به نام ایزد یکتا

بولتن فنی شرکت میراب (1396)، شماره 3

MIRAB TECHNICAL BULLETIN (3)

استفاده از علم CFD در شبیه‌سازی شیرآلات صنعتی

مقدمه

امروزه با ورود هر فنّاوری جدید به عرصه حیات بشری، شاهد تأثیرات متناسب بسیاری در ابعاد مختلف زندگی جوامع انسانی هستیم. به‌گونه‌ای که گاهاً وسعت این تأثیرات آن‌قدر زیاد است که بدون یادگیری و تسلط بر این فنّاوری، امکان رشد و پیشرفت جامعه بشری محدود و چه بسا ناشناخته خواهد ماند. علاوه بر این، تأثیر برخی از این فنّاوری‌های جدید به شکلی است که تعامل بین دانش‌های از پیش تعیین شده را قوی‌تر کرده است. نمونه‌ای از مهم‌ترین این فنّاوری‌ها، استفاده و بکارگیری نرم‌افزارهای مرتبط با آن‌ها است. ورود رایانه به عرصه علم و دانش، انجام محاسباتی که زمانی برای یک محقق، دانشمند، مهندس و سایر کاربران یک رؤیا و آرزوی دست‌نیافتنی بود، امکان‌پذیر ساخت و حل مسائلی که تا آن زمان ممکن بود سال‌ها به طول انجامد را در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با هزینه بسیار کم میسر نمود.

ورود رایانه به حوزه علم مکانیک سیالات، مفهومی را به نام دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)[1] ایجاد نموده است که هم اکنون عمری بیش از 50 سال دارد و به‌عنوان یک واحد درسی تحصیلات تکمیلی در دانشگاه‌ها تدریس می‌گردد. این شاخه از علم توانست مسائل و مشکلات پیچیده‌ای را در صنایع مهندسی از جمله صنعت مهندسی مکانیک به کمک شبیه‌سازی عددی، تحلیل و اتفاقات و پدیده‌های ناشناخته یا کمتر شناخته شده را با هزینه و زمان کم و دقت بالا پیش‌بینی نماید. در نتیجه استفاده از این تخصص و یادگیری جنبه‌های مختلف آن از ضروریات صنایع مهندسی با تکنولوژی بالا قرار گرفت. امروزه این روش بعد از روش‌های تئوری و تجربی (آزمایشگاهی) به‌عنوان سومین روش در تحلیل مسائل دینامیک سیالات شناخته می‌شود و جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف مرتبط با دینامیک سیال و انرژی پیدا کرده است.

با پیشرفت علم دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و ظهور نرم‌افزارهای تجاری سازگار نظیر انسیس- فلوئنت[2]، سی- اف- ایکس[3]، استار- سی- دی[4]، فایر[5] و ... علاقه‌مندی بخش‌های تحقیقاتی صنایع به استفاده از این ابزار مفید بیشتر و بیشتر شده است. تا جایی که قبل از ساخت و آزمایش محصولات، ابتدا با مدل‌سازی و شبیه‌سازی آن‌ها، رفتارهای عملکردی قطعات، نقاط ضعف و قوت محصول و همچنین پدیده‌های مختلف حرارت و سیالاتی و ... را شناسایی و برای حل مشکلات راه حل‌هایی را پیش‌بینی می‌نمایند. شرکت میراب نیز با تکیه بر دانش فنی و تجربیات گذشته خود در طراحی و ساخت انواع شیرآلات صنعتی در ابعاد و فشارهای مختلف، جهت پیشبرد اهداف صنعتی و تحقیقاتی، بهینه‌سازی محصولات تولیدی و تولید محصولات جدید و با کیفیت، اقدام به بکارگیری از این شاخه علمی و استفاده از نرم‌افزارهای بروز، برای شبیه‌سازی نموده است. در ادامه به اختصار به برخی از فعالیت‌های مرتبط با این حوزه پرداخته خواهد شد.

---

[1] Computational Fluid Dynamics
[2] ANSYS-FLUENT
[3] CFX
[4] STARCD
[5] FIRE

اصول کلی در شبیه‌سازی شیرهای صنعتی

به‌طور کلی برای انجام یک شبیه‌سازی عددی یا نرم‌افزاری موفق که با کمترین خطای محاسباتی و نرم‌افزاری همراه باشد، سه گام مهم و اساسی می‌بایست درنظر گرفته شود که این سه گام عبارتند از مدل‌سازی هندسی[۶]، شبکه‌بندی مدل هندسی[۷] و در نهایت تنظیمات و اجرای عملکرد صحیح نرم‌افزار. در فرایند شبیه‌سازی سیالاتی شیرهای صنعتی، این گام‌های سه‌گانه نیز ملزومات و ضروریاتی دارند که مطابق توضیحات زیر باید به آنها توجه ویژه داشت:

(الف) مدل‌سازی هندسی

در مدل‌سازی هندسی یک شیر صنعتی نکات فنی زیر توصیه می‌شود:

- هندسه اصلی شیر، شامل بدنه و عضو مسدود کننده سیال با دقت ابعادی کافی در یک نرم‌افزار مدل‌سازی به شکلی سه‌بعدی ساخته شود.
- ناحیه ورودی و خروجی شیر نیز بسته به نوع کاربرد و تحلیل* عملکرد شیر، مدل‌سازی شده و به مدل شیر اصلی اضافه گردد.

* چنانچه فقط تحلیل عملکرد شیر مدنظر باشد، لازم است ناحیه ورودی و خروجی شیر با دو لوله با طول معین و به قطر ورودی شیر مجهز شود. لوله‌ها باید به اندازه کافی بلند باشند که اطمینان از توسعه یافتگی جریان سیال حاصل شود.

- لازم است در این مدل‌سازی‌ها از جزئیات غیر ضروری مانند آب‌بندها، پیچ و مهره‌ها، زوائد و گوشه‌ها با ابعاد بسیار کوچک در مقایسه با ابعاد اصلی شیر و ... صرف‌نظر شود تا از پیچیده شدن بیهوده مدل هندسی پرهیز گردد. این کار اجرای گام دوم شبیه‌سازی را تسهیل می‌سازد.

(ب) شبکه‌بندی مدل هندسی

در گام شبکه‌بندی مدل هندسی یک شیر صنعتی موارد زیر توصیه می‌گردد:

- با توجه به اینکه اغلب شیرهای مورد استفاده در صنعت آب، در رژیم مغشوش[۸] مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، لازم است یک مدل مناسب جریان آشفته برای گام سوم شبیه‌سازی آنها درنظر گرفته شود. یکی از مسائل مهم در شبیه‌سازی‌های جریان آشفته، خصوصاً در مواقعی که پدیده‌های نزدیک به دیواره دارای اهمیت است، حضور تعدادی کافی سلول در لایه مرزی، برای مشاهده گرادیان و پروفیل سرعت است. با توجه به گرادیان بالای سرعت در فواصل نزدیک به دیواره فارغ از نوع مدل آشفته، حداقل 10 الی 20 گره محاسباتی در راستای عمود بر سطح نیاز است. چنانچه از مدل آشفته $k-\omega$ یا هم‌خانواده آن در شبیه‌سازی استفاده شود توصیه می‌شود ارتفاع بی‌بعد اولین لایه گره‌های محاسباتی مجاور دیواره در حدود $y^+ < 5$ در نظر گرفته شود و چنانچه از مدل آشفته $k-\epsilon$ یا هم‌خانواده آن در شبیه‌سازی استفاده شود توصیه می‌شود حتما از توابع دیواره[۹] نیز در نزدیکی دیواره استفاده شود

---

[6] Geometry Modelling
[7] Mesh Generation
[8] Turbulent Regime
[9] Wall Functions

که در این حالت می‌توان از شرایط $5 \leq y^+ \leq 30$ نیز در شبکه‌بندی برای کاهش هزینه‌های محاسباتی استفاده نمود.

- برای تولید یک شبکه محاسباتی مناسب، بهتر است ابتدا صفحات و مرزهای نواحی محاسباتی شبکه‌بندی شده و سپس حجم سیال براساس تقیسمات سطوح و مرزها، شبکه‌بندی شود.

(ج) تنظیمات و اجرای صحیح نرم‌افزار

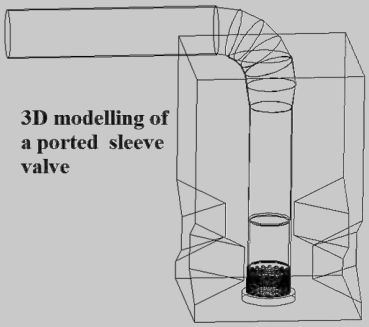
در تنظیمات و اجرای صحیح یک نرم‌افزار شبیه‌سازی برای تحلیل یک شیر صنعتی، توجه به موارد زیر توصیه می‌گردد:

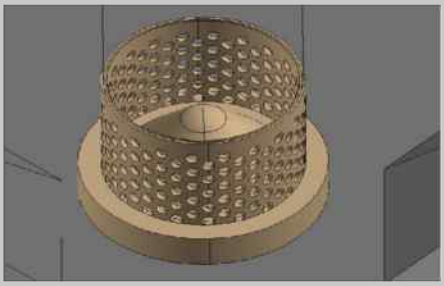
- درنظر گرفتن صحیح شرایط مرزی ورودی و خروجی سیال، شرایط دیواره، شرایط مرزی تقارن صفحه‌ای یا تقارن محوری و غیره.
- درنظر گرفتن تعداد فازهای درگیر در شبیه‌سازی مساله (نظیر فاز هوا، کاویتاسیون و فاز بخار، ذرات جامد و غیره).
- درنظر گرفتن بهترین مدل آشفته جریان.
- مدنظر قراردادن دائمی و غیردائمی بودن جریان سیال.
- مدنظر قراردادن شبکه‌های متحرک[10] در صورت وجود قطعات متحرک.

شبیه‌سازی شیرهای غلافی

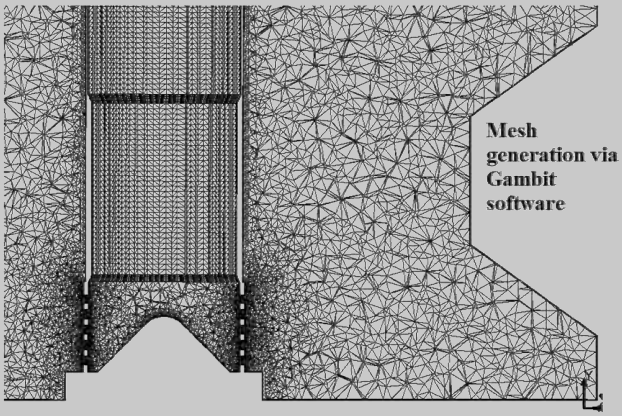
شیرهای غلافی[11] اغلب به‌عنوان شیر تخلیه یا شیر کنارگذر در انتهای خطوط انتقال و خروجی سدها و نیروگاه‌ها استفاده می‌شوند. در کنار شیرهای سوزنی[12] و مخروط ثابت[13]، شیر غلافی نیز به‌عنوان شیر مستهلک کننده انرژی، قطع و وصل و تنظیم در انتهای خطوط مخازن ذخیره آب، نقش بزرگی را به‌عهده دارد. با این شیر می‌توان مقدار عبوری سیال را به‌مدت طولانی ثابت نگاه داشت و یا در مواقع ضروری مانند وقوع سیلاب مقدار سیال عبوری از آن را زیاد نموده تا دیواره‌های سد تحت تنش کمتری قرار گیرند. از این‌رو لازم است ساختمان شیر در شرایط فوق برای جلوگیری از وقوع پدیده کاویتاسیون و در نتیجه ایجاد ارتعاشات و آسیب به ساختمان‌ها از طراحی هیدرولیکی مناسب و استحکام مکانیکی لازم برخوردار باشد. شکل 1، نمونه‌ای از مدل‌سازی و شبکه‌بندی یک شیر غلافی با قطعه مسدود کننده سوراخ‌دار[14] و شکل 2 نیز نمونه‌ای از مدل‌سازی و شبکه‌بندی یک شیر غلافی با قطعه مسدود کننده وی - شکل[15] را که در یک چاه مستهلک کننده انرژی جریان[16] تعبیه شده‌اند، نمایش می‌دهد. شکل‌های 3 و 4 نیز الگوی خروجی تحلیل نرم‌افزاری CFD را برای پارامترهای عبور جریان، سرعت سیال، فشار و توزیع تنش برشی در بخش‌های مختلف هر دو نوع شیر غلافی مذکور را که حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار انسیس-فلوئنت می‌باشد، نشان می‌دهد.

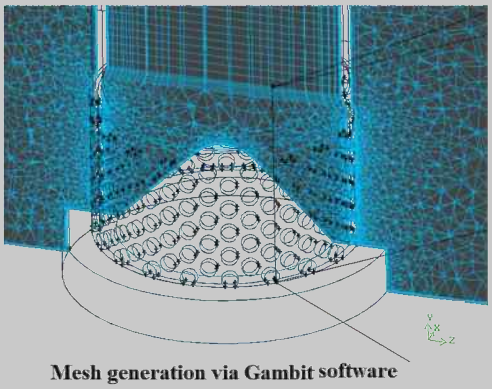
[10] Moving Mesh
[11] Sleeve Valves
[12] Plunger Valves
[13] Fixed Cone Valves
[14] Ported Sleeve Valve
[15] V-Type Opening Sleeve Valve
[16] Stilling Well





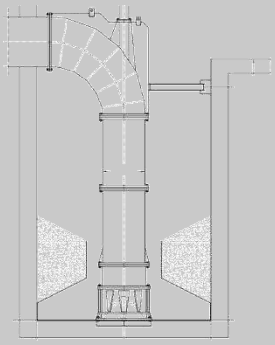
3D modelling of ported part



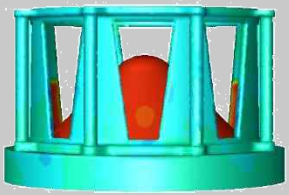


Mesh generation via Gambit software

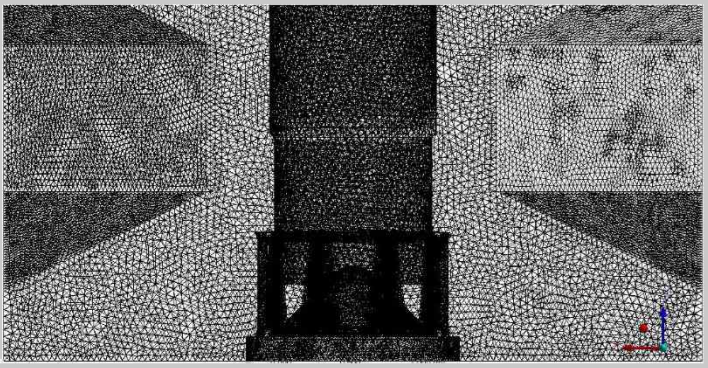
شکل 1 - نمونه‌ای از مدل‌سازی و شبکه‌بندی یک شیر غلافی با غلاف سوراخ‌دار

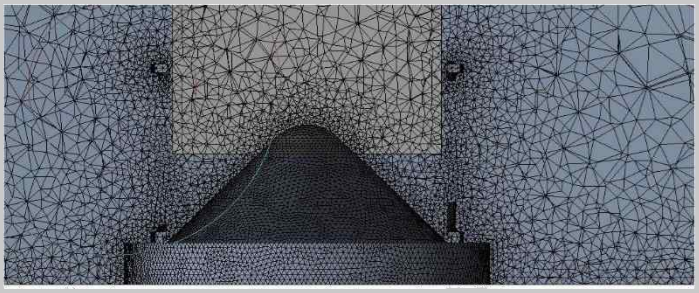


3D modelling of a
V-type sleeve valve



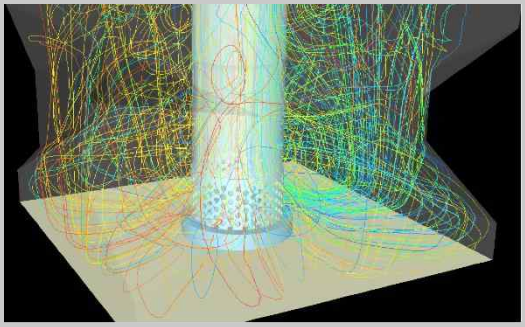
3D modelling of the
V-opening part



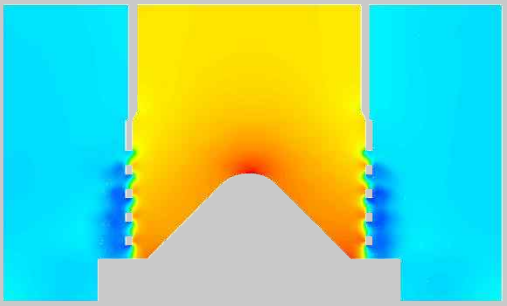


Mesh generation via Gambit software

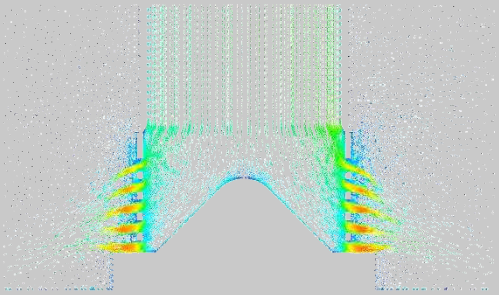
شکل 2 - نمونه‌ای از مدل‌سازی و شبکه‌بندی یک شیر غلافی با غلاف وی-شکل



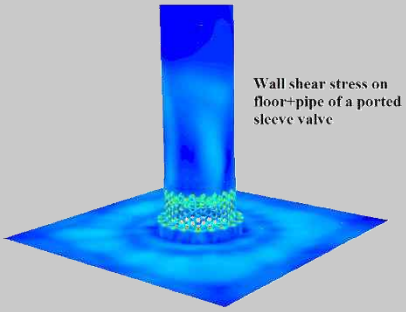
Streamline of flow through ported sleeve valve



Contours of absolute pressure around the ported part



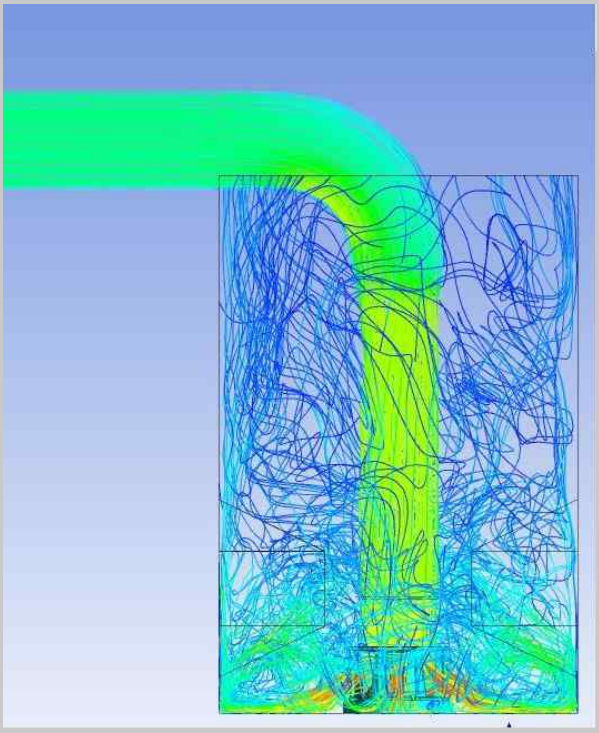
Velocity vector of flow through ported sleeve valve



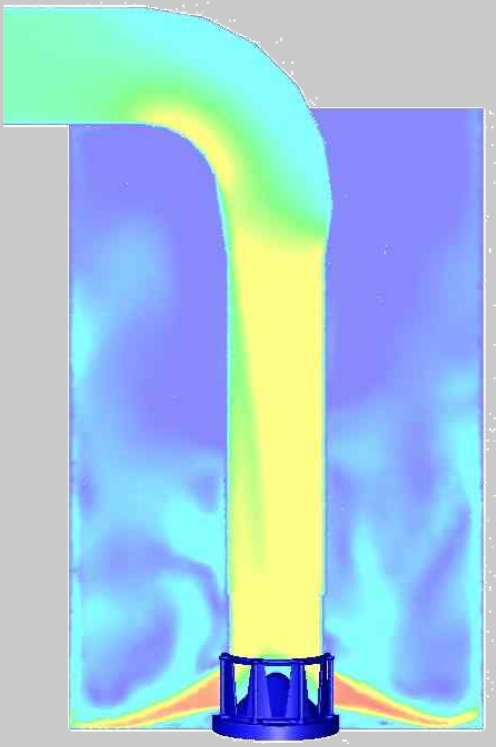
شکل 3 - الگوی عبور جریان، سرعت سیال، فشار و توزیع تنش برشی در بخش‌های مختلف یک شیر غلافی سوراخ‌دار

شبیه‌سازی شیرهای تخلیه مخروط ثابت

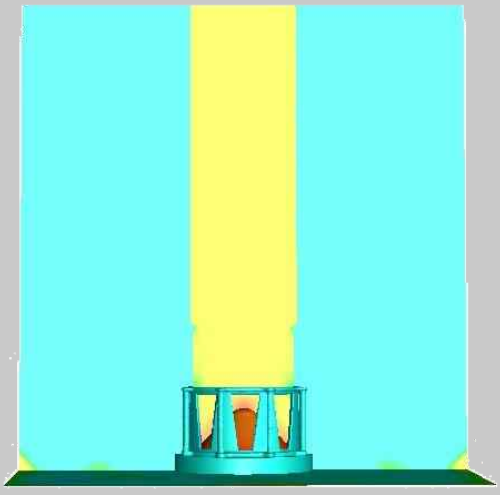
شیرهای تخلیه مخروط ثابت اغلب به عنوان شیر تخلیه به فضای آزاد یا شیر کنارگذر در انتهای خطوط انتقال، خروجی سدها و نیروگاه‌های آبی استفاده می‌شوند. شیر تخلیه مخروط ثابت به عنوان شیر مستهلک کننده انرژی، قطع و وصل و تنظیم در انتهای خطوط مخازن ذخیره آب، نقش بزرگی را به عهده دارد. با این شیر می‌توان مقدار جریان عبوری سیال را برای شرایط بهره‌برداری مختلف تغییر و تنظیم نمود. این‌رو لازم است ساختمان شیر در شرایط فوق برای جلوگیری از وقوع پدیده کاویتاسیون و در نتیجه ایجاد ارتعاشات و آسیب به ساختمان‌ها از طراحی هیدرولیکی مناسب و استحکام مکانیکی لازم برخوردار باشد. سرعت بالای جریان در این شیر می‌تواند اشیا موجود در شیب سدها مانند سنگ و چوب و غیره را با خود حرکت داده و به بدنه شیر آسیب برسد با این وجود طراحی این دسته از شیرها به‌گونه‌ای است که این اشیا به‌راحتی از داخل شیر عبور می‌نمایند و وجود این اشیا مانع باز و بسته شدن شیر نخواهند شد. شکل 5، نمونه‌ای از مدل‌سازی و شبکه‌بندی یک شیر تخلیه مخروط ثابت را نمایش می‌دهد. شکل 6 نیز الگوی عبور جریان، سرعت سیال، فشار و توزیع تنش برشی در بخش‌های مختلف این شیر را که حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار انسیس-فلوئنت می‌باشد، نشان می‌دهد.



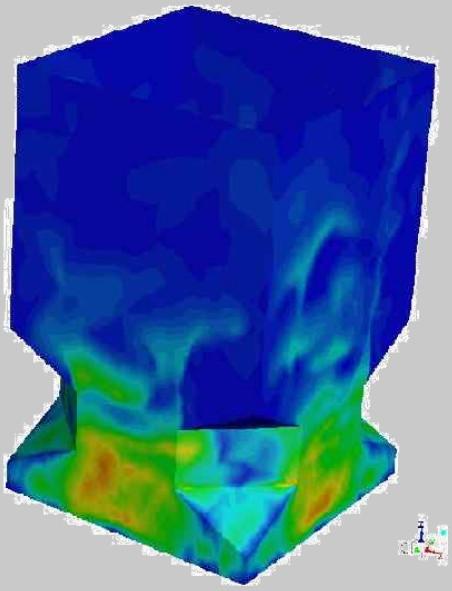
Streamline of flow through V- type sleeve valve



Velocity magnitude of flow through V-type sleeve valve

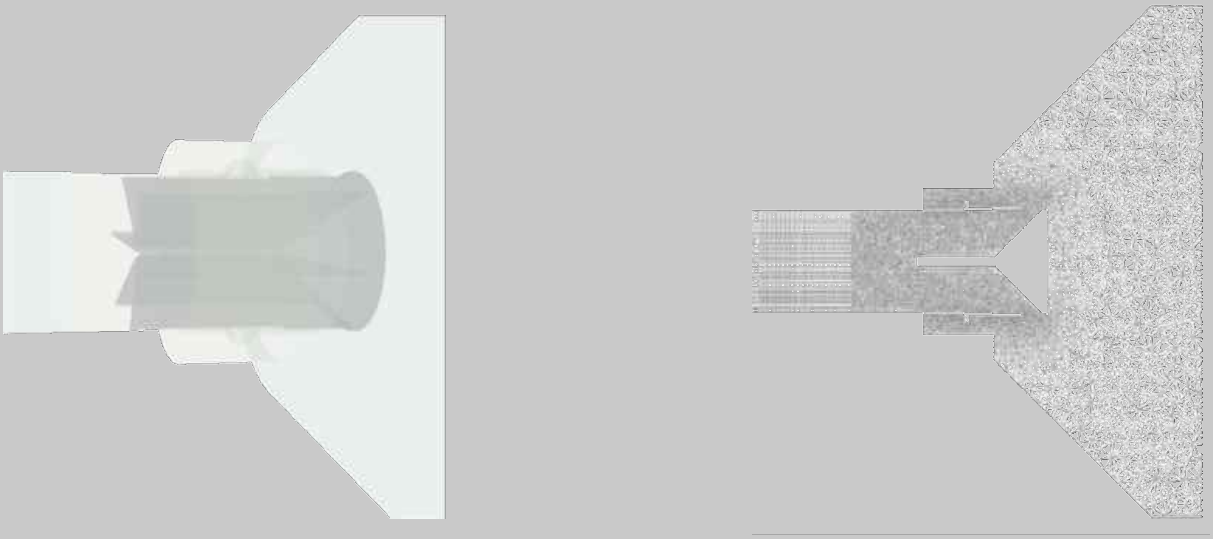


Contours of absolute pressure around V-type sleeve valve



Wall shear stress on walls of stilling well

شکل 4 - الگوی عبور جریان، سرعت سیال، فشار و توزیع تنش برشی در بخش‌های مختلف یک شیر غلافی وی-شکل



3D modeling of a fixed cone valve

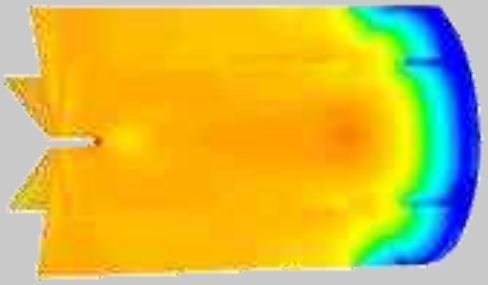
Mesh generation via Gambit software

شکل 5 - نمونه‌ای از مدل‌سازی و شبکه‌بندی یک شیر تخلیه مخروط ثابت

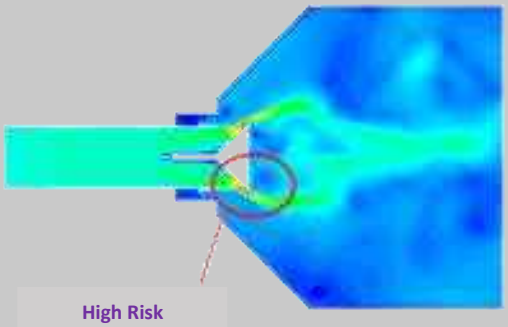
شبیه‌سازی دوفازی شیرهای پروانه‌ای

شیر پروانه‌ای[17] گونه‌ای از شیرهای صنعتی است که در آن از یک دیسک دایره‌ای که امکان چرخش حول محور خود را دارد، جهت کنترل یا انسداد مسیر جریان سیال استفاده می‌شود. این نوع از شیرها نسبت به دیگر انواع شیر از وزن کمتر برخوردار بوده و در عین حال ارزان‌تر می‌باشد و فرایند تعمیر و نگهداری راحت‌تری نیز دارند. موارد استفاده از شیرهای پروانه‌ای عبارتند از: 1- نیروگاه‌ها و ایستگاه‌های حرارتی 2 – نیروگاه‌های برقآبی و سامانه‌های انتقال آب 3 – صنایع مختلف بخصوص صنایع نفت، گاز، پتروشیمی 4 – در لوله‌کشی آب و فاضلاب. در شیرهای پروانه‌ای، میزان جریان عبوری از داخل شیر (Q) با میزان گشودگی دیسک (α) و مجذور اختلاف فشار دو سر شیر ($\sqrt{\Delta p} = \sqrt{p_1 - p_2}$) رابطه‌ای مستقیم دارد. بدین ترتیب که در یک گشودگی ثابت، با افزایش اختلاف فشار، میزان دبی جریان عبوری از شیر نیز به‌شکلی تقریباً خطی افزایش می‌یابد. البته این افزایش خطی دبی جریان تا جایی دیده می‌شود که جریان در پایین‌دست دیسک شیر کماکان ماهیت تک‌فازی خود را تقریباً حفظ کرده باشد و به عبارتی وارد فاز بخار ناشی از پدیده کاویتاسیون نشده باشد. همان‌طور که در شکل 7 نمایش داده شده است، تغییرات فشار قبل و بعد از شیر بیشتر از فشار بخار سیال در دمای کاری است و لذا ایجاد پدیده کاویتاسیون منتفی و رفتار خطی افزایش دبی جریان قابل پیش‌بینی می‌باشد. چنانچه اختلاف فشار از یک مقدار بحرانی $\sqrt{\Delta p_{\text{choked}}}$ افزایش یابد، افت فشار پایین‌دست شیر به حدی می‌رسد که مساوی فشار بخار سیال شده و حباب‌های بخار و هوا تولید شده و با ایجاد تلاطم و انسداد سطح عبور جریان میزان افزایش جریان را نیز متوقف می‌سازد. شکل 8 این ویژگی را به‌صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

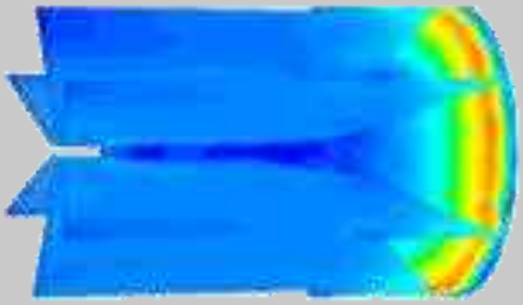
[17] Butterfly Valve



Contours of absolute pressure on fixed-cone valve

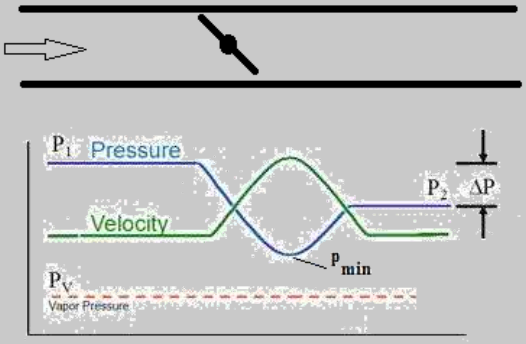


Velocity magnitude of flow through fixed-cone valve

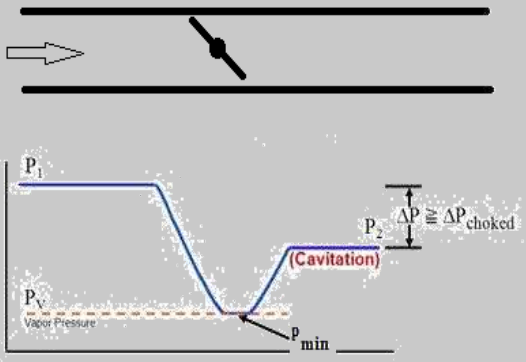


Wall shear stress on fixed-cone valve

شکل 6 - الگوی عبور جریان، سرعت سیال، فشار و توزیع تنش برشی در بخش‌های مختلف یک مخروط ثابت

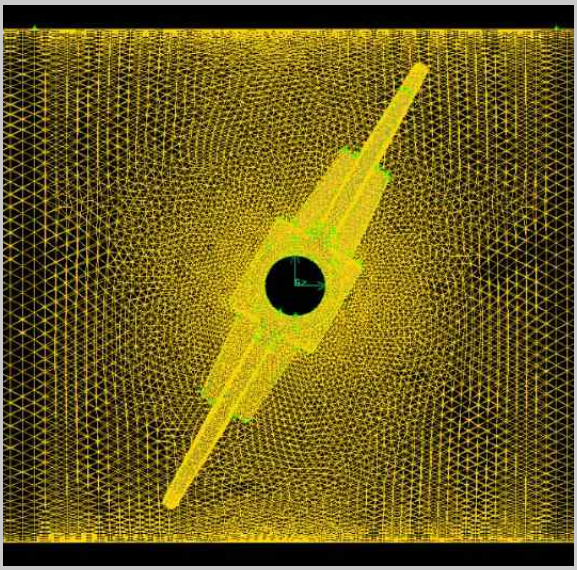


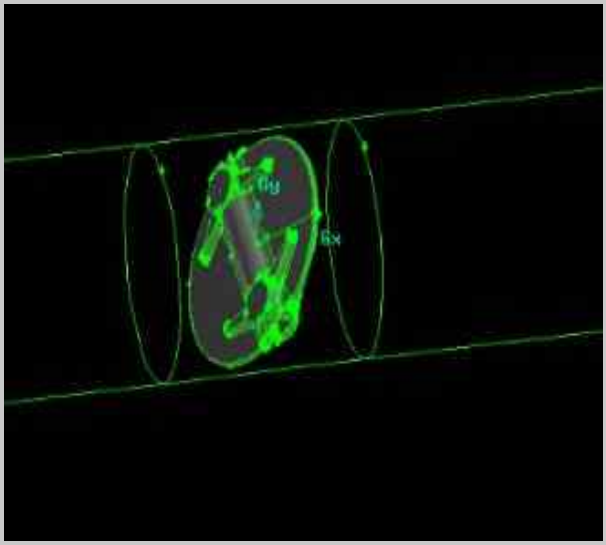
شکل 7: تغییرات فشار قبل و بعد از شیر در شرایط عادی



شکل 8: تغییرات فشار قبل و بعد از شیر در شرایط بروز کاویتاسیون

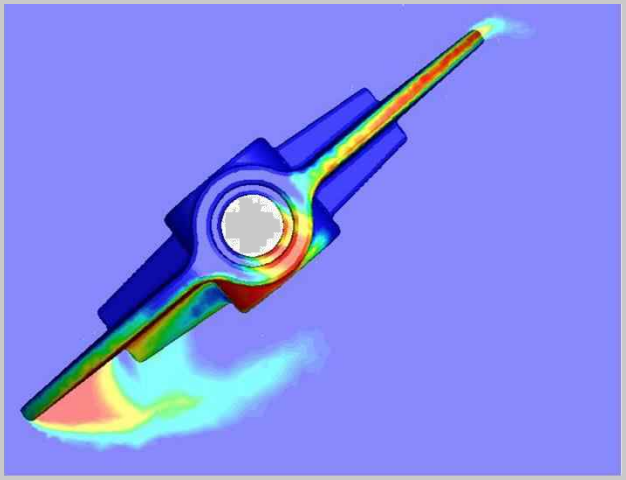
یکی از اهداف تحقیق و توسعه شرکت میراب دستیابی به فنّاوری تولید شیرهایی با ویژگی ضد کاویتاسیون می‌باشد. به همین منظور استفاده از ابزار شبیه‌سازی به‌ویژه شبیه‌سازی دوفازی نیز در دستور کار کارشناسان و متخصصان این شرکت قرار گرفته است. برای رسیدن به این هدف، بررسی وضعیت هیدرولیکی و کاویتاسیون شیرهای پروانه‌ای موجود در شرایط مختلف کارکردی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکل 9، نمونه‌ای از مدل‌سازی و شبکه‌بندی یک شیر پروانه‌ای ویفری[18] جهت شبیه‌سازی دوفازی را نمایش می‌دهد. شکل 10 نیز الگوی عبور جریان و تشکیل حباب کاویتاسیون در پایین‌دست دیسک همان شیر را که حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار انسیس-فلوئنت می‌باشد، نشان می‌دهد.



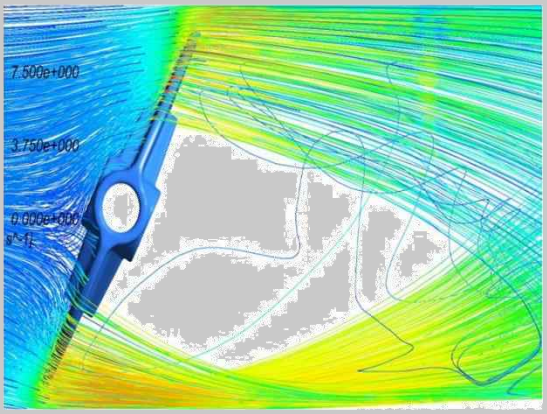


شکل 7: شمای کلی هندسه یک شیرپروانه‌ای ویفری (چپ) و تصویر شبکه‌بندی هندسه (راست)

[18] Wafer Butterfly Valve



Cavitation formation behinde a butterfly valve



Streamline of flow through a butterfly valve

شکل 8 - الگوی عبور جریان و تشکیل حباب کاویتاسیون در پایین‌دست دیسک شیرپروانه‌ای ویفری

نتیجه‌گیری

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یکی از شاخه‌های مهم و پر طرفدار رشته مهندسی مکانیک است که با استفاده از آنالیز و الگوریتم‌های عددی، مسائل مشتمل بر شاره‌های سیالاتی را تجزیه و تحلیل می‌کند. این شاخه از مکانیک سیالات، مکانیک قدیم و سنتی را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسباتی آن متصل کرده است. علیرغم اینکه قدمت و پیشینه استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی در دنیا چندان زیاد نیست، این شاخه از علم در ایران و در سال‌های اخیر، رشد بسیار خوب و قابل قبولی داشته است. جای گرفتن این مبحث در قالب چندین واحد درسی در مقاطع کارشناسی ارشد، دکتری و حتی کارشناسی به‌خوبی بیانگر میزان توجه و آینده روشن آن در کشور است. علاوه بر ارائه دروس مرتبط با این شاخه از علم در دانشگاه‌ها، مراکز زیادی نیز به‌صورت حرفه‌ای و نیمه‌حرفه‌ای در این زمینه شروع به فعالیت کرده‌اند. در این بین، بسیاری از صنایع و شرکت‌های صنعتی نیز برای رسیدن به یک محصول با کیفیت و کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی خود، با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای شاخص و معتبر این علم و به‌کارگیری متخصصان مرتبط با این حوزه، مسیر جدید و کارآمدی را در راه تحقیق و توسعه محصولات و آینده‌نگری در تولید محصولات جدید، بازگشایی کرده‌اند.

در این راستا شرکت میراب به عنوان یک سازنده بین المللی با سابقه تولید انواع شیرآلات صنعتی در ابعاد و فشارهای مختلف، با تکیه بر دانش‌فنی و دستاوردهای تجربی گذشته خود در طراحی و ساخت شیرآلات صنعتی، از قبل جهت پیشبرد اهداف صنعتی و تحقیقاتی خود، بهینه‌سازی محصولات تولیدی و تولید محصولات جدید و با کیفیت، در بکار گیری و بهره‌مندی از این شاخه علمی پیشگام بوده است. نمونه مسائل توضیح داده شده در بخش‌های قبلی، شامل ارائه و معرفی قسمت کوچکی از تداوم این فعالیت‌ها می‌باشد.

خدایا چنان کن سرانجام کار تو خوشنود باشی و ما رستگار