

بهینه‌سازی هندسه یک راکتور کاویتاسیونی با استفاده از CFD جهت استفاده در سیستم پیش تصفیه لجن ثانویه فاضلاب شهری ورودی به هاضم بی‌هوازی

الهه عباسی^{۱*}، محمدهادی شفایی^۲، سولماز سعادت^۳، ایوب کریمی جشنی^۴، محمدمهدی علیشاهی^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه شیراز

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه شیراز

۳- استادیار، مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه شیراز

۴- دانشیار، مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه شیراز

۵- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

*elaheabasi23@gmail.com

ارسال: بهمن ماه ۹۷ پذیرش: بهمن ماه ۹۷

چکیده

با توجه به کاربرد کاویتاسیون هیدرودینامیکی در سیستم‌های تصفیه فاضلاب، رنگ زدایی، امولسیون روغن‌ها و ... در این مقاله به بهینه‌سازی یک راکتور کاویتاسیونی پرکاربرد (اوریفیس) با استفاده از محاسبات عددی (CFD) پرداخته شده است. هر یک از کاربردهای فوق نیازمند یک نوع از مکانیزم کاویتاسیونی و یک عدد کاویتاسیون مشخص می‌باشند. بنابراین در این مقاله با هدف دستیابی به یک عدد کاویتاسیون مشخص در سیستم، ابتدا رابطه‌ای برای ضریب تخلیه جریان سیال غیرنیوتنی عبوری از اوریفیس بدست آمد. سپس با استفاده از کد فرترن برای یک منحنی پمپ مشخص، سطح مقطع گلوگاه برای اوریفیس تعیین شد. در این مقاله یک اوریفیس برای انجام عمل پیش تصفیه لجن ثانویه هاضم بی‌هوازی طراحی شد. عدد کاویتاسیون مطلوب جهت عمل پیش تصفیه ۰/۲ می‌باشد بنابراین مطابق با پمپ مورد استفاده در سیستم، اوریفیسی با قطر گلوگاه ۱۰/۶ میلیمتر و فشار ورودی ۳/۱ بار بدست آمد.

کلمات کلیدی: کاویتاسیون هیدرودینامیکی، اوریفیس، ضریب تخلیه، سیال غیرنیوتنی، Fortran Code، CFD

۱- مقدمه

پدیده کاویتاسیون را تشکیل، رشد و اضمحلال حباب‌های موجود در مایع تعریف می‌کنند. حباب‌های ریز درون مایع زمانی که فشار به فشار بخار برسد تشکیل می‌شوند. این حباب‌ها پس از تشکیل در اثر تغییر فشار، رشد کرده و پس از آن که به سائز بحرانی رسیدند، متلاشی می‌شوند [۱]. در اثر این اضمحلال شدید، شرایطی با فشار بیش از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال و دمای حدود چند هزار کلوین ایجاد می‌شود [۲]. کاویتاسیون هیدرودینامیکی با تغییر در فشار جریان سیال در هنگام عبور از یک هندسه تولید

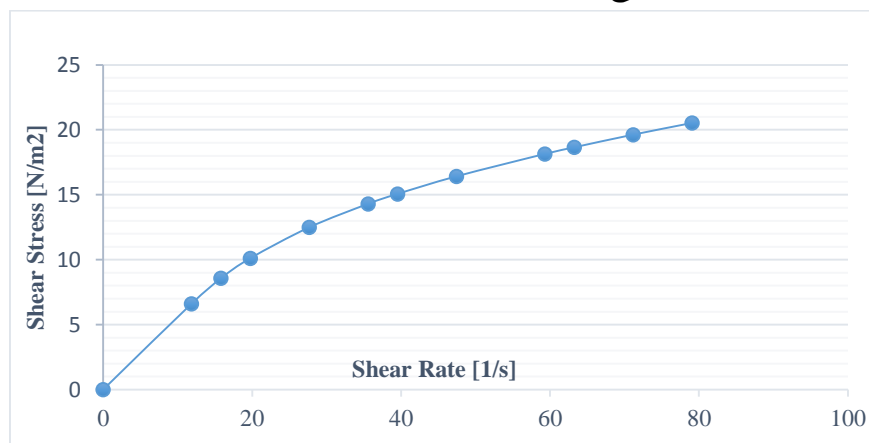
می‌شود. این افزایش بسیار زیاد دما و فشار در اثر اضمحلال حباب‌ها سبب شکستن پیوندهای شیمیایی، متعاقباً تسریع واکنش‌های شیمیایی و تصفیه فاضلاب می‌شود. به علاوه از این پدیده می‌توان جهت ساییدن و تمیز کردن سطوح نیز استفاده کرد. کائیتاسیون هیدرودینامیک نسبت به کائیتاسیون آکوستیک، در زمینه مصرف انرژی و نیز امکان بالا بردن مقیاس برتری دارد. کائیتاسیون هیدرودینامیک می‌تواند توسط هموجنایزر با فشار زیاد، هموجنایزر با سرعت بالا، اوریفیس و نازل‌های همگرا - واگرا ایجاد شود [۱].

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه کاربردهای مختلف کائیتاسیون هیدرودینامیک انجام گرفته است. نیما حبشی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی اثر کائیتاسیون هیدرودینامیک با راکتور اوریفیس، بر روی پیش تصفیه هضم ترکیبی فاضلاب روغنی و لجن ثانویه پرداختند و نشان دادند متان تولیدی به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد و این مسئله نشان‌گر بازدهی بالای راکتور کائیتاسیونی در زمینه تجزیه لجن فاضلاب می‌باشد [۳]. سیواکومار و پندیت (۲۰۰۲) با استفاده از اوریفیس‌های کائیتاسیونی چند سوراخی، به بررسی تجزیه‌پذیری رنگ کاتیونی رودامین ب پرداختند. نتیجه گرفتند که این روش، به طور موثری سبب بهبود تجزیه رنگ می‌شود [۴]. دانگ و همکاران (۲۰۱۵) به طور آزمایشگاهی، سیستمی شامل ونتوری و اوریفیس با سوراخ‌های مثلثی طراحی کردند و اثر کائیتاسیون بر روی تجزیه آلاینده‌های هیدروفوبیک و هیدروفیلک را مورد بررسی قرار دادند و توانستند با این روش به درجه تجزیه بالایی دست یابند [۵].

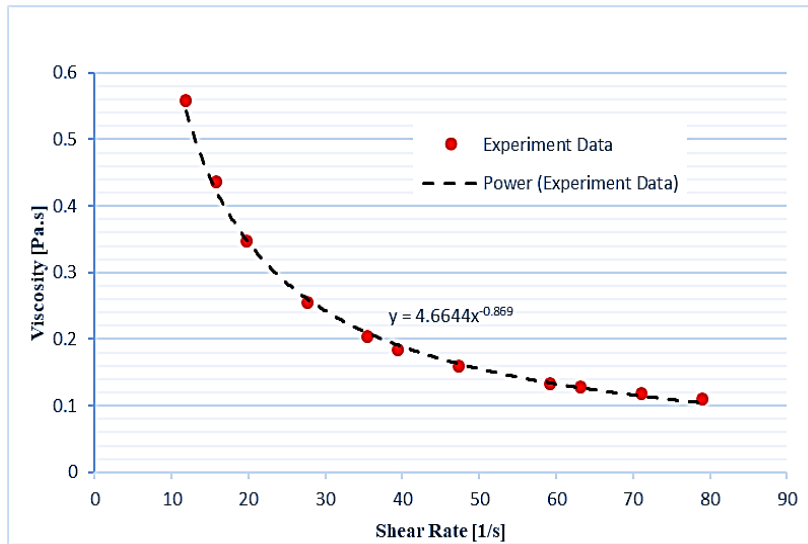
بررسی پژوهش‌های انجام شده پیشین، نشان داد که روش هیدرودینامیکی تا حدود بسیار بالایی می‌تواند سبب تسریع واکنش‌ها در کاربردهای گوناگون شود. بنابراین مسئله بهینه بودن هندسه راکتور کائیتاسیونی، مهم‌ترین چالش پیش‌رو برای کاهش هزینه‌ها و زمان عملکرد سیستم می‌باشد. از آن‌جا که هر یک از کاربردهای کائیتاسیون بر اساس یک عدد کائیتاسیون مشخص بازدهی بالاتری دارند، در این پژوهش با هدف تجزیه لجن ثانویه فاضلاب به عنوان روش پیش تصفیه هاضم بی‌هوازی، عدد کائیتاسیون مناسب ۰/۲ انتخاب شد و طراحی بر اساس آن صورت گرفت.

۲- سیال غیرنیوتنی لجن

آزمایشات رئولوژی بر روی سیال لجن مورد نظر در این پژوهش، توسط دستگاه ویسکومتر Brookfield DV-II+Pro انجام شد. از نتایج حاصله، مشخص شد که تغییرات تنش برشی و نرخ کرنش بصورت غیرخطی می‌باشد (شکل ۱). با توجه به نمودار شکل ۱ مشخص است که سیال غیرنیوتنی از نوع Pseudoplastic (شبه پلاستیک) می‌باشد. در این نوع سیالات شیب نمودار تنش بر حسب کرنش برشی (لزجت) به تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۱- تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ کرنش سیال غیرنیوتنی لجن



شکل ۲- تغییرات ویسکوزیته برحسب نرخ کرنش سیال غیرنیوتنی لجن

همچنین نمودار لزجت برحسب نرخ کرنش برشی سیال در شکل ۲ آورده شده است. نهایتاً رفتار لزجت سیال غیرنیوتنی، توسط یک معادله توانی ساده بصورت رابطه (۱) جهت استفاده در نرم افزار فلونت بیان شد.

$$\mu = 4.6644 \dot{\gamma}^{-0.869} \quad (1)$$

در این رابطه μ ضریب لزجت برحسب Pa.s و $\dot{\gamma}$ نرخ تنش برشی بر حسب 1/s می باشد.

۳- مدل سازی عددی کاویتاسیون

جهت مدل سازی عددی کاویتاسیون از نرم افزار ANSYS-Fluent 15.0 استفاده شده است. این نرم افزار یکی از قدیمی ترین و بهترین نرم افزارهای تجاری تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی می باشد و بیش از یک دهه است که امکان تحلیل کاویتاسیون در جریان دوفازی به قابلیت های آن اضافه شده است. تحلیل عددی مذکور در مرکز محاسبات دانشکده مهندسی بخش راه، ساختمان و محیط زیست دانشگاه شیراز انجام شد. سیستم مورد استفاده دارای مشخصات زیر می باشد:

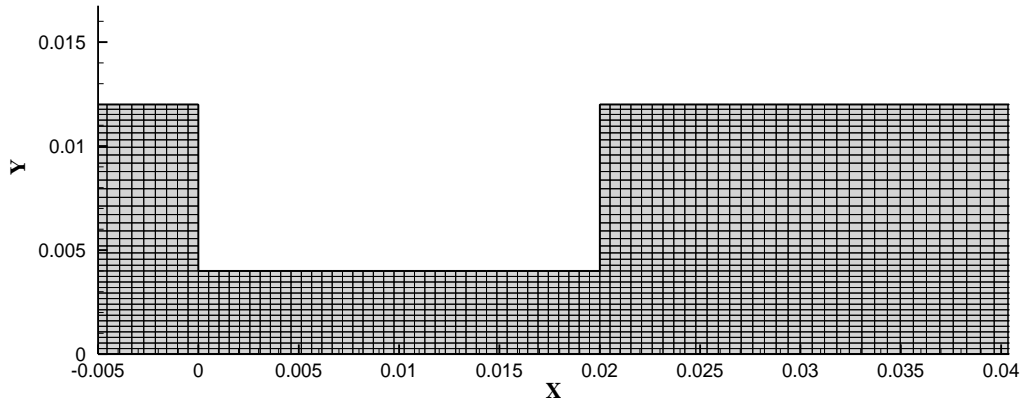
Processor: Intel® Core™ i7-3770 CPU (3.40 GHz, up to 3.90 GHz)
Memory (RAM): 32.0 GB

تحلیل جریان بصورت متقارن محوری انجام شد. جهت تحلیل کاویتاسیون از روش Mixture، در مدل سازی جریان چندفازی استفاده شد. همچنین در این پژوهش روش شبیه سازی کاویتاسیون Schnerr-Sauer با مدل توربولانسی Realizable k-ε به کار رفته است. شرایط مرزی بصورت جدول ۱ تعریف شده اند.

جدول ۱- شرایط مرزی استفاده شده در نرم افزار فلونت

Pressure inlet	ورودی
Pressure Outlet	خروجی
Wall	دیواره
Axis	محور تقارن

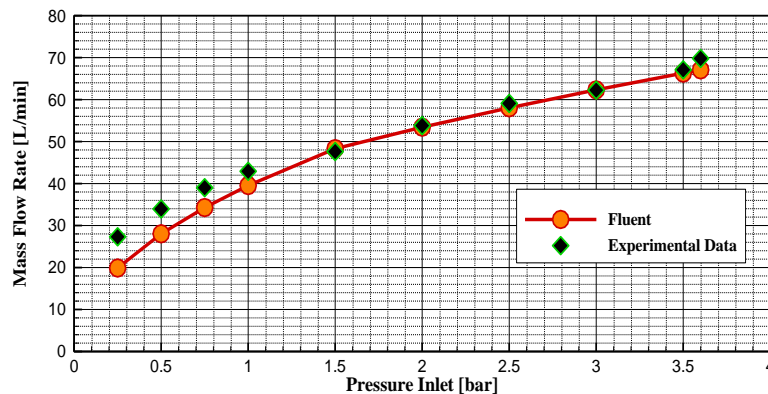
همانطور که در قسمت قبل ذکر شد، سیال در نرم افزار بصورت غیرنیوتنی در نظر گرفته شد. هندسه راکتور با قطر ورودی ۲۴ میلیمتر، طول ورودی ۸۰ میلیمتر و طول خروجی ۲۳۰ میلیمتر می باشد. شکل ۳ نشان دهنده شبکه بندی میدان جریان سیال می باشد.



شکل ۳- شبکه بندی میدان جریان

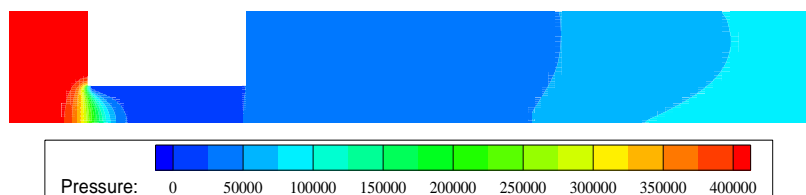
۴- صحت سنجی حل عددی

با انجام تست هیدرودینامیکی بر روی اوریفیس با ابعاد بیان شده در قسمت قبل، دبی اوریفیس در فشارهای ورودی مختلف اندازه گیری شد. آزمایش ها در آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه شیراز انجام شد. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با نتایج حاصل شده از نرم افزار فلوئنت مقایسه شد. شکل ۴ نمودار صحت سنجی نرم افزار را نشان می دهد. دلیل اختلاف داده ها در فشارهای پایین، این است که مدل استفاده شده در نرم افزار با فرض وقوع پدیده کاویتاسیون انتخاب شده است. در فشارهای پایین پدیده کاویتاسیون رخ نمی دهد، بنابراین انتظار می رود که این مدل در فشارهای ورودی کم، نتواند تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

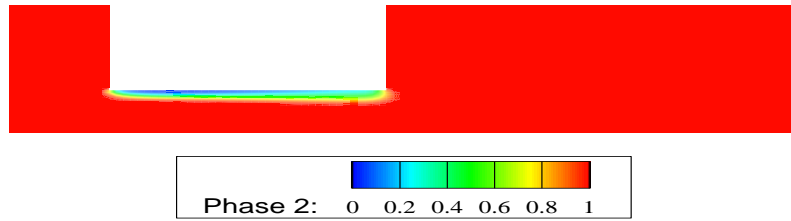


شکل ۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

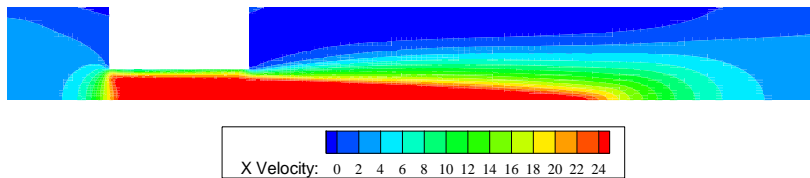
شکل ۵ کانتور فشار در اریفیس برای حالت فشار ورودی ۳/۶ بار را نشان می دهد. نحوه افت فشار در گلوگاه اوریفیس در این شکل قابل مشاهده است. شکل ۶ نشان دهنده کانتور فاز در اوریفیس است. مشخص است که ناحیه تشکیل کاویتاسیون، تنها محدود به قسمت کوچکی از گلوگاه است. شکل ۷ کانتور سرعت در جهت محور تقارن اریفیس را نشان می دهد. افزایش سرعت در گلوگاه و ناحیه مرده در قسمت بعد از انبساط در این شکل به وضوح دیده می شود.



شکل ۵- کانتور فشار در اوریفیس برای حالت فشار ورودی ۳/۶ بار (اعداد برحسب پاسکال)



شکل ۶- کانتور فاز برای حالت فشار ورودی ۳/۶ بار (رنگ آبی: فاز بخار - رنگ قرمز: فاز مایع)



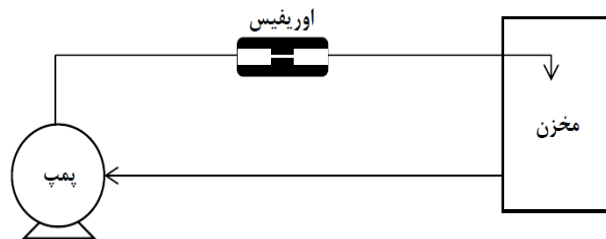
شکل ۷- کانتور سرعت در جهت محور اوریفیس برای حالت فشار ورودی ۳/۶ بار (اعداد برحسب متر بر ثانیه)

۵- بهینه سازی هندسه راکتور کائیتاسیونی اوریفیس

همانطور که در قسمت‌های گذشته ذکر شد، هندسه بهینه برای اوریفیس حالتی است که عدد کائیتاسیون خاصی را تامین می‌کند تا به منظور فرآیندهای هیدرودینامیکی مختلف بکار گرفته شود. معمولاً عدد کائیتاسیون بصورت زیر تعریف می‌شود [۶].

$$\sigma = \frac{P_e - P_{th}}{0.5 \rho V_{th}^2} \quad (2)$$

در معادله (۲)، σ عدد کائیتاسیون، p_e فشار خروجی و p_{th} فشار گلوگاه برحسب Pa و ρ چگالی برحسب kg/m^3 و V_{th} سرعت در گلوگاه اوریفیس برحسب m/s می‌باشد. با توجه به نحوه کاربرد راکتور کائیتاسیون اوریفیس در سیستم‌های مختلف و چگونگی تامین فشار جهت ایجاد گرادیان فشار، تعیین هندسه بهینه متفاوت می‌باشد. معمولاً تامین گرادیان فشار با استفاده از یک پمپ هیدرولیکی یا یک مخزن تحت فشار انجام می‌شود. در شکل ۸ نحوه کاربرد اوریفیس، در پژوهش حاضر نشان داده شده است که در این سیستم، گرادیان فشار توسط یک پمپ هیدرولیکی، تامین می‌شود.



شکل ۸- کاربرد اوریفیس در سیستم

بنابراین علاوه بر عدد کائیتاسیون، مشخصات پمپ، جزء معلومات دیگر مسئله می‌باشد. معمولاً منحنی پمپ، نشان‌دهنده هد پمپ در دبی‌های مختلف می‌باشد. می‌توان یک تابعی بصورت زیر به منحنی پمپ موردنظر برازش کرد.

$$H = f(Q_{actual}) \quad (3)$$

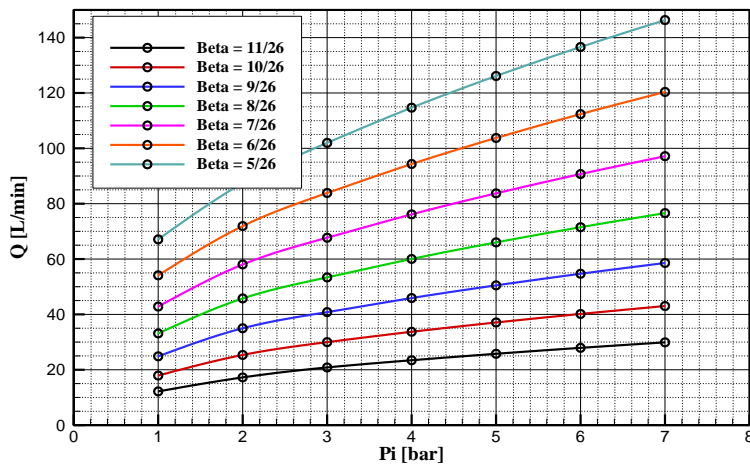
که H هد پمپ می‌باشد. مقدار Q_{actual} در رابطه (۳) همان دبی حجمی واقعی گذرنده از اوریفیس می‌باشد و با مقدار ایده‌آل آن که متفاوت است. معمولاً نسبت بین دبی واقعی و دبی ایده‌آل بصورت یک ضریب تخلیه C_d بیان می‌شود که در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$Q_{actual} = C_d Q_{ideal} \quad (4)$$

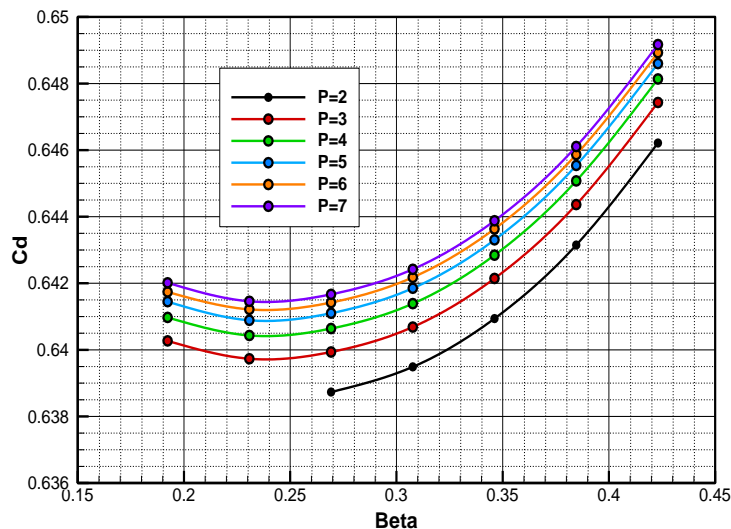
روابط مربوط به ضریب تخلیه اوریفیس در حالتی که در اوریفیس کاویتاسیون رخ ندهد در مقالات [۷] و کتب سیالات وجود دارد. اما بررسی‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که در صورتی که جریان موجود در اوریفیس شامل کاویتاسیون باشد، روابط سیالاتی دیگر کاربردی ندارند [۸]. بنابراین رابطه‌ای برای C_d بوسیله تست‌های مختلف CFD بدست آمد. لازم به ذکر است که در مدلسازی‌های انجام شده، علاوه بر پوشش ناحیه کاویتاسیون، سیال بصورت غیرنیوتنی در نظر گرفته شده است. این امر ۴۹ آزمایش در بازه تغییرات نسبت قطر گلوگاه به قطر ورودی ($0.19 \leq \beta \leq 0.42$) و فشار ورودی $1 \leq P_i \leq 7$ بار انجام شد (قطر ورودی ۲۶ میلیمتر در نظر گرفته شد). مقدار دبی محاسبه شده توسط نرم‌افزار در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به فشار ورودی و رخ دادن کاویتاسیون در گلوگاه، مقدار دبی طبق معادله برنولی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Q_{ideal} = \sqrt{\frac{P_{0i} - P_{0e}}{0.5\rho} A_{0e}} \quad (5)$$

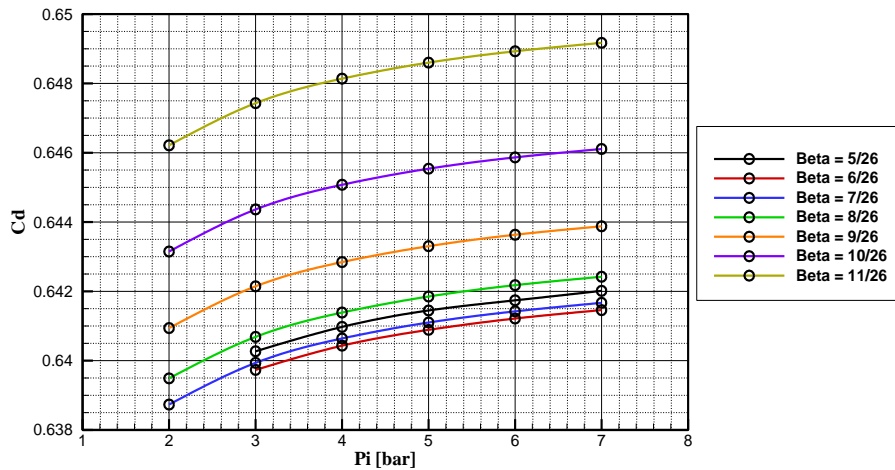
البته واضح است که مقدار دبی در رابطه فوق به علت وجود اصطکاک در دیواره مجرا و برقرار نبودن شرط معادله برنولی با دبی واقعی اختلاف دارد. هدف اصلی، تعیین میزان اختلاف آن می‌باشد که با محاسبه ضریب تخلیه، میزان اختلاف تعیین می‌شود. با توجه به نتایج نوماچی [۸] و نتایج حاصل از ۴۹ آزمایش عددی، تغییرات ضریب تخلیه در حالتی که کاویتاسیون رخ نمی‌دهد، زیاد می‌شود بنابراین آزمایش‌هایی که منجر به تشکیل کاویتاسیون نمی‌شوند، حذف شدند. مقدار ضریب تخلیه بوسیله نتایج عددی و رابطه فوق در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۹- منحنی‌های تغییرات دبی بر حسب فشار برای نسبت β های مختلف



شکل ۱۰- منحنی‌های تغییرات ضریب تخلیه بر حسب نسبت β برای فشارهای مختلف



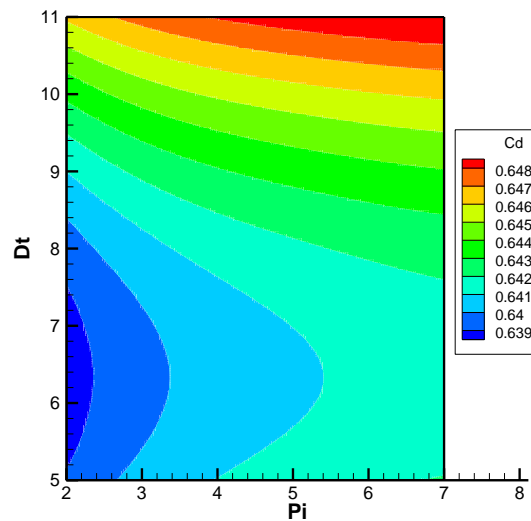
شکل ۱۱- منحنی‌های تغییرات ضریب تخلیه برحسب فشار ورودی برای نسبت β های مختلف

سپس با استفاده از روش حداقل مربعات معادله‌ای به فرم زیر برای ضریب تخلیه بدست آمد.

$$C_d = \alpha_1(P_i - 5)^4 + \alpha_2(P_i - 5)^3 + \alpha_3(P_i - 5)^2 + \alpha_4(P_i - 5) + \alpha_5\beta^2 + \alpha_6\beta + \alpha_7 \quad (6)$$

ضرایب معادله فوق بصورت زیر می‌باشند. کانتور شکل ۱۲ نمایشی از معادله فوق می‌باشد.

$$\begin{cases} \alpha_1 = -0.0000046066 & \alpha_2 = 0.0000134035 & \alpha_3 = -0.0000538898 \\ \alpha_4 = 0.0003799294 & \alpha_5 = 0.2384786040 & \alpha_6 = -0.1161488692 \\ \alpha_7 = 0.6549967431 \end{cases} \quad (7)$$



شکل ۱۲- ضریب تخلیه سیال غیرنیوتنی در اوریفیس برحسب فشار ورودی و قطر گلوگاه

با استفاده از کاربرد معادله برنولی در نقاط ورودی و گلوگاه ونتوری و تعریف عدد کاویتاسیون می‌توان معادله زیر را نوشت.

$$P_i = P_{ik} + \frac{P_t - P_{ik}}{\sigma} \left(1 - \left(\frac{A_{ik}}{A_i} \right)^2 \right) \quad (8)$$

در رابطه فوق A_{ik} مساحت گلوگاه اوریفیس و A_i مساحت ورودی اوریفیس برحسب m^2 می‌باشد. مساحت ورودی برابر با مساحت خروجی پمپ در نظر گرفته شد تا از وجود هرگونه انقباض یا انبساط جریان قبل از اوریفیس جلوگیری شود. فشار خروجی برابر فشار اتمسفر (۰/۸۵ بار در شیراز) و فشار در گلوگاه، با توجه به وقوع کاویتاسیون، برابر فشار بخار اشباع در نظر

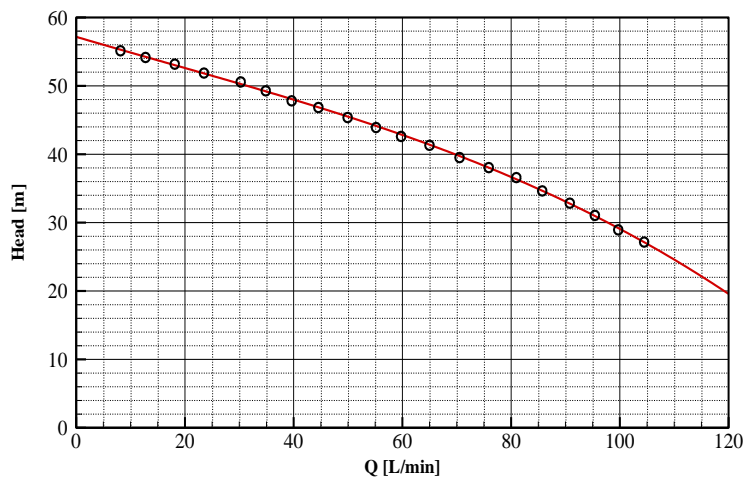
گرفته شد. با استفاده از روابط (۲) تا (۸) می توان مقدار مشخصی برای A_{th} تعیین کرد. به علت ماهیت غیرخطی معادلات لازم است حل با استفاده از روش های عددی تکراری انجام شود. بدین منظور یک کد Fortran تهیه شد.

۶- نتایج

در این قسمت یک نمونه طراحی هندسه بهینه اوریفیس با توجه به روش بیان شده در قسمت قبل، انجام می شود. همانطور که قبلا اشاره شد، در روش ارائه شده در این پژوهش، طراحی هندسه براساس نوع پمپ صورت می گیرد. پمپ در نظر گرفته شده، پمپ سانتریفیوژ LEO-ECH(m)4-60 می باشد. منحنی عملکرد این پمپ در شکل زیر نشان داده شده است.

با استفاده از نرم افزار Plot Digitizer (version 2.0) نقاط این منحنی استخراج شد و معادله ای بصورت زیر برای آن به دست آمد.

$$H = -0.0012 Q^2 - 0.1546 Q + 56.243 \quad (9)$$



شکل ۱۳- منحنی عملکرد پمپ LEO-ECH(m)4-60

با استفاده از معادله منحنی پمپ و روابط بیان شده در قسمت قبل مساحت گلوگاه مورد نظر تعیین شد. داده های ورودی و خروجی در جدول ۲ آورده شده اند. خروجی پمپ (ورودی اوریفیس) لوله یک اینچی می باشد که قطر داخلی آن ۲۶ میلی متر می باشد.

جدول ۲- اطلاعات مربوط به راکتور اوریفیس طراحی شده

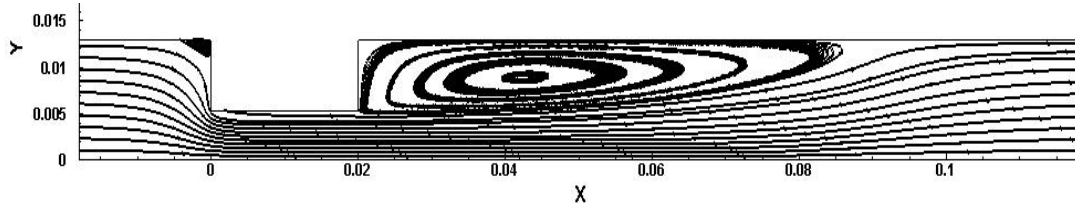
۴۰°C	دما	۹۵/۳۲۵ L/min	دبی
۷۴۲۴/۶۱ pa	فشار بخار آب	۳/۱ bar	فشار ورودی
۲۶ mm	قطر ورودی	۲۷/۸۸ m/s	سرعت گلوگاه
۰/۲	عدد کاوناسیون	۰/۶۴۶۲۰۵	ضریب تخلیه
$\mu = 4.6644 \gamma^{-0.869}$	لزجت	۱۰/۵۹۶ mm	قطر گلوگاه
۰/۸۵ bar	فشار خروجی اوریفیس (فشار اتمسفر)		

حال اطلاعات مربوط به هندسه طراحی شده، با استفاده از نرم افزار فلوئنت صحت سنجی شد. نتایج حاصل شده در جدول ۳ مقایسه شده اند.

جدول ۳- مقایسه نتایج فلونت و هندسه طراحی شده

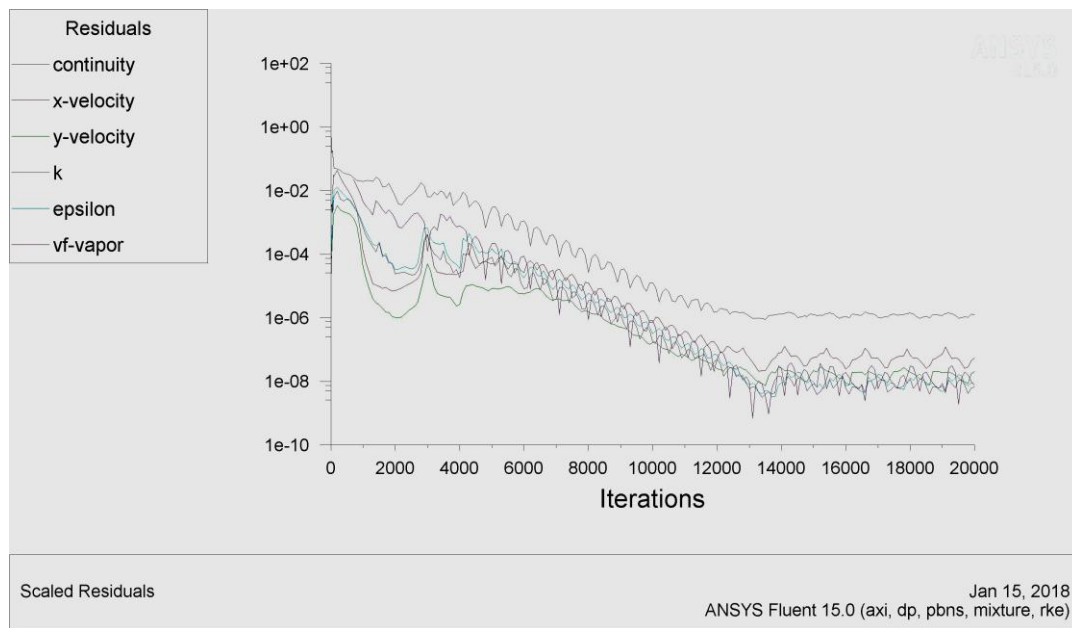
درصد خطا	نتایج حاصل شده از فلونت	نتایج حاصل شده از کد طراحی	
۰/۳۹	۹۵/۷۰۱ L/min	۹۵/۳۲۵ L/min	دبی
۰/۲۵	۲۷/۸۱ m/s	۲۷/۸۸ m/s	سرعت گلوگاه
۰/۰۰۴۱	۰/۶۴۶۱۷۸	۰/۶۴۶۲۰۵	ضریب تخلیه
۰/۵۰	۰/۲۰۱	۰/۲۰۰	عدد کاویتاسیون

زمان همگرایی این آزمایش توسط فلونت ۱۰ دقیقه است. شکل خطوط جریان در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. گردابه بزرگ بعد از گلوگاه در این شکل بوضوح قابل مشاهده است.



شکل ۱۴ - خطوط جریان گذرنده از اوریفیس

نمودار همگرایی آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵ - منحنی همگرایی تست فلونت

زمان همگرایی برای کد طراحی کمتر از یک ثانیه است. کد در ۱۰ تکرار تا دقت مرتبه 10^{-15} همگرا شد.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش طراحی هندسه بهینه اوریفیس به عنوان یک راکتور کاویتاسیونی با عدد کاویتاسیون مطلوب ۰/۲ جهت کاربرد در پیش تصفیه لجن ثانویه ورودی هاضم بی‌هوازی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از شبیه سازی عددی (CFD)، رابطه‌ای برای ضریب تخلیه اوریفیس با غیرنیوتونی در نظر گرفتن سیال عبوری (لجن) به دست آمد. از آنجا که گرادیان فشار سیستم مورد نظر توسط پمپ هیدرولیکی تامین می‌شود، منحنی عملکرد پمپ در طراحی حائز اهمیت است. با استفاده از رابطه بدست آمده برای ضریب تخلیه اوریفیس با سیال غیر نیوتنی، معادلات برنولی و منحنی پمپ می‌توان مشخصات مورد نظر برای اوریفیس

را بدست آورد. جهت حل همزمان معادلات کوپل شده مذکور از یک حل عددی بازگشتی توسط کد فرترن استفاده شد. نهایتاً برای اوریفیس با عدد کاویتاسیون ۰/۲ و پمپ (LEO-ECH(m)4-60) فشار ورودی ۱/۳ بار، دبی ۹۵/۳ لیتر بر دقیقه، ضریب تخلیه ۰/۶۴ و قطر گلوگاه ۱۰/۶ میلیمتر به دست آمد.

۸- مراجع

1. Chavan, K. et al. (2015) 'Numerical Optimization of converging diverging miniature cavitating nozzles', Journal of Physics: Conference Series, 656, p. 12138. doi: 10.1088/1742-6596/656/1/012138.
2. Petkovšek, M. et al. (2013) 'Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment', Separation and Purification Technology, 118, pp. 415-423. doi: 10.1016/j.seppur.2013.07.029.
3. Habashi, N. et al. (2016) 'Hydrodynamic cavitation as a novel approach for pretreatment of oily wastewater for anaerobic co-digestion with waste activated sludge', Ultrasonics Sonochemistry. Elsevier B.V., 31, pp. 362-370. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.022.
4. Sivakumar, M. and Pandit, A. B. (2002) 'Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique.', 9, pp. 123-131.
5. Dong, Z. and Zhang, Z. (2015) 'Effects of Triangular Multi-Orifice Plates With Venturi Tube on Degradation of Hydrophilic and Hydrophobic Mixing Pollutants', E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June - 3 July, 2015, (1993), pp. 1-6.
6. Ozonk, J. (2012) Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering. doi: 10.1201/b11825.
7. Spitzglass, J. M. (1922) Orifice Coefficients: Data and Results of Tests. American Society of Mechanical Engineers.
8. Numachi, F., Yamabe, M. and Oba, R. (1960) 'Cavitation Effect on the Discharge Coefficient of the Sharp-Edged Orifice Plate', Journal of Basic Engineering, 82(1), p. 1. doi: 10.1115/1.3662523.