

## تحلیل عددی و تجربی عملکرد دبی سنج اریفیس صنعتی در یک واحد نیروگاهی

مجید مرادی باستانی<sup>۱</sup> و مجید سبزویشانی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۸	
<b>واژگان کلیدی:</b> شبیه سازی عددی، دبی سنج اریفیس، دقت اندازه گیری دبی، جریان تراکم ناپذیر مغشوش، نتایج تجربی.	<p>اریفیس ها یکی از وسایل رایج اندازه گیری دبی سیال درون لوله ها می باشند. اساس کار دبی سنج اریفیس ایجاد اختلاف فشار سیال قبل و بعد از اریفیس می باشد که با استفاده از آن می توان دبی واقعی سیال را محاسبه کرد. میزان افت فشار ایجاد شده در اریفیس و نیز ضریب تخلیه آن تابع شکل هندسی، نسبت قطر دهانه اریفیس به قطر لوله و عدد رینولدز سیال می باشد. در این تحقیق عملکرد و دقت اندازه گیری یک دبی سنج اریفیس برای اندازه گیری مقدار دبی آب خنک کاری در یک نیروگاه حرارتی نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تعیین میزان افت فشار آب در دو طرف اریفیس در دبی های مختلف، اریفیس دبی سنج به همراه اتصالات آن در نظر گرفته شده و جریان سیال داخل آن شبیه سازی شده است. با توجه به مغشوش بودن جریان آب، از مدل اغتشاشی <math>k-\epsilon</math> استاندارد استفاده شده است. منحنی عملکرد اریفیس با روش عددی بدست آورده شده و با منحنی عملکرد واقعی اریفیس بدست آمده از نتایج تجربی مقایسه شده که بیانگر تطابق مناسب است. همچنین ضریب تخلیه اریفیس در حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی نیز به دست آورده شده و با مقادیر داده شده توسط استانداردهای معتبر مقایسه شده است. تحلیل عددی میدان جریان مشخص نموده است که سرعت بیشینه در فاصله ای حدود قطر دهانه اریفیس و در پایین دست آن اتفاق می افتد و در این مقطع، سرعت جریان آب بیش از چهار برابر سرعت جریان آب ورودی به لوله است.</p>

### ۱- مقدمه

توربینی، ونتوری مترها، نازل ها، دبی سنج های آلتراسونیک و غیره وجود دارند که بر اساس اصولی مانند اندازه گیری حجمی و اختلاف فشار کار می کنند. در این میان اریفیس ها به خاطر ویژگی هایی مانند سادگی در ساخت، تعمیر و نگهداری، عدم استفاده از قطعات دوار، اقتصادی بودن، قابلیت اندازه گیری دبی سیال در رنج های مختلف و استفاده در سیالات و گازها، در طیف بسیار گسترده ای مورد استفاده صنایع قرار گرفته است [۱]. دبی سنج اریفیس شامل یک صفحه تخت نازک با یک سوراخ مدور در مرکز آن (اریفیس) می باشد که توسط دو فلنج در قسمت افقی

اندازه گیری دبی سیال در فرآیندهای مختلف موجود در صناعی مانند پالایشگاه، پتروشیمی و نیروگاه با دقت قابل قبول از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. این سیال می تواند آب، هوا، روغن، سوخت (گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل) مورد استفاده در صنایع باشد که عدم دقت کافی در اندازه گیری دبی آنها می تواند به صورت مستقیم بر روی راندمان سیکل، عملکرد تجهیزات، پرداخت هزینه های سنگین مصرف انرژی اثر گذار باشد. برای اندازه گیری دبی سیالات تجهیزات مختلفی مانند اریفیس مترها، دبی سنج های

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: spooshan@kashanu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان

لوله نصب می‌شود. جریان سیال در اثر عبور از سوراخ اریفیس باعث ایجاد اختلاف فشار در دو سر آن شده که با استفاده از این اختلاف فشار در رابطه برنولی و لحاظ کردن ضریب تخلیه اریفیس در آن می‌توان دبی واقعی سیال عبوری از خط لوله را تعیین کرد

هر چند که اریفیس‌ها دارای دقت خوبی در اندازه‌گیری دبی هستند ولی بر اساس استانداردهای مختلف از جمله S 1042 [۲] و ISO 5167 [۳] دارای محدودیتهایی نیز می‌باشند. استاندارد ISO 5167 به پارامترهای مختلفی از جمله دبی سیال، میزان اختلاف فشار، قطر لوله، نسبت قطرها ( $\beta$ )، ضخامت صفحه اریفیس و سیال کاری که در طراحی استاندارد یک اریفیس دخالت دارند، اشاره می‌کند. همچنین عملکرد یک اریفیس به شیوه نصب آن مانند وجود اتصالات، شیرها و یا هر عامل ایجاد اغشاش در جریان بالادست آن نیز بستگی دارد. وجود اغتشاش جریان باعث اعوجاج در پروفیل سرعت سیال و تأثیر منفی در عملکرد دبی‌سنج اریفیزی خواهد شد [۱]. به همین منظور حداقل اندازه‌ای برای طول لوله مستقیم در بالادست و پایین دست اریفیس‌ها توسط استانداردها [۲-۳] پیشنهاد شده است.

عملکرد دبی‌سنج‌های اریفیزی توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. دیویس و همکاران [۴] به مطالعه جریان مغشوش عبوری از یک صفحه اریفیس نازک با استفاده از مدل اغتشاشی دو معادله‌ای در محدوده اعداد رینولدز بین  $10^4 - 10^6$  پرداختند. در این تحقیق جریان ورودی کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته شده و از پروفیل سرعت قانون توانی  $1/9$  استفاده شده است. ابو ال-عزم علی و همکاران [۵]، هارست و واسیلیکاس [۶] و سعود و واسیلیکاس [۷] با استفاده از روشهای تجربی، جریان مغشوش و پارامترهای مؤثر بر افت فشار در اریفیس‌های خاص را مورد بررسی قرار دادند. جانکوفسکی و همکاران [۸] مدلی را برای پیش‌بینی افت فشار و ضریب تخلیه جریان تراکم‌ناپذیر عبوری از یک اریفیس در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز ارائه نموده‌اند. داویس و ماتینگلی [۸] از دو مدل توربولانسی برای جریان عبوری از میان یک اریفیس صفحه‌ای با عدد رینولدز بالا استفاده کردند. 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 گرفتند. آنها نشان دادند که مدل  $k - \epsilon$  دقت قابل قبولی برای تعیین مشخصه‌های مهم جریان مغشوش در جریان تراکم‌ناپذیر عبوری از یک اریفیس صفحه‌ای نازک متقارن محوری دارد. تونای [۱۰] و [۱۱] 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. اسمیت و همکاران [۱۲] به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی جریان مغشوش عبوری از یک اریفیس با نسبت قطرهای ۰٫۵، ۰٫۶ و ۰٫۸ و بکارگیری مدل استاندارد و مدل تنش‌های رینولدز (RSM) و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی [۱۳] پرداختند. فیلهو و همکاران [۱۴] با استفاده از روش‌های حل عددی میزان افت فشار آب عبوری از صفحات سوراخدار اریفیزی 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  $k - \epsilon$  دارای دقت بالاتری نسبت به سایر مدلها می‌باشد.

اولیور و همکاران [۱۵] میزان دقت اندازه‌گیری آب تغذیه یک نیروگاه توسط دبی‌سنج اریفیزی که تأثیر مهمی در راندمان نیروگاه نیز دارد را برای دماهای آب بالاتر از دمای محیط مورد بررسی قرار دادند. شانگ فنگ [۱۶] ضریب تخلیه یک اریفیس چند سوراخه به همراه رابطه بین دبی حجمی و افت فشار سیال عبوری از اریفیس را مورد مطالعه قرار داد. وی پارامترهای مؤثر در هندسه اریفیس مانند ضخامت صفحه، تخلخل، توزیع سوراخ‌ها بر روی صفحه اریفیس و اغتشاش جریان بالادست در یک لوله افقی حاوی آب را با دبی‌های مختلف آزمایش کرد و دریافت که صفحه سوراخ‌دار نسبت به یک اریفیس استاندارد اغتشاش کمتری در پایین دست ایجاد کرده و دارای ضریب تخلیه بزرگتری نسبت به آن می‌باشد.

در این تحقیق دقت اندازه‌گیری دبی آب خنک‌کاری شینه‌های استاتور ژنراتور یک نیروگاه حرارتی نمونه که توسط یک دبی‌سنج اریفیزی نشان داده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است.

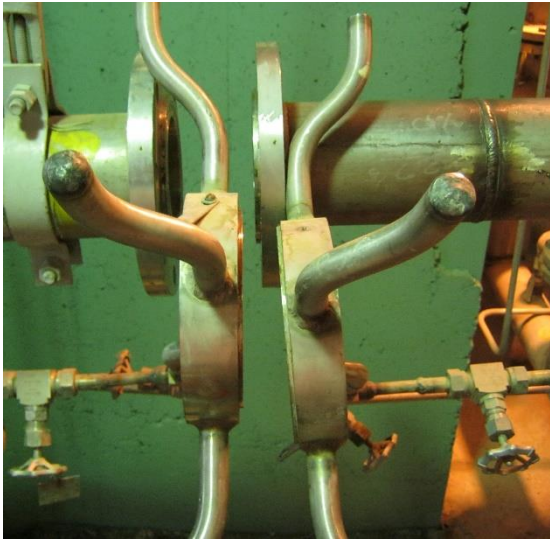
به منظور تعیین میزان افت فشار آب در دو طرف اریفیس

لوله نصب می‌شود. جریان سیال در اثر عبور از سوراخ اریفیس باعث ایجاد اختلاف فشار در دو سر آن شده که با استفاده از این اختلاف فشار در رابطه برنولی و لحاظ کردن ضریب تخلیه اریفیس در آن می‌توان دبی واقعی سیال عبوری از خط لوله را تعیین کرد

هر چند که اریفیس‌ها دارای دقت خوبی در اندازه‌گیری دبی هستند ولی بر اساس استانداردهای مختلف از جمله S 1042 [۲] و ISO 5167 [۳] دارای محدودیتهایی نیز می‌باشند. استاندارد ISO 5167 به پارامترهای مختلفی از جمله دبی سیال، میزان اختلاف فشار، قطر لوله، نسبت قطرها ( $\beta$ )، ضخامت صفحه اریفیس و سیال کاری که در طراحی استاندارد یک اریفیس دخالت دارند، اشاره می‌کند. همچنین عملکرد یک اریفیس به شیوه نصب آن مانند وجود اتصالات، شیرها و یا هر عامل ایجاد اغشاش در جریان بالادست آن نیز بستگی دارد. وجود اغتشاش جریان باعث اعوجاج در پروفیل سرعت سیال و تأثیر منفی در عملکرد دبی‌سنج اریفیزی خواهد شد [۱]. به همین منظور حداقل اندازه‌ای برای طول لوله مستقیم در بالادست و پایین دست اریفیس‌ها توسط استانداردها [۲-۳] پیشنهاد شده است.

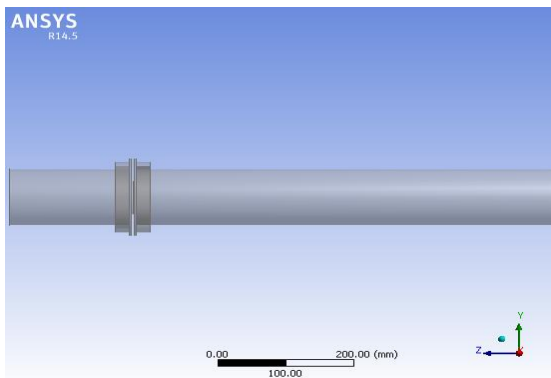
عملکرد دبی‌سنج‌های اریفیزی توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. دیویس و همکاران [۴] به مطالعه جریان مغشوش عبوری از یک صفحه اریفیس نازک با استفاده از مدل اغتشاشی دو معادله‌ای در محدوده اعداد رینولدز بین  $10^4 - 10^6$  پرداختند. در این تحقیق جریان ورودی کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته شده و از پروفیل سرعت قانون توانی  $1/9$  استفاده شده است. ابو ال-عزم علی و همکاران [۵]، هارست و واسیلیکاس [۶] و سعود و واسیلیکاس [۷] با استفاده از روشهای تجربی، جریان مغشوش و پارامترهای مؤثر بر افت فشار در اریفیس‌های خاص را مورد بررسی قرار دادند. جانکوفسکی و همکاران [۸] مدلی را برای پیش‌بینی افت فشار و ضریب تخلیه جریان تراکم‌ناپذیر عبوری از یک اریفیس در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز ارائه نموده‌اند. داویس و ماتینگلی [۸] از دو مدل توربولانسی برای جریان عبوری از میان یک اریفیس صفحه‌ای با عدد رینولدز بالا استفاده کردند. 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

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.



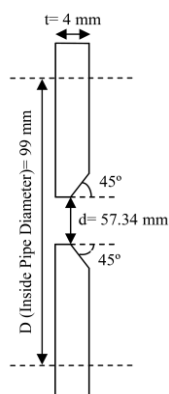
شکل ۲- محل نصب اریفیس در نیروگاه حرارتی

در شکل (۳) هندسه مدل مورد نظر و در شکل (۴) مشخصات اریفیس نشان داده شده است.



شکل ۳- هندسه مدل‌سازی اریفیس دی‌سنج و اتصالات آن در

نرم افزار ANSYS CFX 1



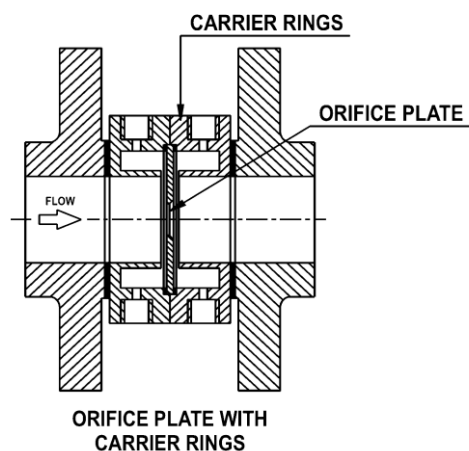
شکل ۴- مشخصات هندسی اریفیس صنعتی مورد استفاده در

دی‌سنج

در دی‌های مختلف، اریفیس دی‌سنج به همراه اتصالات آن در نرم افزار CFX 15 ANSYS شبیه‌سازی شده است. با توجه به مغشوش بودن جریان آب، برای مدل‌سازی از مدل استاندارد  $k-\epsilon$  استفاده شده است. همچنین با ساخت یک دستگاه آزمایشگاهی میزان اختلاف فشار واقعی ایجاد شده در دو طرف اریفیس در دی‌های مختلف آب نیز اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق ضریب تخلیه اریفیس نیز به دست آورده شده و با استانداردهای معتبر مقایسه شده است.

## ۲- تعریف مسأله

شینه‌های مسی استاتور ژنراتور نیروگاه حرارتی نمونه توسط آب خنک‌کاری می‌شوند. فشار آب توسط پمپ تا حدود ۶ بار افزایش یافته و آب پس از عبور از مبدلهای حرارتی با فشاری در حدود ۲٫۵ بار و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد وارد شینه‌های استاتور می‌شود. دی‌جرمی آب که در شرایط بار کامل واحد بین ۶۰ تا ۶۵ تن بر ساعت است، توسط یک دی‌سنج اریفیس نمایش داده می‌شود. اریفیس این دی‌سنج به وسیله دو فلنج با دو رینگ نگه دارنده در یک لوله افقی استنلس استیل به قطر داخلی ۹۹ میلی‌متر نصب شده است. در شکل (۱) طریقه نصب اریفیس بین دو رینگ نگه دارنده و در شکل (۲) محل نصب آن در نیروگاه نشان داده شده است. دی‌جرمی آب در حالت طراحی ۶۲ تن بر ساعت و دمای آن ۴۰ درجه سانتیگراد فرض می‌شود. با توجه به اینکه سرعت جریان آب در این لوله ۲٫۲۵۶ متر بر ثانیه و عدد رینولدز جریان در حدود  $3.4 \times 10^5$  است، بنابراین جریان مغشوش است.



شکل ۱- طریقه نصب اریفیس بین دو رینگ نگه دارنده

## ۳- معادلات حاکم

$$\rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{1}{r} \rho v \frac{\partial (r\varepsilon)}{\partial r} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) \right] \quad (7)$$

$$+ \left\{ C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k \right\} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

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

$$P_k = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

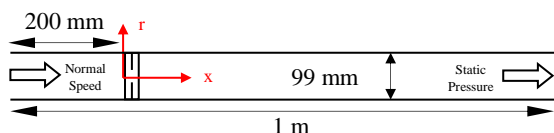
در روابط ۵ تا ۷ ضرایب  $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_\mu$  دارای مقادیر استاندارد زیر می‌باشند:

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \quad (9)$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3, C_\mu = 0.09.$$

#### ۴- شرایط مرزی

در شکل (۵) شماتیکی از میدان حل عددی به همراه شرایط مرزی آن نشان داده شده است.



شکل ۵- شماتیک میدان حل عددی جریان داخل لوله و دی‌سنج اریفیزی به همراه شرایط مرزی آن

همانطوریکه در شکل (۵) مشاهده می‌شود، به منظور مدل‌سازی مناسب گردابه‌های به وجود آمده پس از اریفیس، طول لوله پس از آن 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 مطابق رابطه ۱۰ استفاده شده است.

$$u = u_{max} \left|_{(r=0)} \left( 1 - \frac{r}{r_{max}} \right)^{1/7} \right. \quad (10)$$

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

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 مومنتوم در جهت‌های محوری و شعاعی می‌باشند [۱۷]:

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

معادله مومنتوم:

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

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

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

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

در روابط فوق  $\mu_{eff}$  مجموع ویسکوزیته سیال  $\mu$  و ویسکوزیته جریان مغشوش  $\mu_t$  است:

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

که  $\mu_t$  با استفاده از مدل‌های ادی-ویسکوزیته مانند مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  به صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

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

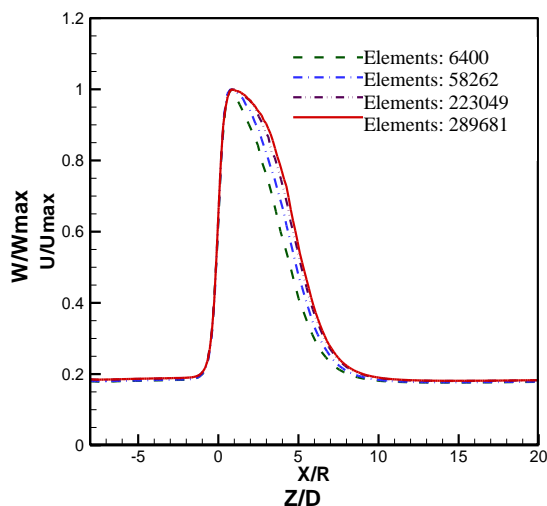
مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  که توانایی، اقتصادی بودن و دقت مناسب برای طیف وسیعی از جریان‌های مغشوش، سبب جذابیت این مدل در شبیه‌سازی‌های جریان در صنعت گردیده است، شامل دو معادله یکی برای انرژی جنبشی جریان آشفته ( $k$ ) و دیگری برای نرخ اضمحلال انرژی جنبشی جریان آشفته ( $\varepsilon$ ) می‌باشد که به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

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

مورد آزمایش قرار گرفته است. در جدول ۱ میزان افت فشار آب قبل و بعد از اریفیس و در شکل (۷) سرعت بی بعد در مرکز لوله و طول آن برای چند شبکه متفاوت با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که از این نتایج بر می آید، برای شبکه‌هایی با تعداد المان بیش از ۲۲۳۰۴۹ میزان افت فشار آب در اریفیس و نیز سرعت بی بعد در مرکز لوله تقریباً ثابت می ماند. بنابراین به منظور صرفه جویی در وقت و هزینه محاسبات از شبکه مذکور استفاده شده است.

جدول ۱- مطالعه شبکه

افت فشار آب (کیلو پاسکال)	تعداد المان‌ها	تعداد نقاط
۵۲٫۷۱	۲۸۹۶۸۱	۵۹۴۳۵
۵۲٫۶۸	۲۲۳۰۴۹	۴۵۹۳۰
۵۲٫۲۱	۱۷۵۴۸۴	۳۶۴۵۶
۵۱٫۶	۱۱۴۲۲۱	۲۴۱۰۶
۵۰٫۲	۵۸۲۶۲	۱۲۶۴۸
۴۲٫۳	۲۵۷۳۱	۵۶۲۰
۲۸٫۸	۶۴۰۰	۱۶۴۱



شکل ۷- مقایسه سرعت بی بعد در مرکز لوله و طول آن برای شبکه های مختلف

## ۶- ساخت دستگاه تست آزمایشگاهی

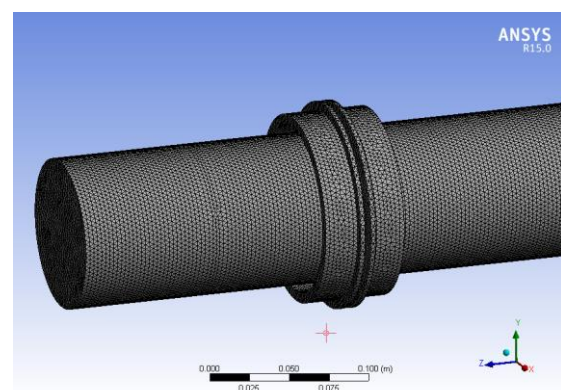
به منظور بررسی صحت مدل سازی انجام شده، بایستی با ساخت یک دستگاه تست آزمایشگاهی، نتایج حاصل از حل عددی را با نتایج انجام تست‌ها در شرایط یکسان با یکدیگر

در مقطع خروجی جریان از شرط مرزی فشار استاتیک استفاده شده و مقدار آن برابر ۲٫۵ بار نسبی در نظر گرفته شده است. این مقدار با توجه به میزان فشار پایین دست اریفیس دی سنج موجود در نیروگاه تعیین شده است.

## ۵- روش حل عددی

برای تعیین میدان سرعت و فشار، معادلات حاکم بر جریان تراکم ناپذیر، دائم و متقارن محوری در مختصات استوانه‌ای شامل معادله پیوستگی و معادلات مومنتم در جریان مغشوش معادلات (۱) تا (۹) باید به طریق مناسبی حل شوند. در حل معادلات مومنتم وابستگی فشار و سرعت با استفاده از الگوریتم سیمپل برقرار گردیده است. با توجه به مغشوش بودن جریان در نرم افزار ANSYS CFX 15، از مدل استاندارد  $k-\epsilon$  برای حل عددی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در شبیه سازی بسیاری از جریان های مغشوش تراکم ناپذیر عبوری از انواع اریفیس ها مدل استاندارد  $k-\epsilon$  مورد استفاده قرار گرفته و دقت و صحت آن مورد تأیید واقع شده است [۹، ۱۲ و ۱۴]. همچنین با توجه به شرایط مناسب نصب این دی سنج در نیروگاه، میزان آشفتگی جریان<sup>۱</sup> در ورودی لوله به صورت متوسط (۵٪) در نظر گرفته شده است.

در شکل (۶) شبکه بندی میدان حل عددی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در نواحی که گرادین فشار و سرعت تغییرات شدیدی دارند، به منظور مدل سازی بهتر لایه مرزی، چگالی نقاط شبکه افزایش یافته است.

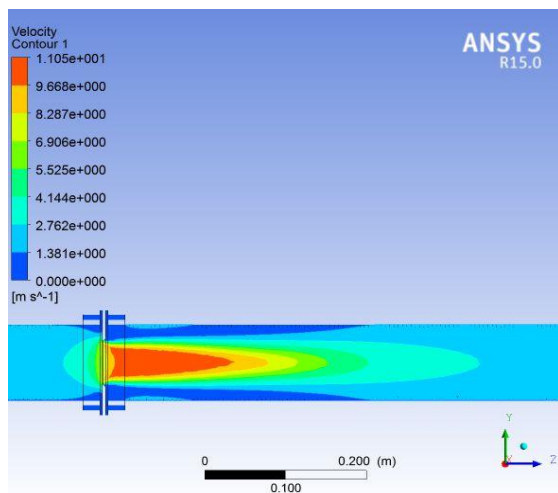


شکل ۶- شبکه بندی میدان حل عددی

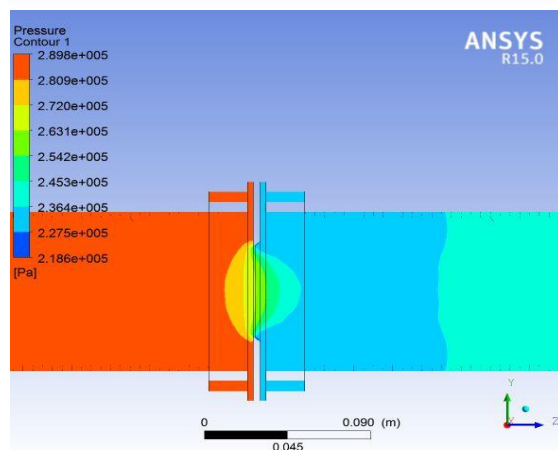
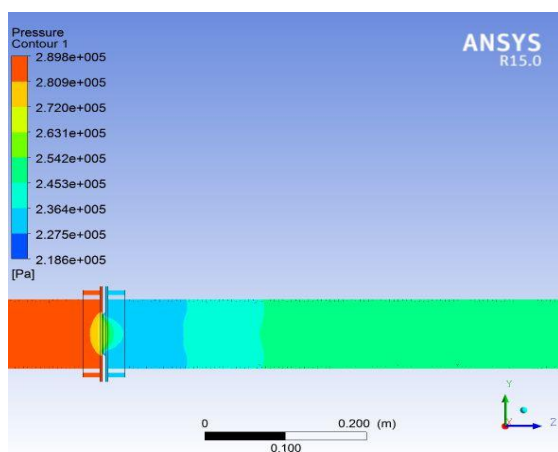
برای اطمینان استقلال نتایج از تعداد نقاط شبکه و یافتن تعداد نقاط مورد نیاز، شبکه های متفاوتی برای مدل سازی

<sup>۱</sup> Turbulence Intensity

از آن به دست آورد (شکل ۱۱). بنابراین نتایج به دست آمده از حل عددی مجموعه اریفیس در دبی جرمی ۶۲ تن بر ساعت نشان می‌دهد که مقدار افت فشار آب در آن حدود ۵۳ کیلو پاسکال است.



شکل ۱۰- کانتور سرعت در پایین دست اریفیس دبی سنج



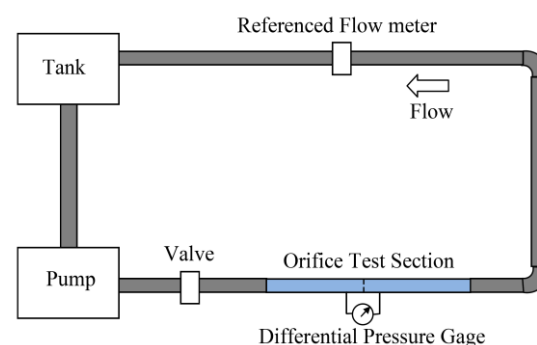
شکل ۱۱- کانتور فشار در پایین دست اریفیس دبی سنج

شکل (۱۲) منحنی تغییرات سرعت جریان آب در مرکز لوله و در طول آن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده

مقایسه کرد. بنابراین در ابتدا مجموعه اریفیس و متعلقات آن مطابق شکل (۸) ساخته شده است. سپس این مجموعه در داخل یک سیکل بسته که شامل پمپ، مخزن، دبی سنج مرجع دقیق، گیج اختلاف فشار در محدوده ۰-۱۰۰ کیلو پاسکال، شیر و لوله‌های ارتباطی می‌شود (شکل ۹)، نصب گردیده است. با تغییر در میزان بازشدگی شیر می‌توان دبی آب عبوری از اریفیس را تغییر داد و در هر مرحله میزان افت فشار آب در دو طرف اریفیس و دبی واقعی عبوری از خط لوله را توسط دبی سنج مرجع دقیق ثبت کرد. در نهایت با انجام این آزمایش می‌توان منحنی عملکرد واقعی اریفیس را مشخص نمود و با منحنی عملکرد حاصل از مدل‌سازی مقایسه کرد



شکل ۸- نمونه ساخته شده اریفیس دبی سنج به همراه متعلقات آن



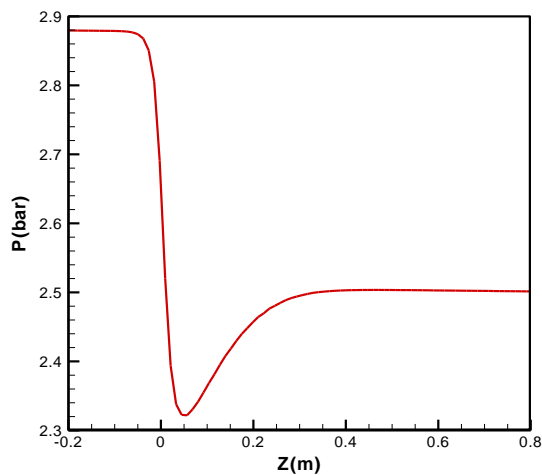
شکل ۹- طرحواره سیکل دستگاه ساخته شده

## ۷- بررسی نتایج

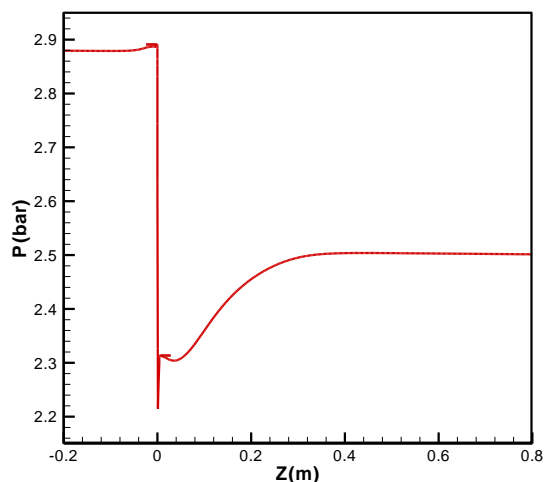
در این بخش به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و مقایسه میزان افت فشار آب در اریفیس دبی سنج با نتایج واقعی پرداخته می‌شود. در شکل (۱۰) کانتور سرعت و در شکل (۱۱) کانتور فشار حاصل از شبیه‌سازی عددی دبی سنج اریفیس نشان داده شده است.

با توجه به اینکه در نتایج حاصل از تست تجربی، مقادیر فشار قبل و بعد از اریفیس از داخل رینگ نگهدارنده آن اندازه‌گیری می‌شود (مطابق شکل‌های ۱ و ۲)، در شبیه‌سازی حاضر می‌توان میزان افت فشار در اریفیس را با استفاده از فشار آب موجود در رینگ نگهدارنده قبل و بعد

با توجه به این نتایج، هر دو این کمیت‌ها علاوه بر محل نصب اریفیس ( $z=0$ )، در فاصله‌ای حدود دو برابر قطر دهانه اریفیس و در پایین دست آن دارای بیشینه مقدار خود هستند.



شکل ۱۳- منحنی تغییرات فشار استاتیک آب در مرکز و طول لوله

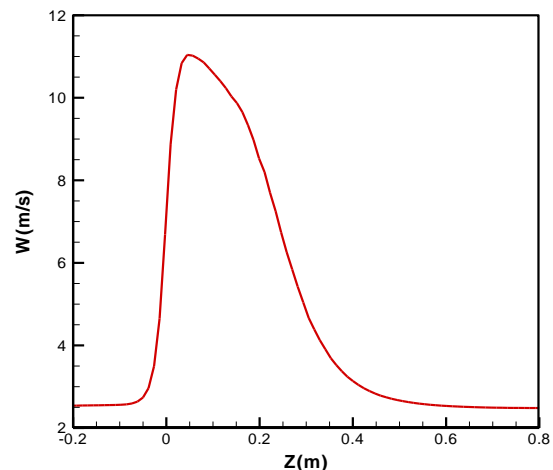


شکل ۱۴- منحنی تغییرات فشار استاتیک دیواره لوله در امتداد طول

علت افزایش این کمیتها نیز وجود جریان برگشتی و ایجاد گردابه در پشت صفحه اریفیس می‌باشد که تا اندازه‌ای معادل سه برابر قطر دهانه اریفیس در پایین دست آن کشیده شده است. در شکل (۱۷) می‌توان بردارهای سرعت و نیز ناحیه برگشت جریان و گردابه‌ای بوجود آمده در پشت صفحه اریفیس را مشاهده نمود. لازم به ذکر است مرکز گردابه‌ها تقریباً در فاصله‌ای معادل قطر دهانه اریفیس و در پایین دست آن می‌باشد.

برای به دست آوردن منحنی عملکرد اریفیس در حالت حل

می‌شود، سرعت بیشینه در فاصله‌ای معادل قطر دهانه اریفیس و در پایین دست آن اتفاق می‌افتد. این مقطع که سرعت جریان آب بیش از چهار برابر سرعت جریان آب ورودی به لوله است، در اثر پدیده انقباض ونا<sup>۱</sup> دارای کمترین مقطع عبور جریان آب می‌باشد. لازم به ذکر است بیشترین سرعت جریان آب که در ورودی لوله ۲.۲۵۶ متر بر ثانیه می‌باشد، در ناحیه ونا به بیش از ۱۱ متر بر ثانیه می‌رسد.



شکل ۱۲- منحنی تغییرات سرعت جریان آب در مرکز و طول لوله

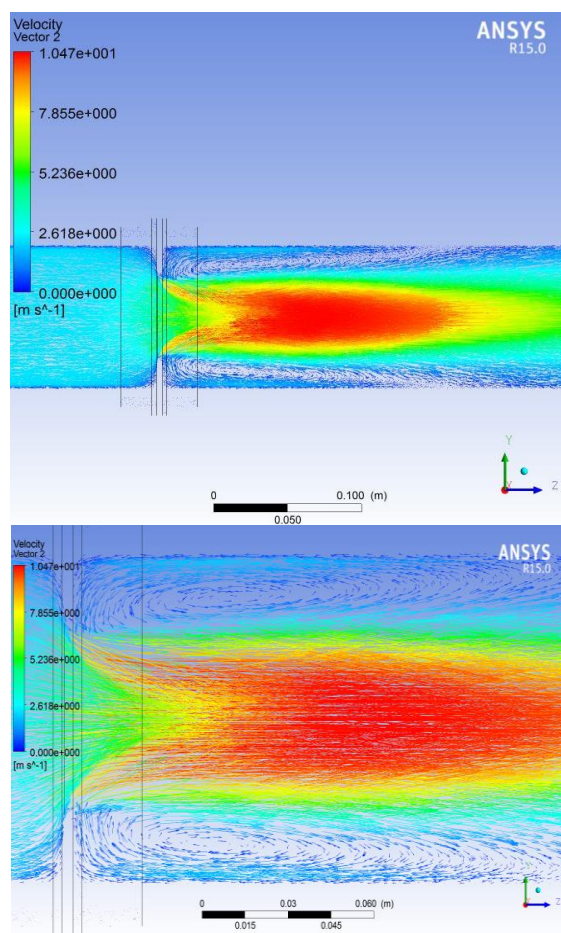
در شکل (۱۳) منحنی تغییرات فشار استاتیک آب در مرکز لوله و در طول آن نشان داده شده است. در این شکل نیز کمترین فشار استاتیک در ناحیه بیشترین سرعت جریان آب یعنی در ناحیه انقباض ونا اتفاق می‌افتد. پس از این ناحیه به دلیل کاهش سرعت، فشار افزایش یافته و در نهایت قبل از رسیدن به مقطع خروجی لوله ثابت می‌شود.

در شکل (۱۴) منحنی تغییرات فشار استاتیک دیواره لوله در امتداد طول آن آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود فشار استاتیک دیواره لوله دارای یک افت فشار شدید (در حدود ۵۳ کیلو پاسکال) در محل نصب اریفیس بوده و مقدار آن تا مقطع خروجی لوله افزایش می‌یابد. همچنین افت فشار استاتیک آب از مقطع ورودی تا مقطع خروجی لوله در دبی جرمی ۶۲ تن بر ساعت، در حدود ۳۸ کیلو پاسکال می‌باشد.

شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب به منحنی تغییرات انرژی جنبشی جریان آشفته و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی جریان آشفته بر روی دیواره لوله و در امتداد آن اشاره دارد.

<sup>۱</sup> Vena contracta

منحنی عملکرد آن در حالت تست آزمایشگاهی وجود دارد. میزان خطای نسبی آنها بین ۱,۵٪ در دبی‌های پایین تا ۰,۵٪ در دبی‌های بالا است.

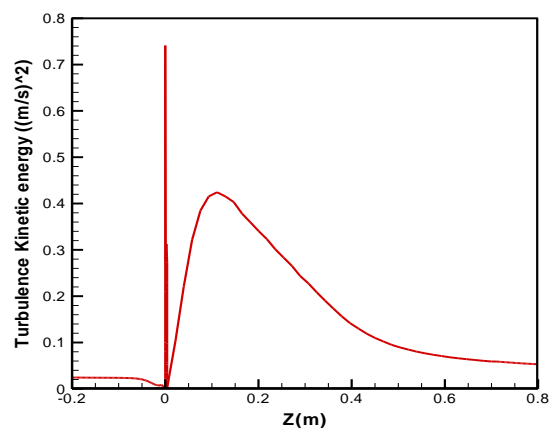


شکل ۱۷- بردارهای سرعت و گردابه‌های بوجود آمده در پشت صفحه اریفیس

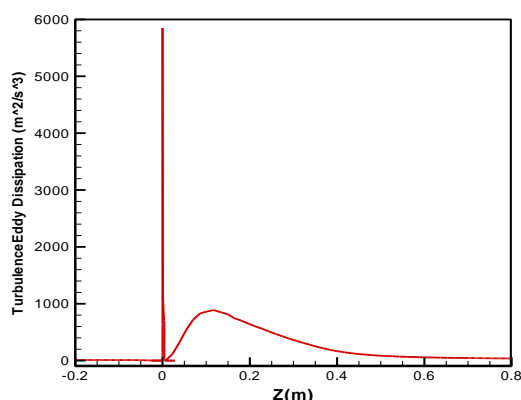
لازم به ذکر است با توجه به شکل فوق می‌توان منحنی عملکرد اریفیس را با یک رابطه توانی مرتبه دوم بنابرین می‌توان دریافت میزان دبی آب عبوری از اریفیس دی‌سنج با جذر میزان افت فشار در اریفیس نسبت مستقیم دارد. همچنین با افزایش میزان دبی آب که باعث افزایش سرعت آن درون لوله می‌شود، میزان افت فشار آب در اریفیس به صورت تابع توانی مرتبه دوم افزایش پیدا می‌کند.

در این تحقیق ضریب تخلیه اریفیس در حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی در دبی‌های مختلف نیز به دست آورده شده و با استانداردهای معتبر مقایسه شده است. ضریب تخلیه اریفیس به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

عدد، لازم است این شبیه‌سازی برای دبی‌های مختلف آب نیز انجام شده و اختلاف فشار دو طرف اریفیس محاسبه شود. لازم به ذکر است منحنی عملکرد اریفیس بیانگر مقدار اختلاف فشار ایجاد شده در اریفیس بر حسب مقدار دبی حجمی آب عبوری از آن است.



شکل ۱۵- منحنی تغییرات انرژی جنبشی جریان آشفته در امتداد دیواره لوله



شکل ۱۶- منحنی تغییرات نرخ اضمحلال انرژی جنبشی جریان آشفته در امتداد دیواره لوله

همچنین به منظور بررسی صحت نتایج حل عددی، بایستی میزان افت فشار آب در اریفیس با میزان افت فشار حاصل از تست آزمایشگاهی آن در دبی‌های مختلف مقایسه شود. بنابراین با ساخت مجموعه اریفیس و متعلقات آن مطابق شکل‌های (۸) و (۹) و تست آزمایشگاهی آن در دبی‌های مختلف، می‌توان منحنی عملکرد اریفیس در حالت تجربی را نیز به دست آورد.

در شکل (۱۸) منحنی عملکرد اریفیس در حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی بین منحنی عملکرد اریفیس دی‌سنج در حالت حل عددی با

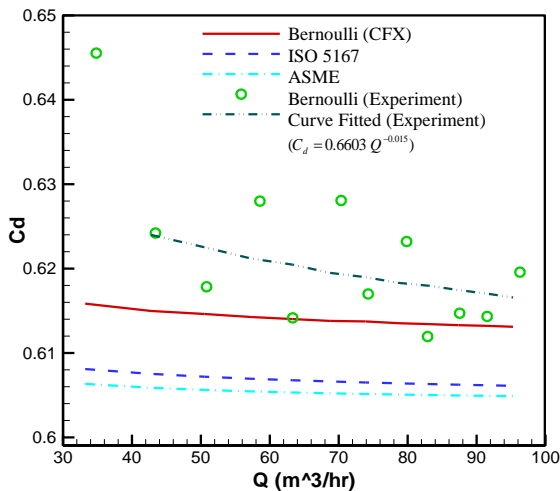


$$C_d = 0.5959 + 0.0321\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + \frac{91.71\beta^{2.5}}{Re_D^{0.75}} \quad (13)$$

در روابط فوق  $\beta$  نسبت قطرها و  $Re_D$  عدد رینولدز جریان بر اساس قطر لوله می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re_D = \rho V D / \mu \quad (14)$$

در رابطه فوق  $D$  قطر لوله،  $V$  سرعت متوسط،  $\rho$  چگالی و  $\mu$  لزجت دینامیکی آب می‌باشد. در شکل (۱۹) ضریب تخلیه محاسبه شده اریفیس برای دو حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی با ضریب تخلیه اریفیس حاصل از دو استاندارد ISO 5167 و ASME (روابط ۱۲ و ۱۳) در دبی‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه دبی حجمی تئوری همیشه بزرگتر از دبی حجمی واقعی است، لذا ضریب تخلیه اریفیس بایستی عددی بین صفر تا یک باشد.

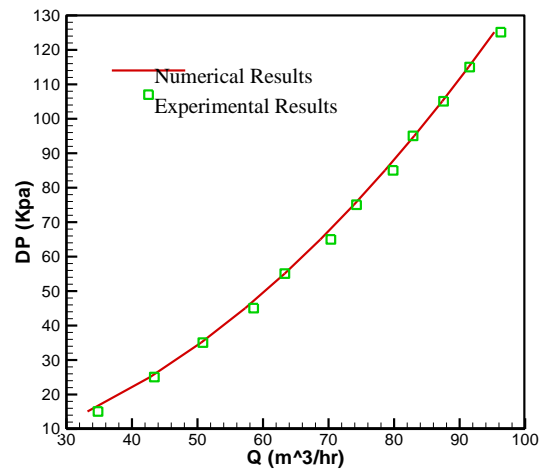


شکل ۱۹- مقایسه ضریب تخلیه اریفیس در دو حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی با استانداردهای ISO 5167 [۳] و ASME [۱۸]

از نمودار فوق توجه به چند نکته حائز اهمیت است. نخست آنکه ضریب تخلیه اریفیس بدست آمده از دو استاندارد معتبر مذکور دارای اختلاف بسیار اندکی با یکدیگر می‌باشند. دیگر اینکه ضریب تخلیه بدست آمده اریفیس از رابطه برنولی با استفاده از نتایج حل عددی بسیار نزدیک به استانداردهای مذکور می‌باشد (میزان خطای نسبی با استاندارد ASME در حدود ۱٫۵٪ و با استاندارد ISO 5167 در حدود ۱٫۲٪ است). همچنین با افزایش دبی آب به علت افزایش میزان افت فشار، ضریب تخلیه اریفیس روند

$$C_d = \frac{Q_a}{Q_t} = \frac{Q_a}{A_1 \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho \left( (A_1 / A_2)^2 - 1 \right)}} \quad (11)$$

در رابطه فوق  $C_d$  ضریب تخلیه اریفیس،  $Q_a$  دبی حجمی واقعی،  $Q_t$  دبی حجمی تئوری،  $P$  فشار،  $\rho$  چگالی و  $A$  سطح مقطع جریان می‌باشد. اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب موقعیت مقطع لوله و دهانه اریفیس را نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به رابطه ۱۱ و شکل (۱۸)، می‌توان ضریب تخلیه این اریفیس را در دبی‌های مختلف برای دو حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی به دست آورد.



شکل ۱۸- مقایسه منحنی عملکرد اریفیس دبی سنج در دو حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی

ضریب تخلیه یک اریفیس استاندارد را می‌توان با استفاده از روابط موجود در استانداردها نیز به دست آورد. در استاندارد ISO 5167 [۳] برای محاسبه ضریب تخلیه اریفیس با فلنج از نوع رینگ نگه دارنده رابطه زیر پیشنهاد شده است:

$$C_d = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left( \frac{\beta \times 10^6}{Re_D} \right)^{0.7} + \left( \frac{0.0188}{+0.0063 \left( \frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0.8}} \right) \beta^{3.5} \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} \quad (12)$$

استاندارد ASME [۱۸] نیز رابطه‌ای را به صورت زیر برای محاسبه ضریب تخلیه اریفیس با فلنج از نوع رینگ نگه دارنده پیشنهاد داده است:

حرارتی نمونه که توسط یک دی‌سنج اریفیزی نشان داده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است.

ابتدا با شبیه‌سازی اریفیزی دی‌سنج به همراه اتصالات آن در نرم افزار ANSYS CFX 15، میزان افت فشار آب در دو طرف اریفیس در دی‌های مختلف، به دست آورده شد و در نهایت منحنی عملکرد اریفیس در حالت حل عددی بدست آمد. همچنین با ساخت یک دستگاه آزمایشگاهی میزان اختلاف فشار واقعی ایجاد شده در دو طرف اریفیس در دی‌های مختلف آب نیز اندازه‌گیری شده و منحنی عملکرد واقعی اریفیس بدست آمد. منحنی عملکرد واقعی اریفیس دارای تطابق قابل قبولی با منحنی عملکرد اریفیس در حالت حل عددی می‌باشد بطوریکه بیشینه مقدار خطای نسبی آنها در حدود ۱,۵٪ می‌باشد. همچنین می‌توان دریافت با افزایش میزان دی‌آب، میزان افت فشار آب در اریفیس به صورت تابع توانی مرتبه دو افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده فوق با عملکرد این اریفیس در مسیر آب خنک‌کاری شینه‌های ژنراتور نیروگاه نیز مقایسه شد. مقدار دی‌آب نشان داده شده در مرکز کنترل نیروگاه و معادل اختلاف فشار اندازه‌گیری شده آن توسط ترانس‌میترا اختلاف فشار، حاکی از آن است که نقطه کاری اریفیس دی‌سنج تقریباً بر روی منحنی‌های عملکرد اریفیس در حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی قرار دارد. همچنین در این مقاله ضریب تخلیه اریفیس به دست آمده از دو حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی با ضریب تخلیه اریفیس حاصل از استانداردهای ISO 5167 و ASME در دی‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. بیشترین میزان خطای نسبی بین ضریب تخلیه اریفیس حاصل از منحنی عبوری از نتایج تست آزمایشگاهی با ضریب تخلیه اریفیس در حالت حل عددی در حدود ۱,۵٪ و با ضریب تخلیه اریفیس حاصل از استانداردهای مذکور در حدود ۳٪ می‌باشد.

کاهش به خود می‌گیرد. ضریب تخلیه به دست آمده اریفیس با استفاده از نتایج تست آزمایشگاهی نیز دارای تطابق قابل قبولی با ضریب تخلیه حاصل از نتایج حل عددی و استانداردهای مذکور می‌باشد. میزان خطای نسبی بین ضریب تخلیه اریفیس در حالت حل عددی و منحنی عبوری از نتایج تست آزمایشگاهی، بین ۱,۵٪ در دی‌های پایین تا ۰,۵٪ در دی‌های بالا می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت بیشترین میزان خطای نسبی بین ضریب تخلیه اریفیس حاصل از منحنی عبوری از نتایج تست آزمایشگاهی با استانداردهای مذکور در حدود ۳٪ می‌باشد که قابل قبول است. لازم به ذکر است میزان خطای نسبی بین ضریب تخلیه اریفیس در حالت حل عددی و منحنی عبوری از نتایج تست آزمایشگاهی، معادل همان میزان خطای نسبی بین دی‌آب در حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی (شکل ۱۸) می‌باشد.

لازم به ذکر است نتایج حاصل از حل عددی و تست آزمایشگاهی این اریفیس با مقدار دی‌آب موجود در مرکز کنترل نیروگاه نیز مقایسه شده است. در دی‌آب ۷۶,۰۶ تن بر ساعت اختلاف فشار اندازه‌گیری شده بین دو سر اریفیس معادل ۸۰ کیلو پاسکال می‌باشد. این نشان می‌دهد که نقطه کاری اریفیس تقریباً بر روی منحنی‌های عملکرد آن در حالت حل عددی و تست آزمایشگاهی (شکل ۱۸) قرار دارد.

## ۸- نتیجه‌گیری

دقت اندازه‌گیری دی‌ در فرآیندهای مختلف صنعتی مانند پالایشگاه، پتروشیمی و نیروگاه بسیار حائز اهمیت است. دی‌سنج اریفیزی یکی از رایج‌ترین وسایل اندازه‌گیری دی‌ با استفاده از اختلاف فشار سیال است که در صنایع مختلف به خاطر نصب و تعمیرات آسان و نیز صرفه اقتصادی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق دقت اندازه‌گیری دی‌آب خنک‌کاری شینه‌های استاتور ژنراتور یک نیروگاه

## مراجع

- [1] R.W. Miller, Flow measurement engineering handbook, 3rd McGraw-Hill, New York, 1996.
- [2] I. British Standards, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices. Pt.1, Orifice plates, nozzles, and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full, BSI, London, 1997.
- [3] International Standard Organization for Switzerland, Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full, ISO, Switzerland, 1980.

- [4] R.W. Davis, G.E. Mattingly, "Numerical Modeling of Turbulent Flow through thin Orifice Plates", National Bureau of Standards Special Publications 484, Proceedings of the Symposium on Flow in Open Channels and Closed Conduits held at NBS, Gaithersburg, MD, February 23-25, 1977, pp. 491-522.
- [5] A. Abou El-Azm Aly, A. Chong, F. Nicolleau, S. Beck, "Experimental study of the pressure drop after fractal-shaped orifices in turbulent pipe flows", *Exp. Therm. Fluid Sci*, Vol. 34, No. 1, 2010, pp. 104–111.
- [6] D. Hurst, J.C. Vassilicos, "Scalings and decay of fractal-generated turbulence", *Phys. Fluids*, Vol. 19, No. 3, 2007, pp 0351031-03510331 .
- [7] R.E. Seoud, J.C. Vassilicos, "Dissipation and decay of fractal-generated turbulence", *Phys. Fluids*, Vol. 19, No. 10, 2007, pp 1051082-10510811.
- [8] T.A. Jankowski, E.N. Schmierer, F.C. Prenger, S.P. Ashworth, "A series pressure drop representation for flow through orifice tubes", *J. Fluids Eng*, Vol. 130, No. 5, 2008, pp. 051201–051204.
- [9] R.W. Davis, G. E. Mattingly, "Numerical Modelling of Turbulent Flow Through Thin Orifice Plates", Proceedings of the Semp. on Flow in Open Channels and Closed Conduits Held at NBS, 1977, pp. 23-25.
- [10] T. Tunay, "Investigation of Laminar and Turbulent Flow Characteristics through Orifice with Variable Thicknesses", MSc. Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, 2002.
- [11] T. Tunay, B. Sahin, H. Akıllı, "Investigation of Laminar and Turbulent Flow Through an Orifice Plate Inserted in a Pipe", *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 28, No. 2, 2004, pp 403-414.
- [12] E. Smith, R. Artit, P. Somravysin, "Numerical investigation of turbulent flow through a circular orifice", *KMITL Sci. Technol. J*, Vol. 18, No. 1, 2008, pp. 8-23.
- [13] G.H. Nail, A Study of 3-Dimensional Flow Through Orifice Meters, Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, 1991.
- [14] J.A. Filho, A.C. Santos, M. A. Navarro, E. Jordão, "Effect of chamfer geometry on the pressure drop of perforated plates with thin orifices", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 284, 2015, pp. 74– 79.
- [15] B. Oliver, L. Peter, T. Karsten, "Reynolds number dependence of an orifice plate", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 30, 2013, pp. 123– 132.
- [16] H. Shanfang, M. Taiyi, W. Dong, L. Zonghu, "Study on discharge coefficient of perforated orifices as a new kind of flowmeter", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 46, 2013, pp. 74– 83.
- [۱۷] م. صنیعی نژاد، مبانی جریان‌های آشفته و مدل‌سازی آن‌ها (از مفاهیم مقدماتی تا اصول کاربردی)، انتشارات دانش نگار، ۱۳۸۸.
- [18] American Society of Mechanical Engineers, Performance Test Codes, Flow Measurement, Section 4-orifice meters, ASME PTC 19.5, 2004.