. (Eds.), *Advanced Powder Technology Vii*, Vol. 660–661, pp. 531–536.
- [8] Shah, M.S., Joshi, J.B., Kalsi, A.S., Prasad, C.S.R., Shukla, D.S. (2012). "Analysis of flow through an orifice meter", *CFD simulation. Chem. Eng. Sci. Vol. 71*, pp. 300–309.
- [9] Abou El-Azm Aly, A., Chong, A., Nicolleau, F., Beck, S. (2010). "Experimental study of the pressure drop after fractal-shaped orifices in turbulent pipe flows", *Exp. Therm. Fluid Sci. Vol. 34 (1)*, pp. 104–111.
- [10] Hurst, D., Vassilicos, J.C. (2007). "Scalings and decay of fractal-generated turbulence", *Phys. Fluids* Vol. 19 (3).
- [11] Seoud, R.E., Vassilicos, J.C. (2007). "Dissipation and decay of fractal-generated turbulence", *Phys. Fluids* Vol. 19 (10).
- [12] Filho, J.A., Santos, A.C., Navarro, M.A. and Jordão, E. (2015). "Effect of chamfer geometry on the pressure drop of perforated plates with thin orifices", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 284, pp. 74– 79.
- [13] Jankowski, T.A., Schmierer, E.N., Prenger, F.C., Ashworth, S.P. (2008). "A series pressure drop representation for flow through orifice tubes", *J. Fluids Eng. Vol. 130 (5)*, pp. 051201–051204.
- [14] Mills, R. D. (1968). "Numerical Solutions of Viscous Flow Through a Pipe Orifice at Low Reynolds Numbers", *Mechanical Engineering Science*, Vol. 10, pp. 133-140.
- [15] Johansen, F. C. (1930). "Flow Through Pipe Orifices at Low Reynolds Numbers", *Proc R Soc*, Vol. 126 (Series A), 231.
- [16] Coder, D. A., Buckley, F. T. (1974) "Implicit Solutions of the Unsteady Navier-Stokes Equation For Laminar Flow Through an Orifice Within a Pipe", *Computer and Fluids*, Vol. 2, pp. 259-314.
- [17] Davis, R.W. and Mattingly, G.E. (1977). "Numerical Modelling of Turbulent Flow Through Thin Orifice Plates", *Proceedings of the Semp. on Flow in Open Channels and Closed Conduits Held at NBS*, pp. 23-25.
- [18] Gan, G. and Riffat, S. B. (1997). "Pressure Loss Characteristics of Orifice and Perforated Plates", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.14, pp. 160-165.
- [19] Ramamurthi, K. and Nandakumar, K. (1999). "Characteristics of flow through small sharp-edged cylindrical orifices", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 10, pp. 133–143.
- [20] Tunay, T. (2002). "Investigation of Laminar and Turbulent Flow Characteristics through Orifice with Variable Thicknesses", *MSc. Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences*.
- [21] Tunay, T., Sahin, B. and Akilli, H. (2004). "Investigation of Laminar and Turbulent Flow Through an Orifice Plate Inserted in a Pipe", *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 28 (2B), 403-414.
- [22] Tunay, T., Kahraman, A. and Şahin, B. (2002). "Orifis Yerleştirilmiş Borudaki Akışın Sayısal Çözümüne Sınır Şartlarının Etkisi", *GAP 4. Mühendislik Kongresi, Şanlıurfa*.
- [23] Tunay, T., Kahraman, A. and Şahin, B. (2011). "Effects of the Boundary Conditions on the Numerical Solution of the Orifice Flow", *Ç.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, accepted for publication.
- [24] Ushida, A., Hasegawa, T. and Narumi, T. (2014). "Anomalous phenomena in several types of liquid flows through small orifices in a range of low Reynolds numbers", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, pp. 191– 196.
- [۲۵] صنیعی نژاد، مهدی. (۱۳۸۸)، مبانی جریان‌های آشفته و مدلسازی آن‌ها (از مفاهیم مقدماتی تا اصول کاربردی)، انتشارات دانش نگار.