

## مدلسازی CFD پیش گرم کن هیدروژن واحد پایلوت ارتقای پس ماندهای نفتی

رسول محمدیخواه، حامد نادری\*، علی جبرئیلی جلودار، مهدی احمدی مروست، سمیه کنگان پناه

پژوهشگاه صنعت نفت، گروه پژوهش توسعه و کنترل فرآیندها

دریافت: ۹۲/۱۰/۱۴ پذیرش: ۹۳/۴/۱

### چکیده

در این مطالعه پیش گرم کن هیدروژن یک واحد نیمه صنعتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی شده است. با حل معادلات حاکم در دو بخش محتوی پرکن و بدون پرکن، تجزیه و تحلیل هیدرودینامیکی و حرارتی سیستم انجام شده است. نتایج نشان می دهند که طراحی پیش گرمکن برای رساندن دمای هیدروژن تا مقدار مطلوب مناسب نیست و حتما باید بخش بدون هیتر پیش گرمکن، عایق شود. شبیه سازی ها نشان می دهند که رژیم جریان در پیش گرم کن هیدروژن از نوع آرام است و لذا مقاومت لایه مرزی در انتقال حرارت سطح اهمیت زیادی دارد. البته باید در نظر داشت که چون سیال گاز است و دانسیته و ویسکوزیته کمی دارد، لذا لایه مرزی بسیار نازک می باشد. اثرات احتمالی جابجایی آزاد گرمایی گاز هیدروژن نیز در محاسبات در نظر گرفته شده است؛ زیرا دانسیته گاز با افزایش دما کاهش یافته و در برخی نقاط جریان برگشتی نیز مشاهده می شود. این جریان برگشتی و گردان معکوس سبب اختلاط بیش تر جریان و اتلاف حرارتی بیش تر می شود و امری نا مطلوب است. لذا در ادامه تمهیداتی جهت از بین بردن آن ارائه شده است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهند که علیرغم وجود محیط پر شده، مقدار افت فشار در سیستم بسیار کم و ناچیز است. جهت بررسی انتقال حرارت، انواع عایق با ضخامت های مختلف بررسی شدند. مشخص گردید، استفاده از عایق پشم شیشه به ضخامت ۵ سانتیمتر می تواند دمای هیدروژن خروجی را تا ۳۷۹ درجه سانتیگراد بالا ببرد که دمای مطلوبی برای شروع واکنش های کاتالیستی است. نتایج نشان داد، در محدوده شدت جریان عملیاتی هیدروژن، استفاده از یک هیتر در انتهای پیش گرم کن کفایت می کند. کاربرد هیترهای اضافی موجب اتلاف انرژی می شود و تأثیری در بالا بردن دمای هیدروژن ندارند.

**کلمات کلیدی:** ارتقای پسماند، پیش گرمکن، مدلسازی، دینامیک محاسباتی سیال.

## مقدمه

بدون شک ارزش مشتقات نفت خام با توجه به تأمین انرژی و خوراک صنایع پایین دستی مانند تأمین خوراک پتروشیمی ها، به طور روز افزون بیش تر می گردد. از این رو تلاش می گردد تا از برش های سنگین یا پسماندهای تولیدی در پالایشگاه ها که به عنوان سوخت سنگین و کم ارزش مصرف می شوند، استفاده بهتری به عمل آید. مقدار تولید این برش های سنگین در داخل کشور رقم قابل توجهی است در حالی که فرآیند خاصی روی این برش ها انجام نمی پذیرد. این مسئله موجب از دست رفتن مقدار قابل توجهی از ثروت ملی می گردد. یکی از روش های حل این مشکل ارتقای کیفیت این برش هاست. به منظور ارتقای کیفیت این برش ها فرآیندهای متعددی وجود دارد که می توان آن ها را در دو شاخه اصلی: فرآیندهای همراه با افزودن هیدروژن و فرآیندهای همراه با حذف کربن دسته بندی نمود [۱]. به طور کلی خصوصیات مشترک فرآیندهای از نوع افزودن هیدروژن عبارتست از: کاتالیستی بودن فرآیندها، دمای متوسط عملیاتی ( $350 - 450^{\circ}\text{C}$ )، فشارهای بالای عملیاتی، بازدهی بالای مایع به دلیل افزودن هیدروژن، کیفیت بالای محصولات، پیچیده بودن فرآیند، هزینه سرمایه گذاری و عملیاتی بالا و مهم تر از همه هزینه های بالای سرویس جانبی اعم از تأمین هیدروژن و بخار؛ در حالی که خصوصیات مشترک فرآیندهای از نوع حذف کربن عبارتست از: دمای بالای عملیاتی ( $450 - 550^{\circ}\text{C}$ )، فشارهای پایین عملیاتی، عدم حضور هیدروژن و تبعات ناشی از آن، بازدهی پایین مایع به دلیل حذف کربن، سرمایه گذاری و هزینه عملیاتی پایین و سادگی. از این رو برای ارتقای پسماندهای نفتی روش افزودن هیدروژن رجحان و برتری خاصی دارد. فرآیند هیدروکانورژن یکی از فرآیندهای ارتقای کیفیت (افزودن هیدروژن) می باشد. این فرآیند که روشی نوین در ارتقاء کیفیت نفت سنگین می باشد علاوه بر شرایط عملیاتی مناسب تر نسبت به دیگر فرآیندها (فشار  $60-70$  بار و دمای  $400-465$  درجه سانتیگراد) و همچنین هزینه های سرمایه گذاری پائین تر دارای مزایای زیر می باشد [۲]:

- راندمان بالای تولید ( $90-95$  درصد)
- قابل استفاده برای خوراک های مختلف با مقادیر زیاد گوگرد و فلزات سنگین
- حذف کامل فلزات سنگین
- کاهش  $60$  درصد گوگرد
- میزان ناچیز تشکیل کک (کم تر از  $1\%$ )
- نبود واکنش های پلیمریزاسیون
- بازیابی بیش از  $95$  درصد کاتالیست

علاوه بر این، این فرآیند ناخالصی های شیمیایی مانند نیتروژن، گوگرد و فلزات نیکل و وانادیم و ذرات معلق را از مولکول های هیدروکربن حذف کرده یا میزان آن ها را به طور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. این مسئله از جنبه زیست محیطی نیز بسیار قابل اهمیت است؛ زیرا این ناخالصی ها می توانند مشکلاتی را برای

سیستم های فرآیندی و همچنین محیط زیست ایجاد نمایند. در این کار مطالعاتی، واحد پایلوتی مورد مطالعه از فرآیند هیدروکانورژن با راکتور بستر دوغابی<sup>۱</sup> برای ارتقای کیفیت استفاده می نماید. واحد پایلوت این فرآیند به صورت یکبار گذر<sup>۲</sup> می باشد و قادر است در حضور نانو کاتالیزور و هیدروژن پسماندهای سنگین نفتی و یا نفت خام سنگین با API کم تر از ۱۵ را به محصولات سبک با API بیش از ۲۰ تبدیل کند. در این واحد پایلوتی خوراک پسماند و کاتالیست با یکدیگر مخلوط و پس از حرارت دهی و رسیدن به دمای مناسب به همراه هیدروژن داغ وارد راکتور می شوند. ذرات کاتالیست با مقیاس نانو در حضور هیدروژن به هیدروکربن های با جرم مولکولی بالا از جمله آسفالتین ها نزدیک شده و منجر به شکست آن ها به ترکیبات سبک تر می گردند. در این راستا دمای هیدروژن تزریقی به خوراک از اهمیت خاصی برخوردار است [۳]. بنابراین هیدروژن قبل از تزریق به راکتور باید تا حد امکان گرم شود. برای این منظور پیش گرم - کن هیدروژن طراحی و نصب گردیده است تا دمای هیدروژن را به مقدار مطلوب برساند. از آن جا که واحد پایلوتی مزبور و به طبع آن پیش گرم کن هیدروژن آن با ظرفیت کم تری نسبت به طراحی و ظرفیت اسمی کار می کنند، لذا این مطالعه روی بررسی پدیده انتقال حرارت در پیش گرم کن و بهینه سازی سیستم گرمایشی موجود از نظر مصرف انرژی و تامین دمای مطلوب هیدروژن متمرکز گردیده است.

از لحاظ پیچیدگی و تکنولوژی بالای این فرایند، تنها چند کشور در دنیا به فناوری آن دست یافته اند که ایران از جمله آن کشورهاست. به همین دلیل مطالعات مرتبط با این تکنولوژی هنوز انجام نشده است. طبیعتاً استفاده از دانش دینامیک سیالات مهندسی به عنوان ابزاری قدرتمند در طراحی چنین فرایندهایی می تواند بسیار موثر باشد و بسیاری از مشکلات عملیاتی فرایند را با هزینه اندک حل نماید. در این خصوص تاکنون در دنیا مطالعه شبیه سازی بر روی این فرایند انجام نگرفته است و برای اولین دفعه مقاله حاضر استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی را برای پیشبرد اهداف مهندسی در این فرایند پیشنهاد می نماید. دینامیک سیالات مهندسی علاوه بر محاسبه پارامترهای مهم عملیاتی، رژیم و کیفیت و کمیت میدان سیال را نیز تحت بررسی قرار می دهد. بیش از دو دهه است که از شبیه سازی های دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی فرایندهای مهم نفتی و در جهت ارتقا فرایند استفاده شده است [۴-۶]؛ لذا در کنار طراحی و ساخت، همیشه می بایست نیم نگاهی به شبیه سازی دینامیک فرایند در جهت ارتقای آن داشت.

## تئوری و روش کار

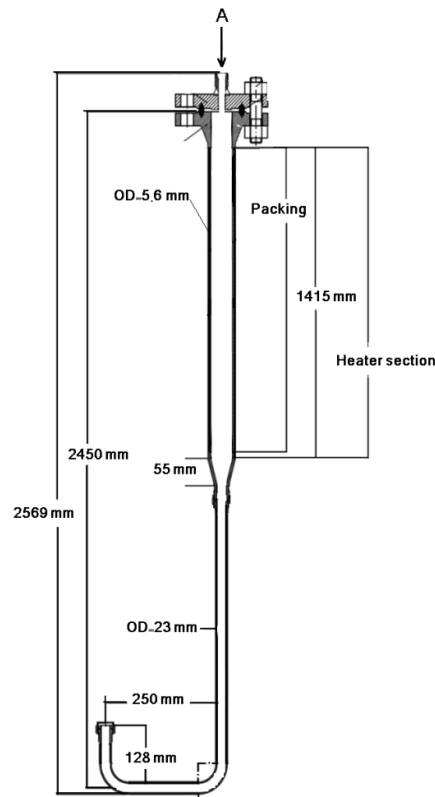
### هندسه و شبکه بندی

همان طور که در بخش مقدمه ذکر گردیده است، در فرآیند هیدروکانورژن از پیش گرم کن هیدروژن جهت رساندن دمای هیدروژن به مقدار مطلوب استفاده می گردد. شماتیک هندسی پیش گرم کن هیدروژن در شکل ۱ آورده شده است. ورودی گاز هیدروژن از بالا می باشد که با علامت A نشان داده شده است. ابتدا گاز وارد منطقه پرکن ها شده و توسط هیترهای الکتریکی محیطی گرم می شود و سپس از قسمت پایین

<sup>1</sup> Slurry Bed

<sup>2</sup> Once through

پیش گرم کن به سمت رأکتور حرکت می کند. در منطقه هیترها از چهار هیتر الکتریکی موازی با قدرت ۲ کیلو وات برای گرم کردن پوسته لوله استفاده شده است. کنترلر سیستم PLC قدرت هیترها را به نحوی تنظیم می نماید که دمای روی دیواره لوله همواره با مقدار مورد نظر<sup>۱</sup> برابر باشد.



شکل ۱. شماتیک هندسی پیش گرم کن هیدروژن واحد هیدروکانورژن

هندسه فوق به صورت دو بعدی با تقارن محوری در نرم افزار گمبیت<sup>۲</sup> ساخته و سپس شبکه بندی شده است. شکل ۲ نمای پیش گرم کن هیدروژن را نشان داده است. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است از یک شبکه سازمان یافته متشکل از ۷۲۱۰ سلول و ۸۲۵۲ گره برای شبکه بندی استفاده شده است. همچنین در مرز داخلی لوله پیش گرم کن از شبکه بندی لایه مرزی با ارتفاع اولین سلول ۱ میلی متر و نرخ رشد ۱/۲ برای لحاظ کردن اثرات لزج دیواره و محاسبه شار حرارتی و ممنتوم صحیح استفاده شده است. پوسته لوله پیش گرم کن به جهت این که پدیده انتقال حرارت از آن یک نکته مهم و کلیدی تلقی می شود، با ۵ لایه مش شبکه بندی شده است تا بتوان به راحتی گرادیان دما را در آن - در صورت وجود - مشاهده نمود. بیشینه مقدار فاکتور کجی<sup>۳</sup> شبکه ها ۰/۱۹ و بیشینه فاکتور نسبت هندسی<sup>۴</sup> برابر ۷/۷ می باشد که

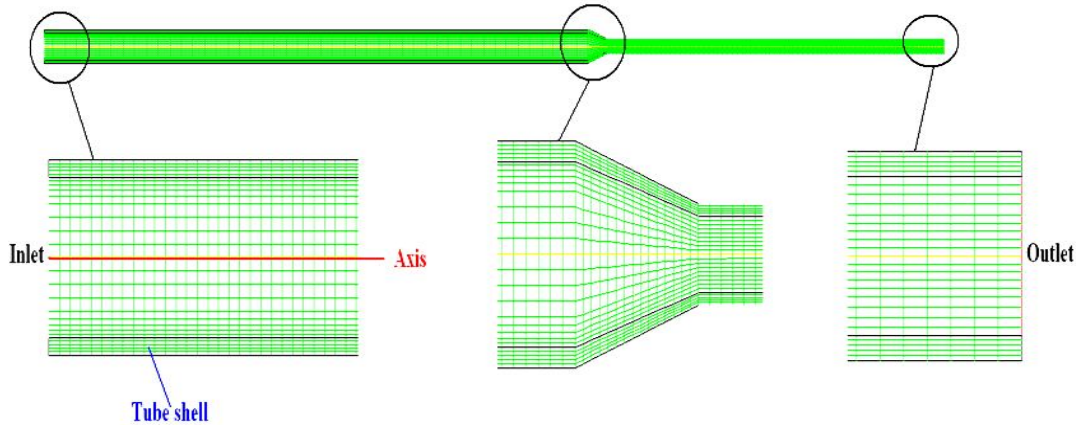
<sup>۱</sup> Set Point

<sup>۲</sup> Gambit 2.3 Edition

<sup>۳</sup> Skewness

<sup>۴</sup> Aspect ratio

نشانهگر کیفیت بالای شبکه بندی دو بعدی است. جنس دیواره پیش گرم کن و پرکن ها از استیل ۳۲۱ انتخاب شده است. پرکن ها نیز استوانه های تو خالی به طول و قطر خارجی ۱۰ میلی متر می باشند.



شکل ۲. نمای هندسی دو بعدی با تقارن محوری پیش گرم کن هیدروژن واحد هیدروکانورژن و نحوه شبکه بندی آن

### شرایط عملیاتی

در شرایط واقعی هیدروژن خالص با دبی ۲۰۰۰-۴۰۰۰ نرمال لیتر بر ساعت و در دمای ۳۵ درجه سانتی-گراد و فشار ۶۹ بار مطلق وارد پیش گرم کن می شود. دمای روی سطح دیواره پیش گرم کن نیز در منطقه هیترها ۴۰۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. در مناطقی که هیتتر وجود ندارد فرض انتقال حرارت جابجایی با محیط با ضریب انتقال حرارت ۱۰ وات بر متر مربع بر درجه کلونین در نظر گرفته شده است و همچنین فرض عایق بودن این مناطق نیز در برخی از شبیه سازی ها در نظر گرفته شده است. دمای محیط نیز ۲۵ درجه سانتی گراد فرض شده است.

### معادلات حاکم

از آن جا که در این بخش هندسه کلی سیستم از تقارن محوری برخوردار است، فرم معادلات را در حالت دو بعدی با تقارن محوری بررسی و گزارش خواهیم کرد؛ لذا یک بعد محوری و یک بعد شعاعی خواهیم داشت که این معادلات در شبیه سازی به کار رفته است. شکل دو بعدی معادله بقاء جرم برای یک سیستم با تقارن محوری چه برای جریان های تراکم پذیر و چه تراکم ناپذیر به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (1)$$

که در آن  $\rho$  و  $v$  به ترتیب دانسیته و سرعت سیال هستند و زیر نویس های  $x$  و  $r$  جهت مولفه بردارها را نشان می دهد. جرم اضافه شده به فاز پیوسته از طریق فاز ناپیوسته نیز برابر  $S_m$  و در این مطالعه خاص

برابر صفر است؛ زیرا جریان سیال در کل سیستم تک-فاز می‌باشد. قانون بقای ممنتوم محوری و شعاعی نیز به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] - 2\mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \quad (3)$$

که در آن:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (4)$$

که  $\mu$  و  $v_z$  ویسکوزیته و سرعت چرخشی سیال در راستای زاویه  $\theta$  (برابر با صفر در این مطالعه) هستند. ترم  $F$  در طرف دوم این معادلات بیانگر چشمه یا چاه ممنتوم القایی به وسیله نیروهای بدنه یا محیط متخلخل است که معمولا با معادله زیر در محیط متخلخل جایگزین می‌شود.

$$F_i = -\left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (5)$$

که در آن  $\alpha$ ، قابلیت نفوذ پذیری و  $C_2$  ضریب مقاومت اینرسی است. بنابراین معادلات اصلی حاکم روابط ۱، ۲ و ۳ هستند که باید همزمان با یک یا چند معادله اغتشاش حل شوند. شکل استاندارد معادلات انتقال برای  $k$  (انرژی جنبشی اغتشاش) و  $\varepsilon$  (نرخ اضمحلال اغتشاش) به صورت زیر است [۷]:

$$\frac{\partial(\rho v_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (7)$$

که  $G$  ترم تولید اغتشاش است و می‌توان آن را توسط مدل‌های خاصی محاسبه کرد. این معادلات انتقال، چهار پارامتر تجربی را در بر می‌گیرند که مقادیر آن‌ها به کمک آزمایشات تجربی به دست آمده است. در این مطالعه خاص به جهت این که جریان سیال درون سیستم آرام است، لذا معادلات اغتشاش در دامنه موجود حل نخواهند شد و از تولید و یا مصرف گردابه‌های مغشوش در سیستم صرف نظر شده است. دانش CFD با توانایی‌های مخصوص به خود قادر است که این معادلات را در حوزه عملکرد سیال به صورت عددی حل کند و نتایج را در اختیار ما قرار دهد. تقریب محیط متخلخل علاوه بر این که یک ترم چاه ممنتوم (معادله ۵) را وارد معادلات بقاء ممنتوم می‌کند، تخلخل مورد نظر را در تمامی متغیرهای اسکالر حاضر در

ترم های معادلات انتقال ضرب خواهد کرد. به عنوان مثال معادله بقاء انرژی در یک سیستم شامل محیط متخلخل به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1 - \gamma) \rho_s E_s) + \Delta \cdot (\vec{v} (\rho_f E_f + P)) = \Delta \cdot [k_{eff} \Delta T - (\sum_i h_{ij} j_i) + (\bar{v} \cdot \vec{v})] + S_f^h \quad (8)$$

که  $E_s$  و  $E_f$  به ترتیب انرژی کل سیال و جامد،  $\gamma$  تخلخل محیط،  $k_{eff}$  ضریب نفوذ حرارتی مؤثر و  $S_f^h$  ترم منبع (چشمه یا چاه) آنتالپی سیال است.  $k_{eff}$  در محیط های متخلخل توسط مدل محاسباتی، به عنوان متوسط حجمی هدایت حرارتی سیال و جامد محاسبه می شود:

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma) k_s \quad (9)$$

در معادله فوق  $k_f$  و  $k_s$  به ترتیب نشان دهنده ضریب هدایت حرارتی سیال و جامد هستند.

### خواص حرارتی

خواص حرارتی سیالات و جامدات موجود در سیستم از منابع و مراجع معتبر به دست آورده شده اند [۸]. خواص حرارتی سیال عملیاتی (هیدروژن) توسط معادله حالت گاز کامل محاسبه می شود؛ زیرا ضریب تراکم پذیری آن در محدوده دما و فشار عملیاتی طبق داده های تجربی برابر ۱ گزارش شده است [۹]. لذا می توان آن را یک گاز کامل غیر قابل تراکم فرض نمود. از تراکم پذیری آن به علت این که افت فشار (تغییرات فشار) در سیستم ناچیز است، صرف نظر شده است. ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته هیدروژن نیز طبق داده های تجربی در دماهای مختلف وارد نرم افزار فلونت<sup>۱</sup> شده است (۲۰ نقطه داده تجربی) [۹]. عایقی که دور پوسته پیش گرم کن قرار دارد (در مناطقی که هیتر وجود ندارد) نیز از جنس پشم شیشه با ضخامت ۴ سانتی متر و خواص ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی به ترتیب ۶۶۰ j/kg.K و ۰/۰۴ W/m.K و دانسیته آن ۱۱۲ kg/m<sup>3</sup> است [۹].

### رابطه ارگان و مدلسازی بستر پرشده<sup>۲</sup>

در جریان های مغشوش، بستر های پرشده با استفاده از تراوایی و یک ضریب اتلاف اینرسی مدل می شوند. تکنیک مناسبی برای استخراج ثوابت مناسب، استفاده از رابطه ارگان را پیشنهاد می کند که یک رابطه نیمه تجربی و کاربردی برای بازه گسترده ای از اعداد رینولدز است و برای بسیاری از بسترهای پرشده استفاده می شود. ثوابت این معادله معروف را می توان به دست آورد و از آن در شبیه سازی محیط متخلخل در نرم افزار فلونت استفاده نمود.

این رابطه به این صورت تعریف شده است:

<sup>1</sup> FLUENT 6.3

<sup>2</sup> Packed bed

$$\frac{|\Delta P|}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} V_\infty + \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} V_\infty^2 \quad (10)$$

برای جریان آرام در بستر پرشده که مصداق مطالعه حاضر می باشد، ترم دوم رابطه بالا حذف می شود و رابطه بلیک-کوزنی به دست می آید:

$$\frac{|\Delta P|}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} V_\infty \quad (11)$$

در این روابط  $\mu$  ویسکوزیته،  $D_p$  قطر متوسط ذرات،  $L$  طول بستر و  $\varepsilon$  کسر فضای خالی بستر است که به صورت حجم فضاهای خالی تقسیم بر حجم ناحیه پرشده تعریف می شود. از مقایسه روابط بالا تراوایی و ضریب اتلاف اینرسی در هر جهت به صورت زیر تعریف می شوند که از جمله ورودی های نرم افزار فلونتت جهت مدل سازی عددی محیط متخلخل به شمار می روند:

$$\alpha = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad (13)$$

تخلخل متوسط بسترهای کاتالیستی نیز ثابت و برابر  $0.57$  به صورت تجربی اندازه گیری شده است. همچنین مقاومت های محیط متخلخل نیز طبق دو رابطه  $12$  و  $13$  و با فرض  $D_p=0.01$  m به ترتیب زیر محاسبه و در نرم افزار استفاده شده اند:

$$\alpha = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} = \frac{0.01^2 0.57^3}{150(1-0.57)^2} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = 1497626.8 \frac{1}{m^2} \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} = \frac{3.5(1-0.57)}{0.01^2 0.57^3} = 812.6657 \frac{1}{m} \quad (15)$$

این اعداد نشان می دهند که مقاومت اینرسی در محیط متخلخل ناچیز و قابل صرف نظر کردن است؛ اما در عوض مقاومت ویسکوز (نفوذی) آن عدد قابل ملاحظه ای است. به بیان دیگر می توان نتیجه گرفت که رژیم جریانی آرام در محیط متخلخل پیش گرم کن بر رژیم جریانی مغشوش غالب است.

### شبیه سازی و نتایج

#### بررسی انتقال حرارت جابجایی با محیط در قسمت عاری از هیتر

شبیه سازی پیش گرم کن هیدروژن به صورت دو بعدی با تقارن محوری در نرم افزار فلونتت انجام شده است. به دلیل ناچیز بودن افت فشار در سیستم از حل کننده بر مبنای فشار استفاده شده است؛ لذا دانسیته هیدروژن در کل سیستم فقط تحت تاثیر دما و بر طبق معادله حالت گاز کامل تغییر خواهد کرد و تغییرات فشار در آن تاثیری نخواهد داشت. ضریب تراکم پذیری هیدروژن نیز در شرایط عملیاتی بر طبق داده های تجربی برابر  $1$  گزارش شده است و از این حیث می توان آن را گاز کامل محسوب کرد [۳]. همان طور که ذکر شد دبی ورودی هیدروژن به داخل پیش گرم کن بین  $2000$  تا  $4000$  نرمال لیتر بر ساعت است. با



فرض دبی متوسط ۳۰۰۰ نرمال لیتر بر ساعت، عدد بدون بعد رینولدز در ورودی نشان دهنده رژیم جریانی آرام در بستر پر شده است. اگر این دبی را به شرایط عملیاتی یعنی فشار ۶۹ بار و دمای ۳۵ درجه سانتیگراد ببریم و سرعت در ورودی را با فرض سطح مقطع ۰/۰۰۱۶۶ متر مربع (قطر داخلی لوله ۴۶ میلی متر) محاسبه کنیم، داریم:

$$Q = \frac{3000 \text{ NI}}{\text{hr}} \frac{1 \text{ atm}}{69.914 \text{ atm}} \frac{308.15 \text{ K}}{293.15 \text{ K}} = 45.11 \frac{\text{l}}{\text{hr}} \Rightarrow \quad (16)$$

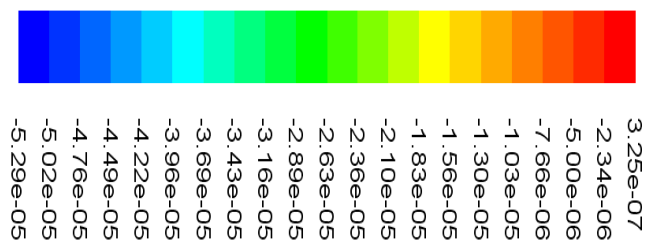
$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0.04511 \text{ m}^3}{\text{hr}} \frac{1}{0.00166 \text{ m}^2} \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} = 7.54 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

این سرعت کم در ورودی، احتمالاً نمایانگر جریان آرام است. دانسیته و ویسکوزیته هیدروژن در شرایط عملیاتی ورودی نیز به ترتیب از معادله گاز کامل و داده های تجربی مرجع [۹] به دست آمده اند.

$$\rho = \frac{p}{ZRT} = \frac{69.914}{1 \times 308.15 \times 82.057} = 0.0028 \text{ grmole/cm}^3 \left( \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^3 \frac{2.016 \text{ gr}}{1 \text{ grmole}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} = 5.645 \text{ Kg/m}^3 \quad (17)$$

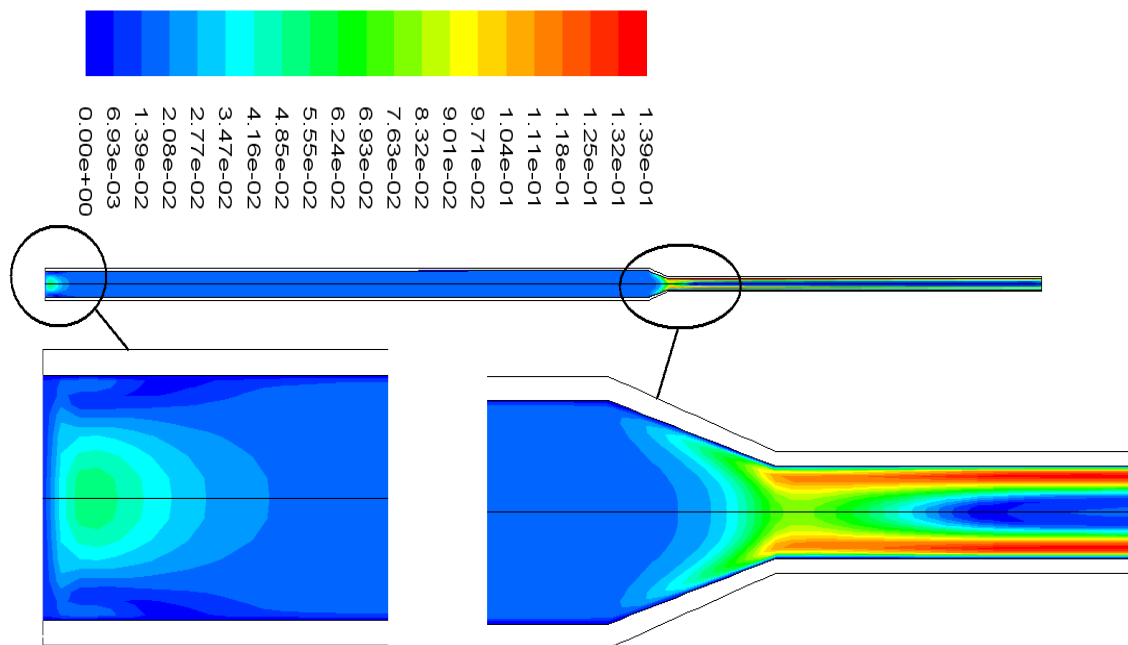
$$\text{Re} = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{5.645 \times 7.54 \times 10^{-3} \times 4.6 \times 10^{-3}}{9.1 \times 10^{-6}} = 21.51 \quad (18)$$

طبق رابطه ۱۸ مشخص می شود که رژیم جریانی ورودی کاملاً آرام است و نیازی به حل معادلات اغتشاش در دامنه حل نمی باشد. شتاب جاذبه ۹/۸۰۶ متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شد تا اثرات احتمالی جابجایی آزاد گرمایی گاز هیدروژن نیز مشاهده شود. در اولین اجرا فرض شده است که در نواحی که هیتر وجود ندارد انتقال حرارت جابجایی با محیط انجام می شود. شکل های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب کانتورهای فشار، سرعت و دما را در پیش گرم کن نشان داده اند.



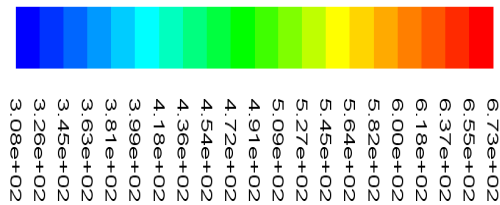
شکل ۳. کانتورهای فشار بر حسب اتمسفر که می بایست با فشار عملیاتی یعنی ۶۹ اتمسفر جمع شوند

همان طور که شکل ۳ نشان داده است مقدار افت فشار در سیستم بسیار کم و ناچیز است و در انتهای خروجی پیش گرم کن نیز فشار از مقدار مورد انتظار بیش تر است. دلیل این امر گرم شدن گاز است که به واسطه کم تر شدن دانسیته آن تمایل دارد به سمت بالا یعنی ورودی گاز پیش رود، اما وجود گرادیان فشار از این امر ممانعت به عمل آورده و لذا در قسمت های پایین سیستم تجمع فشار و سیال مشهود می باشد.



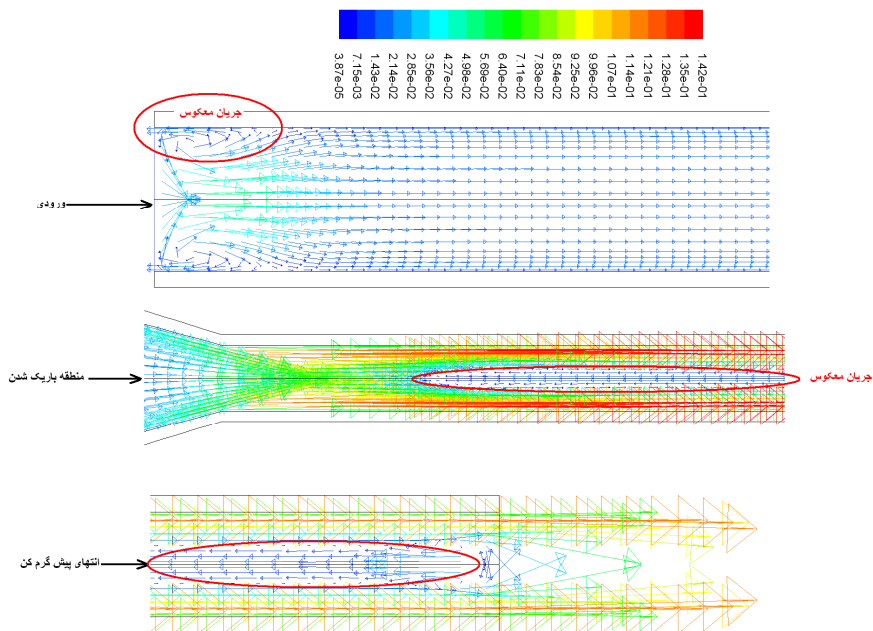
شکل ۴. کانتورهای سرعت بر حسب متر بر ثانیه

شکل ۴ نشان می دهد که فرض جریان آرام در سیستم کاملا منطقی و صحیح به نظر می رسد. برای رصد کردن پدیده جابجایی آزاد درون پیش گرم کن بایستی بردارهای سرعت و کانتورهای دما را مورد مطالعه قرار دهیم. شکل ۵ کانتورهای دما در سیستم را نشان داده است. همان طور که مشاهده می شود در اوائل ورودی پیش گرم کن، دما به مقدار حداکثر خود یعنی ۴۰۰ درجه سانتی گراد که روی دیواره اعمال شده است، می رسد (در ۱۵ سانتی متر اول)؛ لذا استفاده از دیگر هیترها منطقی به نظر نمی رسد و باعث هدر روی انرژی بدون کارکرد مفید می شود. در قسمت انتهایی پیش گرم کن که هیتر وجود ندارد و با محیط تبادل گرما دارد، دما به شدت افت پیدا کرده است و تا ۴۰۰ درجه کلون نیز رسیده است. این امر بسیار نامطلوب تلقی می شود؛ زیرا وظیفه پیش گرم کن رساندن دمای هیدروژن تا ۶۷۳ درجه کلون در خروجی آن است. بهترین پیشنهاد این است که فقط قسمت انتهایی پیش گرم کن به یک هیتر ۱۰ تا ۲۰ سانتی متری مجهز شود. با این عمل دمای خروجی هیدروژن به ۴۰۰ درجه سانتی گراد خواهد رسید و از اتلاف حرارت جلوگیری خواهد شد.



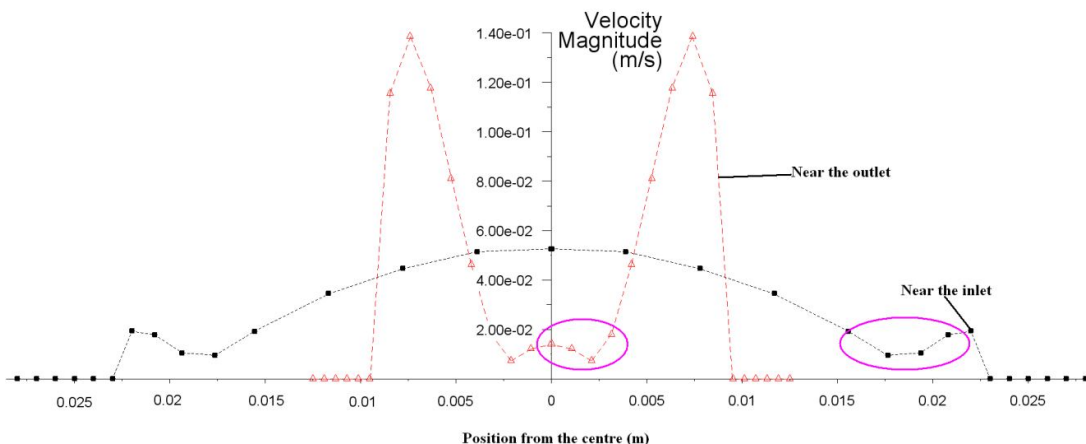
شکل ۵. کانتورهای دما بر حسب درجه کلون

بررسی بردارهای سرعت پدیده جالبی را گوشزد می کند و آن این که پدیده جابجایی آزاد داخل پیش گرم کن اتفاق می افتد و یک جریان معکوس در خلاف جهت حرکت سیال پدید می آید. دلیل اصلی این پدیده اختلاف دانسیته سیال بر اثر افزایش یا کاهش دما است. در قسمت ورودی جریان معکوس در کناره های دیواره که دمای بیش تری دارد اتفاق افتاده است؛ حال آن که جریان اصلی از وسط خط لوله حرکت می کند. در قسمت انتهایی پیش گرم کن که اندازه قطر آن باریک تر است، پدیده درست عکس ورودی است. در واقع جریان معکوس سعی می کند از مرکز خط لوله به طرف ورودی حرکت کند حال آن که جریان اصلی از کناره ها به سمت خروجی در حرکت است. دلیل این امر نیز کاملا روشن است. در قسمت انتهایی هیتری برای گرم کردن سیال وجود ندارد و دیواره با محیط پیرامون در حال تبادل حرارت است؛ در نتیجه مرکز لوله گرم ترین بخش است. شکل ۶ پدیده جابجایی آزاد در سیستم را توسط بردارهای سرعت نشان داده است. جهت این بردارها نمایشگر جهت حرکت سیال در سیستم است.



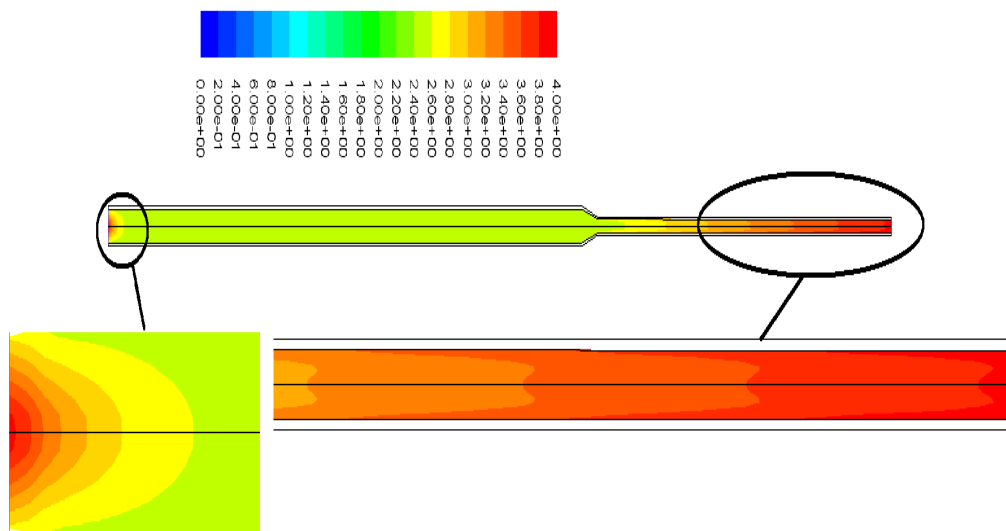
شکل ۶. بردارهای سرعت (نواحی جابجایی آزاد و جریان معکوس با بیضی قرمز رنگ نشان داده شده اند)

برای درک عمیق تر از پدیده جریان معکوس، پروفایل سرعت سیال را در دو منطقه فوق بررسی می کنیم. شکل ۷ این پروفایل سرعت را نشان داده است. نواحی جریان معکوس در شکل با بیضی نشان داده شده است. این شکل کلیه نتایج قبلی را به صورت کمی تایید و توجیه می نماید.



شکل ۷. پروفایل سرعت در دو سطح مقطع انتخابی نزدیک ورودی و خروجی پیش گرم کن (نواحی جابه جایی آزاد و جریان معکوس با بیضی صورتی رنگ نشان داده شده اند)

کانتورهای دانسیته در سیستم نیز نتیجه فوق را تایید می کنند. در یک سطح مقطع خاص دانسیته هیدروژن در وسط پیش گرم کن کم تر از نزدیک دیواره است؛ البته در قسمت انتهایی آن و در قسمت ورودی، دانسیته در نزدیک دیواره کمتر از وسط است. این واقعیت که باعث پدیده جابجایی آزاد می شود، در شکل ۸ نشان داده شده است.

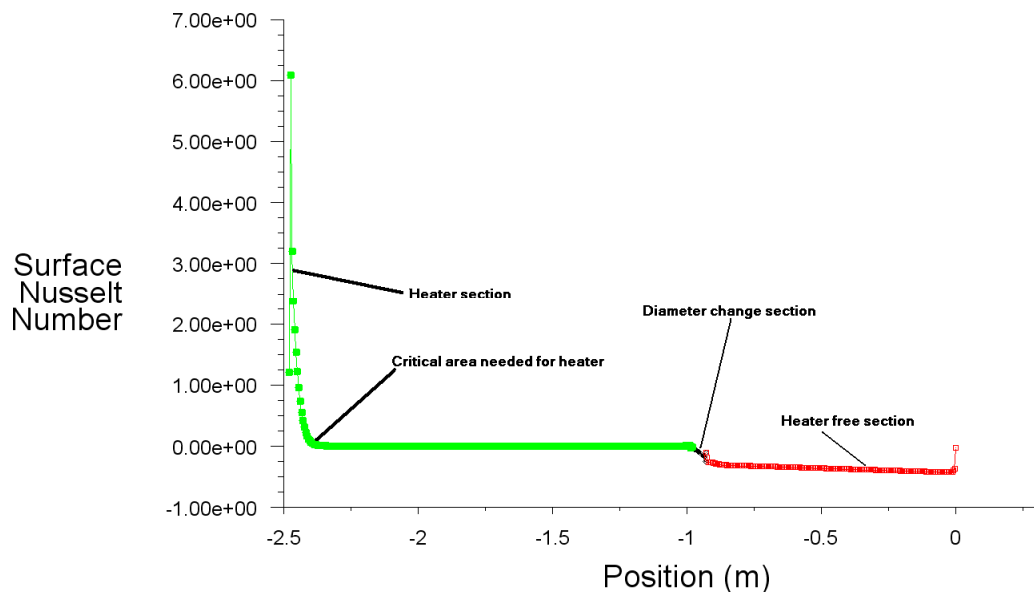


شکل ۸. کانتورهای دانسیته هیدروژن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

برای درک بهتر و عمیق تر از فرایند انتقال حرارت می توان عدد بدون بعد ناسلت<sup>۱</sup> موضعی را به عنوان تابعی از موقعیت دیواره پیش گرم کن بدست آورد. عدد ناسلت به صورت زیر تعریف شده است:

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (۱۹)$$

نمودار عدد ناسلت موضعی بر حسب موقعیت دیواره پیش گرم کن در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. عدد ناسلت موضعی بر حسب موقعیت دیواره

شکل ۹ نشان می دهد که عدد ناسلت در قسمت هیترها عددی مثبت است؛ یعنی به سیستم حرارت داده می شود و در قسمتی که در معرض هوای محیط است، این عدد مقادیر منفی از خود نشان می دهد یعنی سیستم حرارت از دست می دهد. از بررسی بیش تر این نمودار متوجه می شویم که بیش ترین نرخ انتقال حرارت در اوایل ورودی وجود دارد که عدد ناسلت به مقدار ۶ نزدیک شده است. بیشینه عدد ناسلت که شبیه سازی نشان می دهد عدد ۶ است که در فاصله ۵ میلی متری از ورودی افتاده است. برای معتبر سازی بیش تر نتایج می توان این عدد را با روابط تجربی موجود مقایسه نمود. چون جریان آرام در لوله حاکم است، لذا ضریب عدد ناسلت طبق روابط تجربی همه جا ثابت و برابر  $3/65$  است؛ بجز در نواحی ورودی لوله که از عدد ۱۵ به  $3/65$  با افزایش طول نزول پیدا می کند [۱۰-۱۲]. عدد ناسلت متوسط در شبیه سازی ۵/۴۵ را نشان می دهد که نشان می دهد شبیه سازی با روابط تجربی توافق کامل دارد. علت بالاتر بودن عدد ناسلت متوسط به دست آمده از شبیه سازی ها به بحث پرکن های موجود در پیش گرم کن بر می گردد. به

<sup>۱</sup>Nusselt number

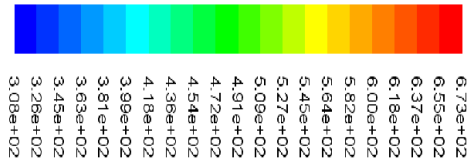
علاوه این که عدد  $3/65$  برای جریان آرام کاملاً توسعه یافته گزارش شده است؛ در صورتی که شبیه سازی نشان می‌دهد که در ابتدای لوله پیش گرم کن گرادیان معکوس فشار نیز وجود دارد و جریان ابتدا توسعه یافته نیست. به هر شکل شایان ذکر است که اگر انتقال حرارتی در سیستم وجود داشته باشد، در جریان آرام توسعه یافته عدد ناسلت برابر  $3/65$  است و چنان چه انتقال حرارتی وجود نداشته باشد اصولاً این عدد بدون بعد صفر خواهد بود. شکل ۹ کلیه موارد بالا را تایید می‌کند. برای اعتبار سنجی بیش تر نتایج حاضر را با نتایج گزارش شده در مرجع [۱۰] برای ابتدای ورودی لوله مقایسه می‌کنیم. نتایج تجربی نشان می‌دهند که پس از طی ۵ میلی متر از ابتدای خط لوله عدد ناسلت دقیقاً عدد ۴ را نشان می‌دهد که مطابق با عدد ۶ به دست آمده از شبیه سازی است. پس از طی تقریباً ۱۲ سانتی متر عدد ناسلت به طور ناگهانی افت پیدا کرده و نرخ انتقال حرارت صفر می‌شود؛ زیرا دمای سیال به دمای دیواره رسیده است و گرادیان دما وجود ندارد و لذا انتقال حرارتی انجام نمی‌شود. در واقع سیستم دیگر هیچ گرمایی دریافت نخواهد کرد. این امر در عمل ممکن است موجب وارد آمدن خسارت به هیترها شود و آن‌ها را از عملیات خارج نماید؛ زیرا منجر به تجمع حرارت درون هیترها می‌شود و با بالا رفتن دمای آن‌ها، مدارهای الکتریکی آن‌ها از بین خواهد رفت. مضافاً این که استفاده از این هیترها بعد از ۱۲ سانتی‌متر به لحاظ صرفه جویی در مصرف انرژی صحیح به نظر نمی‌رسد. نتیجه این که تنها اگر ۱۲ سانتی متر از دیواره یک هیتر قرار دهیم که دمای سطح دیواره را بتواند به  $400$  درجه سانتیگراد برساند، دمای هیدروژن به  $400$  درجه سانتیگراد خواهد رسید و در ادامه با عایق کاری مناسب می‌توان این دما را حفظ نمود. در واقع باید شیب نمودار را در قسمت بعد از هیترها به صفر رساند تا انتقال حرارت به محیط اطراف کمینه مقدار خود را داشته باشد. برای این منظور می‌توان این بخش از پیش گرم کن را عایق بندی نمود.

### عایق بندی قسمت عاری از هیتر

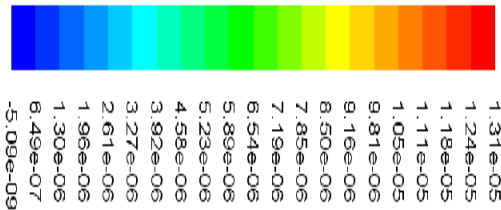
همان طور که در بخش قبلی گفته شد، عمده هدف پیش گرم کن رساندن دمای سیال به  $400$  درجه سانتی گراد است. شرایط قبل مشخص کرد که در قسمت عاری از هیتر انتقال حرارت جابجایی با محیط مانع از تحقق این هدف می‌شود. یک راه حل سریع که ابتدا به نظر می‌رسد، عایق کردن این قسمت از پیش گرم کن است. با این فرض نتایج شبیه سازی را بررسی می‌نماییم. در واقع فرض بر این است که از مناطق عایق شده (مناطق که هیتر وجود ندارد) هیچ گونه انتقال حرارتی با محیط انجام نمی‌شود. شکل ۱۰ کانتورهای دما در سیستم مذکور را نشان داده است.

همان طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد در این حالت در همان  $30$  سانتی متر ابتدایی دمای هیدروژن به مقدار مطلوب رسیده است و به دلیل عایق بودن سیستم، این دما تا انتها حفظ می‌شود. دمای خروجی در این حالت همان  $400$  درجه سانتی گراد است. این شبیه سازی اثبات می‌کند که استفاده از تمامی هیترها هیچ لزومی ندارد و می‌توان با یک هیتر  $30$  سانتی متری به دمای مطلوب رسید مشروط بر این که از انتقال حرارت سیستم با محیط در ادامه به نحوی جلوگیری شود. بردارهای سرعت در این قسمت نشان می‌دهند که با این شرایط جابجایی آزاد در ناحیه باریک پیش گرم کن به کلی حذف می‌شود و فقط یک

جریان معکوس در اوایل ورودی وجود دارد. در این شرایط انتظار داریم که الگوی کانتورهای فشار منظم شوند و چون جریان معکوس در پیش گرم کن نداریم لذا گرادیان فشار معکوس نیز در سیستم نخواهیم داشت. شکل ۱۱ این واقعیت را تایید می نماید.



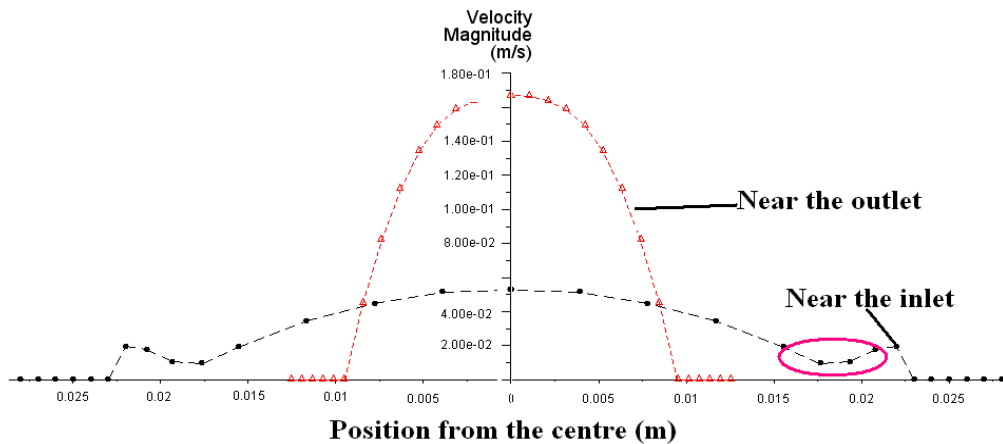
شکل ۱۰. کانتورهای دما بر حسب درجه کلون



شکل ۱۱. کانتورهای فشار بر حسب اتمسفر که میبایست با فشار عملیاتی ۶۹ اتمسفر جمع شوند

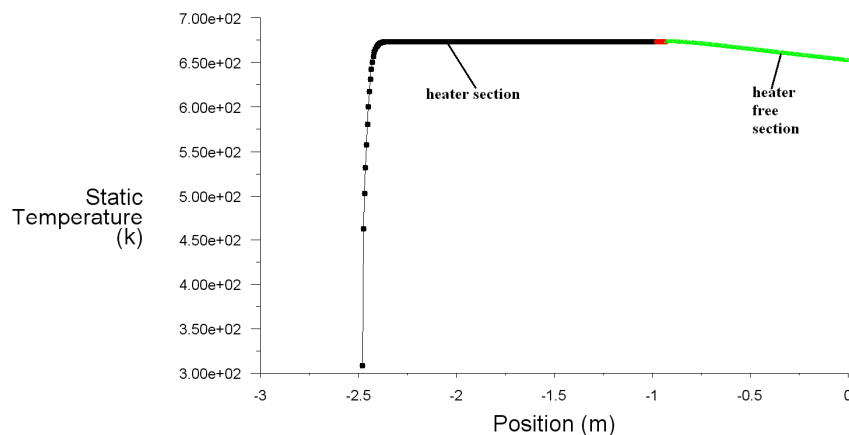
این نحوه عبور سیال نسبت به شبیه سازی اول مزیت های زیادی دارد زیرا در آن جریان معکوس که باعث انتقال حرارت بین سیال سرد و گرم می شود، وجود ندارد و جریان تقریباً پیوسته است. شکل ۱۲ پروفایل سرعت را در همان دو مقطع شکل ۷ نشان داده است.

شکل ۱۲ نشان می دهد که جریان معکوس در قسمت انتهایی پیش گرم کن وجود ندارد و جریان در حالت نرمال خود در حال خروج از پیش گرم کن می باشد. در قسمت ورودی همچنان جریان معکوس جابجایی آزاد دیده می شود. در این بخش فرض شده است که عایق دور پیش گرم کن ایده آل است و هیچ گرمایی را از خود عبور نمی دهد که در عمل چنین عایقی وجود ندارد. اکنون فرض می کنیم در ناحیه عاری از هیتر ۴ سانتی متر عایق پشم شیشه با دانسیته ۱۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۴ وات بر متر بر کلون و ظرفیت حرارتی ۶۶۰ ژول بر کیلوگرم بر کلون وجود داشته باشد.



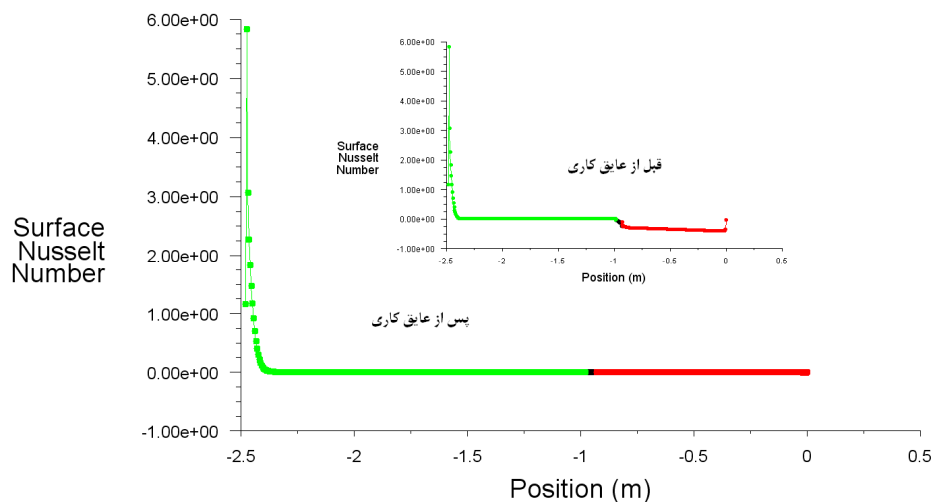
شکل ۱۲. پروفایل سرعت در دو سطح مقطع انتخابی نزدیک ورودی و خروجی پیش گرم کن (ناحیه جابجایی آزاد و جریان معکوس با بیضی صورتی رنگ نشان داده شده اند)

شبيه سازی در این بخش نشان می دهد که افت دما در ناحیه عایق اگرچه وجود دارد اما مقدار آن ناچیز است. در واقع دمای هیدروژن خروجی از پیش گرم کن حدود ۶۴۷ درجه کلوین یا ۳۷۴ درجه سانتی گراد است. در واقع ۲۶ درجه سانتی گراد افت دمایی در این ناحیه وجود دارد. شکل ۱۳ پروفایل دمای هیدروژن را در مرکز پیش گرم کن بر حسب فاصله نشان داده است. همان طور که نشان داده شده است پس از طی ۱۲ سانتی متر از ورودی، سیال به دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد خواهد رسید اما در ادامه بر اثر انتقال حرارت با محیط، دمای آن به ۳۷۴ درجه سانتیگراد افت پیدا کرده است. عدد ناسلت موضعی به عنوان تابعی از موقعیت، مشابه شکل ۹ در شکل ۱۴ آورده شده است. از این شکل کاملاً مشخص است که از شیب عدد ناسلت موضعی در ناحیه عایق کاری کاسته شده است و در نتیجه به هدف مورد نظر نزدیک تر شده است. جدول ۱ خلاصه نتایج دمای خروجی هیدروژن در اجراهای متفاوت (در شرایط بدون عایق و عایق بندی بخش بدون هیتر) را نشان می دهد.



شکل ۱۳. پروفایل دما در مرکز پیش گرم کن بر حسب فاصله





شکل ۱۴. مقایسه عدد ناسلت موضعی بر حسب موقعیت دیواره در دو حالت قبل و بعد از عایق کاری

#### جدول ۱. دمای خروجی هیدروژن تحت شرایط مختلف عایق بندی

شماره اجرا	شرح اجرا	دمای خروجی هیدروژن (°C)
۱	جابجایی با محیط پیرامون در مناطق عاری از هیتر	۱۶۴
۲	عایق ایده آل در مناطق عاری از هیتر	۴۰۰
۳	عایق پشم شیشه با ضخامت ۴ سانتی متر	۳۷۴
۴	عایق پشم شیشه با ضخامت ۲ سانتی متر	۳۵۵
۵	عایق پشم شیشه با ضخامت ۵ سانتیمتر	۳۷۹

جدول ۱ نشان می دهد که عایق بندی و نحوه کارگزاری عایق بسیار مهم و سرنوشت ساز است. لذا برای استحصال دماهای بالاتر هیدروژن، می بایست با دقت و وسواس بیشتری عایق بندی قسمت انتهایی پیش گرم کن انجام شود. پیشنهاد می شود از عایق پشم شیشه یا عایقی با ضریب هدایت حرارتی کم تر با ضخامت ۵ سانتی متر برای عایق بندی این بخش استفاده شود. بهترین عملکرد این است که در قسمت انتهایی پیش گرم کن یک هیتر قرار دهیم و هیترهای ابتدای آن را به کلی حذف کنیم.

#### نتیجه گیری

شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی پیش گرم کن طراحی شده هیدروژن انجام شده است. در ابتدا با در نظر گرفتن رژیم جریان آرام در پیش گرم کن بهینه سازی هیدرو دینامیکی مد نظر قرار گرفته است. تابع هدف مورد نظر یکنواخت شدن پروفایل جریان و جلوگیری از گرادیان فشار معکوس است. نتایج نشان می دهند که اگر در قسمت انتهایی پیش گرم کن هیتری وجود نداشته باشد، دو ناحیه جریان معکوس در پیش گرم کن به وجود می آیند که باعث اتلاف حرارتی سیال می شوند. به هر صورت در این حالت دمای

سیال خروجی هرگز به مرز ۴۰۰ درجه سانتی گراد نمی رسد و مقدار آن حدود ۱۶۰ درجه سانتی گراد خواهد بود که ابدا دمای مناسبی برای آغاز واکنش های کاتالیستی به شمار نمی رود. اگر چنانچه منطقه عاری از هیتر با یک عایق ایده آل عایق بندی شود، دمای خروجی ۴۰۰ درجه سانتی گراد خواهد بود. نتایج نشان می دهند که تعداد ۴ هیتر در بخش بالا دست پیش گرم کن مورد نیاز نیست و تنها یک هیتر دمای مورد نظر را در کم تر از ۱۵ سانتیمتر اول به دست می دهد. عایق کردن مناطق عاری از هیتر جریان برگشتی در پایین دست پیش گرم کن را به کلی از بین می برد. در ادامه از آنجایی که عایق ایده آل وجود ندارد، شرایط مختلفی برای عایق بندی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بیانگر این است که استفاده از عایق پشم شیشه معمولی با ضخامت ۵ سانتیمتر دمای هیدروژن را تا حد مطلوب خواهد رساند. بهترین پیشنهاد این است که کلیه هیترها از سیستم حذف شوند و فقط در قسمت انتهایی پیش گرم کن یک هیتر قرار داده شود. در این صورت نیازی به عایقکاری نیست و از نقطه نظر اقتصادی مقرون به صرفه ترین گزینه محسوب می شود.

### تشکر و قدردانی

از زحمات پرسنل گروه آزمایشگاه مرجع و نیمه صنعتی پژوهشگاه صنعت نفت جهت ارائه اطلاعات مورد نیاز برای مدل سازی پیش گرمکن در این تحقیق قدردانی می گردد.

### منابع

1. Rana M. S., mano V. S., Ancheyta J., Diaz J.A.I., A review of recent advances on process technologies for upgrading of heavy oils and residua, Fuel 86, 2007, pp. 1216–1231
2. Zarkesh J., Ghaedian M., Hashemi R., Khademsamimi A., Kadzhiev S., Heavy Refinery Schemes based on New Nano Catalytic HRH Technology, IPCBEE vol. 23, 2011, IACSIT Press, Singapore
3. "Process for hydroconverting of a heavy hydrocarbonaceous feedstock", United State Patent No. US7585406 B2, Sep. 2009
۴. رسول محمدیخواه، سرود زاهدی، مهدی احمدی مروست، حمید گنجی، شبیه سازی هیدرودینامیکی و انتقال حرارت رآکتورهای تبدیل کاتالیستی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، فصلنامه علمی پژوهشی پژوهش نفت، جلد ۷۳، ۲۵-۴۴، ۱۳۹۲.
5. R. Mohammadikhah, S. Zahedi Abghari, M. Ahmadi-Marvast, H. Ganji, CFD simulation of catalytic naphtha reforming process, 7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition, Kish Island, 2010, Iran.
6. R. Mohammadikhah, H. Ganji, M. Ahmad i-Marvast, S. Zahedi Abghari, Turbulence model inspection for hydrodynamics of naphtha catalytic reactors, , 7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition, Kish Island, 2010, Iran.
7. Fluent 6.3 manual, FLUENT. Inc, USA, 2006.
8. Nayyar I., Mohinder L., Piping Handbook, 7th Ed, Mc Graw Hill, New York, 2000.



9. Perry R. H., Green D. W., Perry's chemical engineering handbook, 7th Ed, Mc Graw Hill, Newyork, 1997.
10. Kays, W. M, Convective heat and mass transfer, 99. pp. 187-190. New York, Mc Graw-Hill, 1966.
11. Sellars. J. R, M. Tribus, J. S. Klein, Heat transfer to laminar flows in a round tube or flat conduit, Trans.ASME, vol78,pp .441, 1956.
12. J. P. Holman, Heat transfer, 9th ed. New York, Mc Graw-Hill, 2002.