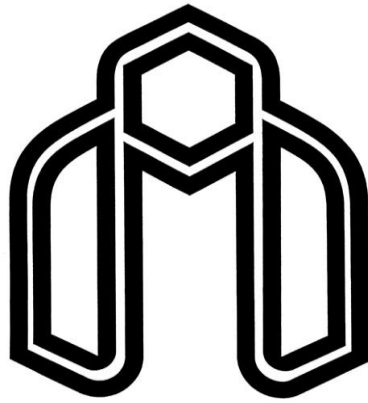


الله أكبر



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل CFD علل تخریب تیوب‌های WHB کوره واکنش واحد بازیافت گوگرد

مهرداد پورمقدم

اساتید راهنما :

دکتر محمد محسن شاه مردان

دکتر یعقوب بهجت

زمستان ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهرداد پورمقدم

تحت عنوان:

تحلیل CFD علل تخریب تیوب‌های WHB کوره واکنش واحد بازیافت گوگرد

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ۱۶/۸۵ مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : محمد محسن شاه مردان
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : یعقوب بهجت

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر اکبرزاده		نام و نام خانوادگی : دکتر چهارطاقی
			نام و نام خانوادگی : دکتر کیهانی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

به نام خالق زیبایی‌ها

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. تقدیم به پدر و مادرم که از نگاهشان صلابت، از رفتارشان محبت و از صبرشان ایستادگی را آموختم. آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم.

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربرار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته‌شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه‌های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

و به تمام آزاد مردانی که نیک می‌اندیشند و عقل و منطق را پیشه خود نموده و جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، هدفی ندارند. دانشمندان، بزرگان، و جوانمردانی که جان و مال خود را در حفظ و اعتلای این مرز و بوم فدا نموده و می‌نمایند. آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم، موهایشان سپید شد تا ما رو سپید شویم و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند.

پدرانمان، مادرانمان، استادانمان

تعهد نامه

اینجانب **مهرداد پورمقدم** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل CFD علل تخریب تیوب-های WHB کوره واکنش واحد بازیافت گوگرد تحت راهنمایی دکتر محمد محسن شاهمردان و دکتر یعقوب بهجت متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در پالایشگاه ایلام محل اتصال بین تیوب‌ها و تیوب‌شیت دیگ بازیافت حرارتی در واحد بازیافت گوگرد به علت نامعلومی تخریب شده و پس از چهار بار تعمیر باز هم این پدیده صورت گرفته است. این پایان‌نامه بر اساس مرتفع‌سازی این مشکل تعریف شده است و مکان دقیق تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی حاصله را مکانیابی می‌کند و در پایان راه حل‌های مناسب ارائه داده شده است.

جداسازی ناخالصی‌های گازها از نقطه نظر ایمنی، کنترل خوردگی، تنظیم ترکیب استاندارد محصولات گاز و مایع، جلوگیری از مسمومیت کاتالیزورهای کارخانه‌های دریافت کننده محصولات گاز یا مایع و بالاخره حد مجاز انتشار مواد آلاینده به محیط زیست الزامی می‌باشد.

واکنش اصلی کلاوس^۱ بر پایه اکسیداسیون سولفید هیدروژن با هوا (اکسیژن) در حضور کاتالیست (بوکیست) در یک راکتور یک مرحله‌ای می‌باشد. محصولات این واکنش گوگرد عنصری و آب است. در این واکنش فرض شده است هیچ ناخالصی و مواد مزاحم وجود ندارد. با توجه به اینکه درصد تبدیل گوگرد تابع دما می‌باشد، معمولاً تا ۷۰ درصد از کل واکنش در این مرحله تکمیل می‌گردد. بنابراین غیر از مرحله احتراق یک مرحله یا چند مرحله کاتالیستی نیز مورد نیاز می‌باشد. گوگرد تولیدی بعد از مرحله احتراق و مراحل کاتالیستی باید به منظور پیشرفت واکنش کندانس شده و از جریان جدا گردد.

به جهت جذب حرارت تولید شده در کوره واکنش و مایع کردن گوگرد، همچنین بالا بردن راندمان واحد، گازهای حاصله، پس از کوره واکنش وارد دیگ بخار^۲ می‌شوند. معمولاً در بیشتر واحدهای جدید بازیافت گوگرد با روش کلاوس، مبدل بازیافت حرارت و کوره واکنش در یک مخزن با یکدیگر ترکیب شده‌اند. گازهای خروجی از کوره واکنش با درجه حرارتی حدود 840°C از لوله‌های داخلی مبدل بازیافت حرارت که از نوع پوسته و لوله می‌باشد عبور نموده و گرمای خود را صرف تولید بخار

^۱ Clause

^۲ Waste Heat Boiler

آب می‌نمایند. در این مرحله ۱۵ درصد از کل گوگرد تولیدی به دست می‌آید.

این مبدل گرمایی که با بخار فشار متوسط تولیدی خود به عنوان یک بویلر قابل توجه عمل نموده و نیروی محرکه دمنده‌های هوای واحد را تأمین می‌کند، دارای پوسته از جنس کربن استیل بوده که فشار و دمای عملیاتی آن به صورت $21/02 \text{ psia}$ و 210°C می‌باشد. لوله دو اینچی از نوع کربن استیل در داخل این پوسته قرار گرفته که دارای دما و فشار عملیاتی 840°C و $1/31 \text{ psia}$ می‌باشد. دمای خروجی از تیوب‌های مبدل در شرایط عملیاتی 240°C است.

با توجه به دماهای موجود، توزیع گوگرد که در محفظه کوره واکنش به فرم S_{1-2} بوده به S_{7-8} تبدیل خواهد شد. گوگرد جدا شده در انتهای WHB^1 به صورت مایع به مخزن گوگرد هدایت می‌شود. جهت جلوگیری از بیش از حد گرم شدن تیوب‌های WHB به علت کم بودن ضخامت آن، ورودی لوله‌های ۲ اینچی با استفاده از حلقه‌های سرامیکی در مقابل حرارت محافظت می‌شود. عموماً به هنگام استارت و افزایش و کاهش درجه حرارت کوره، حلقه‌ها ترک خورده و در نتیجه آن گازهای داغ فرآیند باعث دمای بیش از حد دهانه لوله‌ها و نیز تخریب سولفیدی آن می‌گردد که سرانجام منجر به تخریب لوله و نیز نشت آب تغذیه به درون لوله‌ها می‌شود، بنابراین بایستی در نصب این حلقه‌ها و نیز پوشاندن کل صفحه لوله توسط سیمان نسوز بسیار دقت گردد.

در این پایان نامه به بررسی تنش‌ها و کرنش‌های حاصله از دمای بالای گازهای ورودی به دیگ بازیافت حرارتی بر روی تیوب‌شیت، تیوب و جوش بین تیوب و تیوب‌شیت پرداخته شده است. با اطلاعات دقیقی که از گزارش پالایشگاه ایلام اخذ شده است مدلسازی کاملاً بر اساس واقعیت انجام شده است. تغییر طول تیوب و تیوب‌شیت یکی از مهمترین نتایج این پایان نامه می‌باشد زیرا دلیل اصلی این تخریب‌ها انبساط و تغییر طول تیوب و تیوب‌شیت بر اثر حرارت بالای گازهای ورودی به دیگ بازیافت حرارتی می‌باشد. مدلسازی انجام شده به دو صورت دوبعدی برای پدیده جوشش آب روی دیواره بیرونی تیوب و سه‌بعدی برای به دست آوردن تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی و همچنین

¹ Waste Heat Boiler

تغییر طول می‌باشد. در تحقیقات پیشین مدلسازی‌ها به صورت دو بعدی بوده و نتایج از دقت کمتری برخوردار بوده است. نتایج مدلسازی سه بعدی خیلی دقیقتر از جواب‌های مدل دو بعدی می‌باشد. با توجه به شرایط موجود این نتایج کاملاً با نتایج تجربی مطابقت دارد. بیشترین نیرو و تغییر طول تیوب در ناحیه اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت دیده شده و جوش بین آنها تخریب می‌شود.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

**Pourmoghadam M., Behjat Y. *, Shahmardan M.M., (۲۰۱۴) “ CFD
Investigation Of Heat Transfer And Thermal Stress Of Sulfur Recovery Unit
Waste Heat Boiler ”, IChEC[^], Kish, Iran**

فهرست مطالب

۱	اول مقدمه	۱
۱-۱	کلیات	۲
۱-۱-۱	مختصری در مورد گوگرد و خواص آن	۳
۱-۱-۲	خصوصیات قابل توجه	۳
۱-۱-۳	کاربردها	۴
۱-۱-۴	پیدایش	۴
۱-۱-۵	هشدارها	۵
۱-۱-۶	ترکیبات گوگردی	۵
۲-۱	تاریخچه	۵
۱-۲-۱	فرآیندهای شیرین‌سازی در بسترهای جامد	۶
۲-۲-۱	فرآیند شیرین‌سازی با حلال‌های شیمیایی	۷
۱-۲-۲-۱	فرآیند آمینی :	۷
۳-۱	فرآیندهای مختلف بازیافت گوگرد	۸
۱-۳-۱	فرآیند پروکس	۱۰
۲-۳-۱	فرآیند گیلمارکور – وتروکوک	۱۰
۳-۳-۱	فرآیند فروکس	۱۱
۴-۳-۱	فرآیند گلود	۱۲
۵-۳-۱	فرآیند منچستر	۱۲
۶-۳-۱	فرآیند استرتفورد A.D.A	۱۳
۱-۶-۳-۱	مزایای فرآیند استرتفورد A.D.A	۱۴
۷-۳-۱	فرآیند تیلوکس	۱۴
۸-۳-۱	فرآیند سولفروکس	۱۵
۹-۳-۱	فرآیند لاسی – کلر	۱۶
۱۰-۳-۱	فرآیند تونسند	۱۷
۱۱-۳-۱	فرآیند شل سولفولان	۱۸
۱۲-۳-۱	فرآیند فریبورت	۱۸
۱۳-۳-۱	فرآیند کلاوس	۱۸

۴-۱	روش‌های مختلف فرآیند کلاوس	۲۱
۱-۴-۱	روش اصلی	۲۲
۲-۴-۱	روش جریان اسپلایت	۲۲
۵-۱	شرح مختصر جریان گاز اسیدی در واحدهای بازیافت گوگرد	۲۲
۱-۵-۱	دیگ بازیافت حرارت WHB	۲۳
۲	فصل دوم مروری بر کارهای پیشین	۲۷
۱-۲	کلیات	۲۸
۲-۲	کارهای انجام شده در سال‌های اخیر	۳۴
۳-۲	جمع‌بندی کارهای قبلی و نوآوری این پایان نامه ارشد	۴۸
۳	فصل سوم معادلات حاکم	۴۹
۱-۳	کلیات	۵۰
۲-۳	روش‌های گسسته‌سازی	۵۱
۳-۳	مزایای استفاده از CFD	۵۲
۴-۳	شناخت جریان‌های دو فازی	۵۳
۳-۴-۱	جریان دو فازی جامد-گاز	۵۵
۳-۴-۲	جریان دو فازی جامد-مایع	۵۵
۳-۴-۳	جریان سه فازی	۵۶
۵-۳	جوشش	۵۸
۱-۵-۳	انواع جوشش	۵۹
۲-۵-۳	منحنی جوشش	۶۰
۳-۵-۳	شیوه‌های جوشش استخری	۶۱
۱-۳-۵-۳	جوشش با جابه‌جایی آزاد	۶۱
۲-۳-۵-۳	جوشش هسته‌ای	۶۱
۳-۳-۵-۳	جوشش انتقالی (گذار)	۶۲
۴-۳-۵-۳	جوشش فیلمی استخری	۶۳

۵-۳-۵-۳	جوشش با جابه جایی اجباری.....	۶۵
۶-۳-۵-۳	جوشش با جابه جایی اجباری خارجی.....	۶۶
۶-۳	جریان دوفازی.....	۶۷
۱-۶-۳	معادلات حاکم و مدل سازی	۶۷
۷-۳	مدل های آشفته گی	۶۹
۱-۷-۳	تقسیم بندی مدل های آشفته گی.....	۷۰
۲-۷-۳	مقدمه ای بر انواع مدل های آشفته گی.....	۷۱
۳-۷-۳	معادلات جریان	۷۲
۴-۷-۳	مدل های آشفته گی.....	۷۵
۱-۴-۷-۳	مدل $k - \epsilon$ استاندارد	۷۵
۸-۳	حل عددی تنش حرارتی	۷۷
۹-۳	دیدگاه مدل سازی جریان های چندفازی	۷۸
۱-۹-۳	مدل مخلوط	۸۰
۴	فصل چهارم روش تحقیق و نتایج	۸۱
۱-۴	مقدمه	۸۲
۲-۴	تشریح مسئله	۸۴
۱-۲-۴	استقلال از شبکه	۸۴
۲-۲-۴	مدل سازی دو بعدی	۸۵
۳-۲-۴	مدل سازی سه بعدی پروفیل دمای دیواره	۹۴
۴-۲-۴	مدل سازی دو بعدی جوشش	۹۵
۵-۲-۴	مدل سازی سه بعدی تنش	۱۰۶
۳-۴	ارزیابی صحت نتایج	۱۱۳
۴-۴	جمع بندی	۱۱۵
۵-۴	پیشنهادهات	۱۱۷
منابع		۱۱۹
Abstract		۱۲۱

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) : شماتیکی از کوره واکنشی SUR و مبدل بازیافت حرارت WHB [۸] ۳۰
- شکل (۲-۲) : ترک و نشتی‌های پدید آمده بین تیوب و تیوب شیت [۹] ۳۰
- شکل (۳-۲) : نشتی آب از فلنج بین کوره و WHB [۹] ۳۱
- شکل (۴-۲) : رسیدن لوبیایی پایه های سدل به انتهای کورس و ترک روی فوندانسیون [۹] ۳۲
- شکل (۵-۲) : نمونه‌هایی از تعمیر و جوشکاری مجدد [۹] ۳۳
- شکل (۶-۲) : جوشکاری با الکتروود جدید (DR ۷۰S۶) و تجهیز سدل‌های زیر WHB از لغزشی به غلطشی [۹] ۳۳
- شکل (۷-۲) : آسیب‌های پدید آمده جوش بین تیوب و تیوب شیت برای بار سوم بعد از تعمیرات [۹] ۳۴
- شکل (۸-۲) : تنش‌های باقیمانده: الف) شعاعی ب) محوری ج) حلقه‌ای د) فون مایزرز [۱۰] ... ۳۵
- شکل (۹-۲) : شکاف‌های پدید آمده بر روی جوش و تیوب [۱۱] ۳۶
- شکل (۱۰-۲) : مثال از شکاف‌های پدید آمده بر روی جوش و تیوب و تیوب شیت [۱۲] ۳۷
- شکل (۱۱-۲) : تنش‌ها و تغییر شکل‌های حاصل شده از شبیه‌سازی [۱۳] ۳۸
- شکل (۱۲-۲) : الف) ترک ایجاد شده در هنگام تست آب ب) ترک ایجاد شده پس از تست آب [۱۴] ۳۹
- شکل (۱۳-۲) : توزیع تغییر شکل و تنش فون مایزرز فین داخلی در دو حالت با بار حرارتی و بدون آن [۱۵] ۳۹
- شکل (۱۴-۲) : پیش‌بینی عددی توزیع دما درون تیوب: الف) $T_w = 80^{\circ}\text{C}$ ب) $qw = 80\text{kwm}^2$ [۱۶] ۴۰
- شکل (۱۵-۲) : جریان هوای اعمال شده به بدنه بیرونی تیوب سوپرهیت [۱۷] ۴۱

شکل (۱۶-۲) : تنش پسماند محوری روی الف) سطح داخلی ب) سطح بیرونی و مقایسه با نتایج

تجربی [۱۸] ۴۱

شکل (۱۷-۲) : الف) جریان حبابی ب) جریان قالبی یا تویی [۱۹] ۴۳

شکل (۱۸-۲) : الف) جریان موجی ب) جریان لخته‌ای [۱۹] ۴۳

شکل (۱۹-۲) : الف) جریان حلقوی ب) جریان لایه‌ای [۱۹] ۴۳

شکل (۲۰-۲) : توسعه فصل مشترک مایع و بخار (تشکیل حباب) و سرعت فرآیند فیلم جوشش

[۲۰] ۴۴

شکل (۲۱-۲) : الف) تغییرات عدد ناسلت بر حسب زمان ب) مقایسه مرز فازها قبل از تشکیل

حباب [۲۰] ۴۵

شکل (۲۲-۲) : مناطق ماکرو و میکرو مورد استفاده در مدلسازی [۲۱] ۴۶

شکل (۲۳-۲) : رشد و ادغام حباب در اختلاف دمای 25°C ، فضای بین نواحی فعال ۰/۵، عدد

دانسیته 54 و زمان انتظار ۰/۱ [۲۱] ۴۷

شکل (۱-۳) : نمونه‌ای از گسسته‌سازی میدان جریان در حالت یک بعدی [۲۲] ۵۲

شکل (۲-۳) : سیستم علامتگذاری برای روش حجم محدود [۲۲] ۵۲

شکل (۳-۳) : انواع جریان های چند فازی ۵۴

شکل (۴-۳) : جریان دو فازی جامد-گاز ۵۵

شکل (۵-۳) : جریان خون در رگ ۵۵

شکل (۶-۳) : جریان ۳ فازی در پمپ های بالا بر هوایی ۵۶

شکل (۷-۳) : حباب های گروه ۱ [۲۳] ۵۷

شکل (۸-۳) : حباب های گروه ۲ [۲۳] ۵۸

شکل (۹-۳) : جریان دراپلت [۲۳] ۵۸

شکل (۱۰-۳) : جوشش آب ۵۹

- شکل (۱۱-۳) : تشکیل حباب‌ها و تاثیر آنها بر سیال ۶۰
- شکل (۱۲-۳) : نمودار فازهای آب ۶۱
- شکل (۱۳-۳) : تقسیم بندی کلی مدل‌های آشفستگی [۲۳] ۷۱
- شکل (۱-۴) : شماتیکی از کوره واکنشی SUR و مبدل بازیافت حرارت (WHB) [۶] ۸۲
- شکل (۲-۴) : دیگ حرارتی ۸۳
- شکل (۳-۴) : شماتیک سه بعدی مدلسازی مورد بحث ۸۳
- شکل (۴-۴) : شرح شماتیک فرآیند در مدلسازی دوبعدی ۸۵
- شکل (۵-۴) : شبکه‌بندی مدلسازی دوبعدی با شبکه‌های ریز و دقیق ۸۶
- شکل (۶-۴) : پروفیل سرعت گازهای داغ ورودی به تیوب ۸۶
- شکل (۷-۴) : پروفیل حرارتی مدلسازی شامل گازهای داغ، تیوب و آب ورودی ۸۷
- شکل (۸-۴) : پروفیل تنش معادل فون مایرز ۸۸
- شکل (۹-۴) : پروفیل تنش نرمال در راستای محور X در قسمت اتصال تیوب و تیوب شیت ۸۸
- شکل (۱۰-۴) : پروفیل تنش برشی بین تیوب و تیوب‌شیت در صفحه XY ۸۹
- شکل (۱۱-۴) : پروفیل بیشترین تنش محوری بین تیوب و تیوب‌شیت ۸۹
- شکل (۱۲-۴) : پروفیل بیشترین تنش برشی بین تیوب و تیوب‌شیت ۹۰
- شکل (۱۳-۴) : پروفیل کرنش معادل کل در قسمت اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت ۹۰
- شکل (۱۴-۴) : پروفیل کرنش معادل الاستیک (فون مایرز) در قسمت جوش بین تیوب و تیوب شیت ۹۱
- شکل (۱۵-۴) : پروفیل کرنش نرمال الاستیک بین تیوب و تیوب‌شیت در راستای محور X ۹۱
- شکل (۱۶-۴) : پروفیل کرنش برشی الاستیک بین تیوب و تیوب‌شیت در صفحه XY ۹۱
- شکل (۱۷-۴) : پروفیل بیشترین کرنش محوری الاستیک بین تیوب و تیوب‌شیت ۹۲
- شکل (۱۸-۴) : بیشترین کرنش برشی الاستیک بین تیوب و تیوب‌شیت ۹۲

- شکل (۱۹-۴) : پروفیل کرنش حرارتی در قسمت جوش اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت..... ۹۳
- شکل (۲۰-۴) : پروفیل تغییر شکل تیوب در کل طول دیگ بازیافت حرارت..... ۹۳
- شکل (۲۱-۴) : شبکه مدل جهت مدلسازی..... ۹۴
- شکل (۲۲-۴) : پروفیل حرارتی تیوب و تیوب‌شیت..... ۹۵
- شکل (۲۳-۴) : روند توزیع دما در آب، تیوب و گازهای خروجی کوره..... ۹۵
- شکل (۲۴-۴) : نمودار پروفیل تغییرات دما روی تیوب در طول یک متر..... ۹۶
- شکل (۲۵-۴) : شماتیک دو بعدی پوسته بیرونی تیوب و شبکه آن..... ۹۷
- شکل (۲۶-۴) : پروفیل دمایی آب را در فرآیند جوشش در ثانیه ۰/۰۵..... ۹۸
- شکل (۲۷-۴) : حباب‌های بخار آب ایجاد شده روی دیواره بیرونی تیوب در ثانیه ۰/۰۱..... ۹۸
- شکل (۲۸-۴) : سیر تشکیل و رشد حباب‌های بخار آب روی دیواره بیرونی تیوب..... ۹۹
- شکل (۲۹-۴) : سیر تشکیل و رشد حباب‌های بخار آب روی دیواره بیرونی تیوب..... ۱۰۰
- شکل (۳۰-۴) : کسر حجمی بخار آب در حالت پایا..... ۱۰۰
- شکل (۳۱-۴) : نمودار نرخ جوشش آب و تولید بخار آب در کل مدلسازی..... ۱۰۱
- شکل (۳۲-۴) : نمودار نرخ جوشش آب و تولید بخار آب در انتهای مدلسازی..... ۱۰۱
- شکل (۳۳-۴) : نمودار دمای متوسط بخار آب خروجی در کل مدلسازی..... ۱۰۲
- شکل (۳۴-۴) : نمودار دمای متوسط بخار آب خروجی در انتهای مدلسازی..... ۱۰۲
- شکل (۳۵-۴) : پروفیل ضریب انتقال حرارت در قسمت پوسته بیرونی تیوب..... ۱۰۳
- شکل (۳۶-۴) : پروفیل تابع ضریب انتقال حرارت در قسمت پوسته بیرونی تیوب..... ۱۰۴
- شکل (۳۷-۴) : پروفیل عدد بی بعد ناسلت در طول تیوب..... ۱۰۵
- شکل (۳۸-۴) : پروفیل عدد بی بعد استانتون در طول دیواره خارجی تیوب..... ۱۰۵
- شکل (۳۹-۴) : پروفیل شار حرارتی کلی در طول دیواره بیرونی تیوب..... ۱۰۶
- شکل (۴۰-۴) : شبکه سه بعدی تیوب و تیوب‌شیت..... ۱۰۷

شکل (۴-۴۱) : پروفیل حرارتی تیوب و تیوب‌شیت.....	۱۰۷
شکل (۴-۴۲) : پروفیل کرنش حرارتی تیوب و تیوب‌شیت.....	۱۰۸
شکل (۴-۴۳) : پروفیل تنش معادل فون مایرز.....	۱۰۸
شکل (۴-۴۴) : پروفیل تنش برشی.....	۱۰۹
شکل (۴-۴۵) : پروفیل تنش برشی ماکزیمم.....	۱۰۹
شکل (۴-۴۶) : پروفیل بیشترین تنش محوری.....	۱۱۰
شکل (۴-۴۷) : پروفیل ضریب اطمینان بیشترین تنش معادل.....	۱۱۰
شکل (۴-۴۸) : پروفیل ضریب اطمینان بیشترین تنش برشی.....	۱۱۰
شکل (۴-۴۹) : پروفیل ضریب اطمینان بیشترین تنش کششی.....	۱۱۱
شکل (۴-۵۰) : پروفیل کرنش معادل کلی.....	۱۱۱
شکل (۴-۵۱) : پروفیل انرژی کرنش.....	۱۱۲
شکل (۴-۵۲) : پروفیل کرنش الاستیک معادل.....	۱۱۲
شکل (۴-۵۳) : پروفیل تغییر شکل کلی تیوب و تیوب‌شیت.....	۱۱۳
شکل (۴-۵۴) : ترک و نشی‌های پدید آمده بین تیوب و تیوب‌شیت [۹].....	۱۱۴
شکل (۴-۵۵) : نمونه‌هایی از تعمیر و جوشکاری مجدد [۹].....	۱۱۴
شکل (۴-۵۶) : (الف) ترک ایجاد شده در هنگام تست آب (ب) ترک ایجاد شده پس از تست آب	
[۱۴].....	۱۱۵

فهرست جداول

جدول (۱-۱): روش های مختلف فرآیند کلاوس اصلی.....	۲۱
جدول (۱-۳): از جمله موارد کاربرد جریان‌های چند فازي.....	۵۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱ کلیات

جداسازی ناخالصی‌های گازها از نقطه نظر ایمنی، کنترل خوردگی، تنظیم ترکیب استاندارد محصولات گاز و مایع، جلوگیری از مسمومیت کاتالیزورهای کارخانه‌های دریافت کننده محصولات گاز یا مایع و بالاخره حد مجاز انتشار مواد آلاینده به محیط زیست الزامی می‌باشد.

برخی از ناخالصی‌های موجود در گازها عبارت است از: نیتروژن، هیدروژن سولفور (H_2S)، دی اکسید کربن، کربن دی سولفاید (CS_2)، هلیوم، گوگرد، کربونیل سولفاید (COS)، مرکاپتان‌ها ($R-SH$) مانند متیل مرکاپتان و اتیل مرکاپتان، دی‌آلکیل سولفاید (R_2S) و آب می‌باشد. معمولاً بیشتر از همه این ناخالصی‌ها گازهای کربن دی‌اکسید (CO_2) و هیدروژن سولفور (H_2S) در گاز طبیعی یافت می‌شوند. این گاز طبیعی را به دلیل تشکیل ترکیبات اسیدی با مجاورت هیدروژن سولفور، ترکیبات گوگردی و کربن دی‌اکسید با آب، گاز ترش می‌گویند. سایر ناخالصی‌ها معمولاً همراه کربن دی‌اکسید و هیدروژن سولفور زدوده می‌شوند، مگر اینکه روش خاصی برای حذف آنها لازم باشد. نسبت کربن دی‌اکسید به هیدروژن سولفور در گازها متغیر است و این باعث می‌شود تا روش‌های متفاوتی در شیرین‌سازی گاز به کار رود.

عوامل زدودن گازهای اسیدی دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

۱. سرعت عمل جداسازی
۲. ارزانی و مقرون به صرفه بودن
۳. قابلیت احیای حلال مورد استفاده، در صورتی که از حلال استفاده شود.
۴. موثر بودن و بازده بالا
۵. عملیات تا حد امکان ساده باشد.
۶. عملیات جداسازی گازهای اسیدی مشکلات دیگر به وجود نیاورد.
۷. مهمتر از همه آنکه قابل بازیافت باشد.

۱-۱-۱ مختصری در مورد گوگرد و خواص آن :

گوگرد یکی از عناصر شیمیایی جدول تناوبی است که نماد آن S و عدد اتمی آن ۱۶ می‌باشد. گوگرد یک نافلز فراوان، بی‌بو، بی‌مزه و چند ظرفیتی است که بیشتر به شکل کریستال‌های زرد رنگ که از کانی‌های سولفیت و سولفات به دست می‌آید، شناخته شده می‌باشد. گوگرد یک عنصر حیاتی و لازم برای تمامی موجودات زنده می‌باشد که مورد نیاز اسید آمینوها و پروتئین‌ها می‌باشد. این عنصر به صورت اولیه در کودها استفاده می‌شود ولی به صورت گسترده‌تر در باروت، ملین‌ها^۱، کبریت‌ها و حشره کش‌ها به کار گرفته می‌شود.

۱-۱-۲ خصوصیات قابل توجه :

ظاهر این نافلز به رنگ زرد کمرنگ می‌باشد که بسیار سبک و نرم است. این عنصر به هنگام ترکیب با هیدروژن بوی مشخصی دارد که مشابه بوی تخم مرغ فاسد می‌باشد. گوگرد با شعله آبی رنگ می‌سوزد و بوی عجیبی از خود ساطع می‌کند. گوگرد در آب حل شدنی نیست ولی در دی‌سولفید کربن حل می‌شود. حالت‌های معمول اکسیداسیون این عنصر ۲- و ۲+ و ۴+ و ۶+ می‌باشد. گوگرد در تمام حالت‌های مایع، جامد و گاز شکل‌های چند گانه دارد که ارتباط بین آنها هنوز کاملاً درک نشده است. گوگرد کریستالی به صورت حلقه گوگردی S_۸ نشان داده می‌شود.

نیتريد گوگرد پلیمری خواص فلزی دارد و این در حالی است که هیچ گونه اتم فلزی در خود ندارد. این عنصر همچنین خواص نوری و الکتریکی غیر معمولی نیز دارد. گوگرد غیر متبلور یا پلاستیک با عمل سرد کردن سریع کریستال گوگرد حاصل می‌شود. مطالعات در زمینه اشعه ایکس نشان می‌دهد که گونه غیر متبلور و بی نظم ممکن است که ۸ اتم در هر ساختار پیچشی ستاره مانند داشته باشد. گوگرد می‌تواند به دو حالت کریستالی به دست آید اورتورومبیک اکتاهدرال^۲ و بلور مونوکلینیک^۳ که اولی در دماهای معمولی پایدارتر می‌باشد.

^۱ Laxative

^۲ Orthorhombic Octahedral

^۳ Monoclinic crystal

۳-۱-۱ کاربردها:

این عنصر برای استفاده‌های صنعتی مانند تولید (H_2SO_4) اسید سولفوریک، تولید باطری‌ها، تولید باروت و جهت حرارت دادن به لاستیک تولید می‌شود. گوگرد در فرآیند تولید کودهای فسفاتی به عنوان ماده ضد قارچ عمل می‌کند. سولفات‌ها در کاغذهای شستشو و خشکبار نیز کاربرد دارند. همچنین گوگرد در ساخت کبریت و آتش‌بازی نیز به کار گرفته می‌شود. تیوسولفات آمونیوم یا سدیم به عنوان ماده ضد خشکی و ملین که یک مکمل منیزیم گیاهی است به کار گرفته شود [۱].

۴-۱-۱ پیدایش:

گوگرد به صورت طبیعی در مقادیر زیاد به صورت ترکیبی با دیگر عناصر به صورت سولفید مانند پیرایت^۱ و سولفات مانند جیپسام^۲ یافت می‌شود و به صورت آزاد نزدیک چشمه‌های آب گرم و مناطق آتش‌فشانی و معادن به دست می‌آید. این عنصر در مقادیر کم نیز از ذغال سنگ و نفت که در هنگام سوختن دی‌اکسید گوگرد تولید می‌کنند، به دست می‌آید. استانداردهای سوختی به صورت فزاینده‌ای به گوگرد برای استخراج سوخت‌های فسیلی نیاز دارند. چرا که دی‌اکسید گوگرد با قطرات آب ترکیب شده و باعث به وجود آمدن باران اسیدی می‌شود. گوگرد استخراج شده بعد از پالایش یکی از بیشترین ذخایر تولید گوگرد را به خود اختصاص می‌دهد. گوگرد با وجود مهمترین مشتق خود یعنی اسید سولفوریک یکی از مهمترین عناصر مواد صنعتی می‌باشد که برای هر قسمت از صنعت اهمیت به سزایی دارد. تولید اسید سولفوریک مهمترین استفاده از گوگرد می‌باشد و مصرف اسید سولفوریک نیز به عنوان شاخصی برای جوامع توسعه یافته صنعتی در نظر گرفته می‌شود. ایالات متحده آمریکا سالانه بیشتر از هر عنصر دیگری اسید سولفوریک تولید می‌کند.

^۱ Pyrite
^۲ Gypsum

۵-۱-۱ هشدارها:

به هنگام کار کردن با دی سولفید کربن، سولفید هیدروژن و دی اکسید گوگرد باید مراقب بود زیرا دی اکسید گوگرد علاوه بر اینکه کاملاً سمی است (سمی تر از سیانید) با آبی که در جو وجود دارد واکنش نشان داده و باران اسیدی را به وجود می آورد. اگر غلظت این عنصر زیاد باشد بلافاصله با توقف در عمل دم و بازدم موجب مرگ می شود. گوگرد و سولفید هیدروژن به سرعت حس بویایی را از کار می اندازد و از این رو قربانیان ممکن است از وجود آن بی اطلاع باشند.

۶-۱-۱ ترکیبات گوگردی:

بسیاری از بوهای ناخوشایند که مرتبط به اندام موجود زنده هستند به دلیل وجود ترکیبات گوگردی مانند سولفید هیدروژن می باشد که بوی تخم مرغ فاسد شده را می دهد. اگر سولفید هیدروژن را در آب حل کنیم محلول اسیدی به دست خواهد آمد که با فلزات واکنش داده و سولفید فلزات را تشکیل می دهد. سولفید آهن، سنگ آتشنه آهن^۱ هم نام دارد که به آن طلای احمقان نیز می گویند. این ترکیب به طور قابل توجهی خاصیت رسانایی دارد. سرب معدنی^۲ که یک سولفید سرب طبیعی می باشد، اولین نیمه رسانا اصلی بود که کشف گردید [۱].

۲-۱ تاریخچه

قبل از پیدایش روش های معمول، برای حذف CO_2 و H_2S از گاز طبیعی، آهک استفاده شده و آهک مصرفی دور ریخته می شد. در سال ۱۹۱۰ روش اکسید آهن ابتدا در انگلستان و سپس در سایر نقاط رواج یافت. در سال ۱۹۲۰ روش کربنات پتاسیم بوسیله کمپانی کوپر^۳ معرفی شد. روش استفاده از آمین در سال ۱۹۳۰ به ثبت رسید و در سال ۱۹۳۹ روش مخلوط آمین و گلایکول پیشنهاد شد که

^۱ Iron Pyrites

^۲ Galena

^۳ Copper

پالایش و خشک کردن گاز را یکجا انجام می‌داد. در سال ۱۹۴۸ تجارتی کردن این روش‌ها به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های جذب سطحی سولفینول^۱ در سال ۱۹۶۵ به وجود آمد و روش فلور و استفاده از غربال‌های مولکولی بتدریج جایگزین روش‌های قدیمی گردید.

به طور کلی روش‌های پالایش گاز را می‌توان در چهار گروه دسته‌بندی کرد :

- فرآیندهای شیرین‌سازی در بسترهای جامد
- فرآیندهای شیرین‌سازی با استفاده از حلال‌های شیمیایی
- فرآیندهای شیرین‌سازی با استفاده از حلال‌های فیزیکی
- فرآیندهای شیرین‌سازی به روش تبدیل مستقیم

۱-۲-۱ فرآیندهای شیرین‌سازی در بسترهای جامد :

جداسازی گازهای اسیدی در بسترهای جامد از طریق واکنش شیمیایی یا ایجاد پیوند یونی صورت می‌پذیرد. گاز ترش از میان بستر جامد عبور نموده و گازهای اسیدی جذب بستر می‌شوند. پس از اشباع بستر از گازهای اسیدی، مخزن حاوی بستر جامد از مدار خارج و برای احیاء آماده می‌گردد.

به همین منظور مخزنی با ظرفیت مشابه، پس از خارج شدن مخزن اولی، در مدار عملیات قرار می‌گیرد. فرآیندهای شیرین‌سازی در بستر جامد شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. فرآیند آهن اسفنجی
۲. فرآیند غربال مولکولی
۳. فرآیند اکسید روی

^۱ Solfinol

۲-۲-۱ فرآیند شیرین سازی با حلال های شیمیایی :

عملیات شیرین سازی گازهای ترش در فرآیندهای فوق به واسطه واکنش شیمیایی محلول باز ضعیف با گازهای اسیدی صورت می پذیرد. نیروی محرکه انتقال جرم در فرآیندهای فوق در نتیجه تفاوت فشار جزئی بین فشارهای فازهای گاز و مایع پدید می آید. واکنش شیمیایی در این نوع فرآیند با تغییر دما و یا فشار سیستم برگشت پذیر است. از این رو حلال های شیمیایی با تغییر پارامترهای عملیاتی یاد شده قابل احیا بوده و در داخل یک سیستم بسته به گردش در می آید. حلال های شیمیایی به صورت زیر دسته بندی می شوند :

۱. فرآیندهای آمینی

۲. فرآیندهای کربناتی

۳. حلال های شیمیایی ویژه

۱-۲-۲-۱ فرآیند آمینی :

محلول های آمین بازهای آلی ضعیفی هستند. آمین ها این خاصیت را دارند که در دمای معمولی گازهای اسیدی را به خود جذب کرده و در دمای بالاتر آنها را دفع نمایند. در واکنش اصلی یکی از هیدروژن ها با رادیکال آزاد ماده شیمیایی آلی تعویض می گردد. آلکانول آلی بر اساس تعداد گروه های آلی متصل به اتم نیتروژن طبقه بندی می شوند :

- آمین های نوع اول مانند مونو اتانول^۱ آمین MEA و دی گلیکول^۲ آمین DGA
- آمین های نوع دوم مانند دی اتانول آمین DEA و دی ایزوپروپانول^۳ آمین DIPA
- آمین های نوع سوم مانند تری اتانول آمین TEA و متیل دی اتانول^۱ آمین MDEA

^۱ Mono Ethanol

^۲ Di-Glycol

^۳ Di-isopropanol

آمین‌های نوع اول بازهای قوی‌تری نسبت به آمین‌های نوع دوم بوده و تمایل بیشتری جهت واکنش با CO_2 و H_2S از خود نشان داده و پیوندهای محکم‌تری با گازهای اسیدی تشکیل می‌دهد. از این رو، درجه واکنش‌پذیری آمین مستقیماً بر طراحی و عملیات برج جذب تأثیر می‌گذارد. به عنوان یک قاعده کلی، خاصیت قلیایی و واکنش‌پذیری آمین نوع اول بیشتر از آمین نوع دوم و آمین نوع دوم بیشتر از آمین نوع سوم می‌باشد. گرمای حاصل از واکنش بین گازهای اسیدی با آمین‌های نوع اول حدود ۲۵ درصد بیشتر از آمین‌های نوع دوم است. همچنین درجه واکنش‌پذیری آمین بر بار آمین کثیف مستقیماً تأثیر می‌گذارد. از این رو آمین‌های نوع اول ظرفیت حمل بار گازهای اسیدی بیشتری را نسبت به آمین‌های نوع دوم دارا می‌باشند [۲].

در بسیاری از پالایشگاه‌ها، بعد از جدا نمودن گازهای اسیدی به خاطر بازده اقتصادی و نیز جلوگیری از آلودگی محیط زیست و خطرات ناشی از سمی بودن آنها، گازهای اسیدی بخصوص سولفید هیدروژن را در واحدهای بازیافت گوگرد، به روش‌های مختلف فراورش نموده و گوگرد تولید می‌نمایند. که در این نوشتار، روش‌های مختلف بازیافت آن شرح داده خواهد شد.

۳-۱ فرآیندهای مختلف بازیافت گوگرد :

فرآیندهای زیادی در جهت تولید گوگرد از سولفید هیدروژن به کار برده می‌شود. در برخی از این فرآیندها هدف تولید گوگرد بوده و در بعضی دیگر بازیافت سولفید هیدروژن از یک جریان گاز همراه با تولید گوگرد مد نظر است. معمولاً فرآیندهای موجود به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند:

۱. فرآیندهای جذب مایع - اکسیداسیون^۱

۲. فرآیندهای اکسیداسیون مستقیم^۳

^۱ Methyl Di-Ethanol

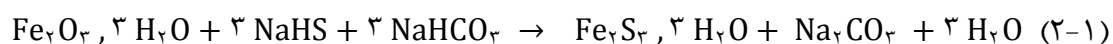
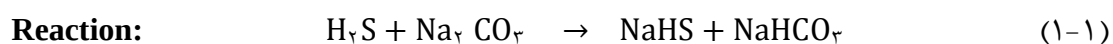
^۲ Liquid Absorption - Oxidation

^۳ Direct Oxidation

فرآیندهایی که در این متن به توصیف آنها پرداخته می‌شود، صرفاً در جهت شیرین‌سازی گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرآیندهای مایع معمولاً بر پایه استفاده از یک اکسیدانت^۱ یا کاتالیست در فاز مایع برای تماس با گاز حاوی سولفید هیدروژن می‌باشد. تعدادی از این ترکیبات که معمولاً استفاده می‌شوند، شامل پلی تیونات‌ها^۲، کمپلکس‌های سیانید^۳ آهن، اکسید آهن، کاتالیست‌های آلی^۴، تیوارسنات‌ها^۵ و پرمنگنات پتاسیم^۶ یا دی کرومات پتاسیم^۷ و یا دی کرومات سدیم^۸ می‌باشند.

تمامی موارد ذکر شده قابل احیاء بوده و تنها پرمنگنات‌ها و دی کرومات‌ها، در فرآیندهای غیر قابل احیاء مورد استفاده قرار گرفته و بنابراین بسیار گران هستند.

فرآیندهای زیادی بر پایه مصرف سوسپانسیون^۹ اکسید آهن توسعه یافته‌اند که بر اساس کار همانند یکدیگر بوده و شیمی آنها مشابه است. اساس کار واکنش سولفید هیدروژن با یک ترکیب قلیایی (معمولاً کربنات سدیم یا آمونیاک) است که بعد از آن اکسید آهن با هیدروسولفید واکنش خواهد داد. کار احیاء با دمیدن هوا به محلول جهت تبدیل کردن سولفید آهن به گوگرد عنصری و اکسید آهن انجام می‌پذیرد.



-
- ^۱ Oxidant
 - ^۲ Poly Teun
 - ^۳ Cyanide
 - ^۴ Organic Catalysts
 - ^۵ thioarsenate
 - ^۶ Potassium permanganate
 - ^۷ Potassium dichromate
 - ^۸ Sodium dichromate
 - ^۹ Suspension

واکنش‌های جانبی باعث تولید ترکیبات نامناسب گوگرد خواهند شد. برای مثال تشکیل تیوسولفات‌ها^۱ که گریزی از آن نیست به صورت واکنش زیر به وجود می‌آید:



با کنترل دما و شرایط واکنش می‌توان تا حدود زیادی از تولید تیوسولفات‌ها جلوگیری نمود، ولی در عمل نمی‌توان آنها را حذف نمود [۳].

۱-۳-۱ فرآیند پروکس^۲:

در اواخر دهه ۱۹۴۰ فرآیند پروکس در آلمان برای خالص‌سازی گاز ذغال‌سنگ توسعه یافت. فرآیند شامل جذب H_2S در محلول آبی آمونیاک حاوی ۰/۳ درصد از کاتالیست اکسیداسیون آلی نظیر هیدروکویینون^۳ به فرمول $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ است. در این روش گاز ترش ابتدا از یک خنک کننده عبور کرده و سپس به روش غیرهمسو با محلول پروکس در برج تماس مواجه می‌شود. محلول پروکس با دمیدن هوا در ظرف اکسیداسیون، احیاء می‌شود. از تجمع زیاد تیوسولفات‌ها و واکنش‌های جانبی دیگر با خارج‌سازی قسمتی از محلول جلوگیری می‌شود [۳].

۱-۳-۲ فرآیند گیلمارکور – وتروکوک^۴:

از این روش برای بازیابی H_2S و CO_2 استفاده می‌شود. بازیافت H_2S بر پایه جذب آن در محلول قلیایی آرسنیت^۵ و آرسنات^۶ است که واکنش‌های بعدی گوگرد را تولید خواهد نمود. آرسنیت و

^۱ Thiosulfate

^۲ Perox

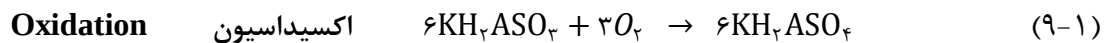
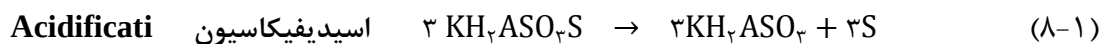
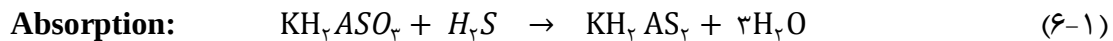
^۳ Hydroquinone

^۴ Gilmmarco -Vetrocoke

^۵ Arsenites

^۶ Arsenates

آرسنات در محلول کربنات پتاسیم حل شده و به عنوان فعال کننده استفاده می شوند. سینتیک فرآیند پیچیده است، اما می توان به صورت زیر نشان داد :



می توان با تغییر شرایط، جذب انتخابی یا همزمان H_2S و CO_2 را به وجود آورد. محلول غنی^۱ خارج شده از پایین برج، وارد هضم کننده^۲ که یک مخزن کوچک است، می شود. این مخزن زمان لازم برای واکنش را به وجود می آورد. (واکنش نسبتاً کند است) سپس محلول غنی وارد خنک کننده شده و بعد به ظرف اسیدی کردن وارد می شود. در این مخزن محلول با CO_2 تماس پیدا می کند. این CO_2 از فرآیند جداسازی CO_2 توسط روش G.V به دست می آید. گوگرد و محلول از پایین ظرف اسیدی کردن عبور نموده و وارد برج احیاء می شود[۳].

۳-۳-۱ فرآیند فروکس :

این فرآیند توسط شرکت کوپر^۳ طراحی گردیده که در آن از محلول شیرین سازی شامل ۳ درصد کربنات سدیم و ۰/۵ درصد اکسید آهن استفاده می شود. این محلول از بالای برج جذب به طور غیر هم جهت با گاز ترش روبه رو می شود. محلول مصرف شده که از پایین برج جذب خارج می شود، وارد محفظه دمنده هوا^۴ شده و محلول توسط هوا به گوگرد و اکسید آهن تبدیل می گردد. دوغاب گوگرد^۱

^۱ Rich

^۲ Digester

^۳ Koppers.co.

^۴ Aerator

از قسمت بالای مخزن دمنده هوا بازیابی می‌شود. محلول بازیابی شده پس از گذر از یک مبدل حرارتی (جهت پیش گرم شدن) مجدداً به برج جذب برمی‌گردد. مقدار بازیابی گوگرد توسط چرخش اکسید آهن (هیدروکسید) افزایش می‌یابد. معمولاً تا ۸۵ درصد بازیابی H_2S در این روش گزارش شده است. اگر بازیابی بیشتری مد نظر باشد، می‌توان از دو واحد جذب استفاده نمود. گوگرد تولیدی از این فیترها شامل ۴۰ درصد گوگرد عنصری و حدود ۴۰ درصد (گاهی ۱۰-۲۰ درصد) هیدروکسید آهن یا کربنات سدیم است. به همین دلیل گوگرد تولیدی توسط فرآیند فروکس معمولاً مناسب نیست. از طرفی هزینه‌های تأمین هرز رفت مواد شیمیایی نیز بالاست [۳].

۱-۳-۴ فرآیند گلود^۲:

این فرآیند بسیار شبیه فرآیند فروکس بوده و در آلمان توسعه یافته است. اختلاف عمده در محلول رقیق کننده (کربنات آمونیوم) است که برای تهیه سوسپانسیون اکسید آهن به جای کربنات سدیم به کار گرفته می‌شود. این پروسه با به کارگیری برج‌های احیاء کم عمق و افقی که از فرآیند قبلی بلندتر هستند، احیاء محلول را انجام می‌دهد. استفاده از برج‌های عمودی ممکن است هوای کمتری نیاز داشته باشد، اما فشارهای بالاتری می‌خواهد [۳].

۱-۳-۵ فرآیند منچستر^۳:

فرآیند منچستر شکل اصلاح یافته فرآیند فروکس است. اختلاف اصلی در استفاده از برج‌های چندگانه شستشو، با محلول تزریقی تازه به هر مرحله شستشو در فرآیند منچستر می‌باشد. در حالیکه در فرآیند فروکس فقط یک برج تماس بین محلول و گاز ترش وجود دارد. در فرآیند منچستر گاز ترش با محلولی از کربنات سدیم حاوی هیدروکسید آهن شستشو شده و در هر مرحله محلول کربنات تازه وارد می‌شود. تانک تأخیری بین هر مرحله جذب و برج احیاء جهت زمان دادن برای ایجاد واکنش تعبیه شده است. این زمان اقامت، واکنش بین سولفیدهای قلیایی و اکسید آهن را کامل می‌نماید،

^۱ Slurry

^۲ Glud

^۳ Manchester

محلول واکنش داده از پایین هر جذب کننده به برج‌های احیاء فرستاده می‌شود که در این برج‌ها با هوا جهت بازیابی مواجه می‌گردد. اکسیداسیون مناسب در برج‌های جذب ضروری است و اگر این اتفاق نیفتد، اکسیداسیون نامناسب تولید تیوسولفات سدیم که باعث مصرف بیشتر مواد شیمیایی خواهد شد. گوگرد تولیدی در این روش همان معایب روش فروکس را دارد.

به علت مشکلات جدی سیستم‌های اکسید آهن – بی‌کربنات سدیم، انگلیسی‌ها از فرآیند دیگری که در آن یک ماده آلی حاوی اکسیژن وجود دارد، سود جستند. یکی از این مواد متیلن بلو^۱ که حاوی اکسیژن است و در برج احیاء مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند نیز مشکلات خاص خود از جمله دی‌متیلاسیون^۲ متیلن بلو را داشته که آن را بسیار نامحلول می‌گرداند. بنابراین استفاده از مواد آلی اکسیژن‌دار به فراموشی سپرده شد. در عوض کار روی توسعه و استفاده از محلول‌های قلیایی نمک‌های سدیم اسید دی‌سولفوریک آنتراکونیون^۳ که از آنتراسن^۴ مشتق می‌شود و نوعی کتون با فرمول $C_{14}H_8O_2$ می‌باشد، ادامه یافت. این فرآیند، استرتفورد اسید دی‌سولفونیک آنتراکونیون^۵ نام دارد [۳].

۱-۳-۶ فرآیند استرتفورد A.D.A :

در این فرآیند، از محلول قلیایی نمک سدیم حاوی اسید دی‌سولفوریک آنتراکونیون استفاده می‌شود و شامل ۵ مرحله است:

۱. جذب سولفید هیدروژن در محلول قلیایی
۲. احیاء اسید دی‌سولفوریک با افزودن گوگرد از دی‌سولفید سدیم
۳. آزادسازی گوگرد از اسید دی‌سولفوریک^۶ احیاء شده در اثر واکنش متقابل با اکسیژن موجود
۴. اکسیداسیون دوباره اسید دی‌سولفوریک احیاء شده
۵. اکسیداسیون دوباره محلول قلیایی به جهت تأمین اکسیژن موجود در مرحله ۳

^۱ Methylene blue

^۲ Di-methylation

^۳ Anthraquinone

^۴ Anthracene

^۵ Stretford A.D.A (Acid Di-sulfonic Anthraquinone)

^۶ Di-Sulfuric

تأخیر زمانی این روش ۴۵ دقیقه جهت تکمیل احیاء اسید دی سولفوریک می باشد که طولانی تر از تأخیر زمانی فرآیند منچستر است. این فرآیند بر خلاف فرآیند منچستر که مقداری از محلول در حال گردش خارج می شد، از یک واحد کربن زدایی بهره می برد.

۱-۳-۶-۱ مزایای فرآیند استر تفورد A.D.A :

۱. برخلاف فرآیند منچستر که مقداری از هیدروکسید آهن از هدر می رود، در این روش از دست رفتن عامل نامحلول وجود ندارد.
۲. از آن جهت که در این فرآیند واکنش های جذب در محلول انجام می پذیرد، دلیلی جهت انسداد برج های شستشو وجود ندارد.
۳. با فیلتراسیونی ساده و شستشو، گوگردی با کیفیت بالا تولید می شود.
۴. مشکلات ناشی از جداسازی ذرات جریانی که در روش قبل به وجود می آمد، منتفی است.

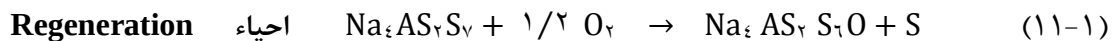
۱-۳-۷ فرآیند تیلوکس^۱:

این روش در اواخر دهه ۱۹۲۰ توسط کمپانی کوپر پایه گذاری شد و کاربرد وسیعی در خالص سازی و شیرین سازی همه نوع گازهای صنعتی پیدا نمود. در ایالات متحده واحدهای تیلوکس در یک زمان برای شیرین سازی و پالایش گازها ساخته شدند. ترکیب فعال در این واکنش تیوآرسنات آمونیوم^۲ و یا سدیم است. تیوآرسنات در محلول خنثی یا کمی قلیایی به گردش در می آید و هیدروژن سولفور را به گوگرد عنصری تبدیل می نماید. این گوگرد تولیدی برای استفاده های مختلفی مناسب می باشد. فرایند تیلوکس بسیار پیچیده است به طوریکه واکنش های انجام پذیرفته را می توان به صورت زیر نشان داد:

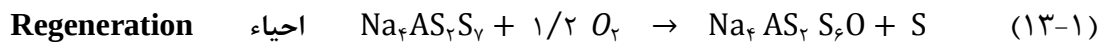
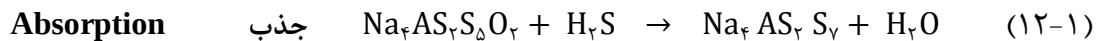


^۱ Thylox

^۲ Theo Ammonium Arsenate



واکنش‌های فوق شدت زیادی دارند ولی وقتی گاز حاوی مقدار زیادی H_2S باشد و یا زمان تماس زیادی نیاز باشد، واکنش‌های کندتری ممکن است به وجود آید:



محلول در گردش به وسیله حلالیت کربنات سدیم و تری‌اکسید آرسنیک^۱ در آب تهیه می‌شود. اساس کار به صورت جریان غیر همسوی گاز ترش و محلول فعال می‌باشد. گاز شیرین از بالای برج جذب خارج می‌شود و محلول غنی از پایین برج جذب پس از گذشتن از مبدل حرارتی وارد برج احیاء می‌شود. این محلول با دمیدن هوا به پایین برج احیاء بازیابی می‌شود و گوگرد آزاد شده در بالای مخزن شناور شده و برای فیلتراسیون از سطح جدا می‌گردد. بازیافت H_2S توسط محلول تیلوکس بازده زیادی در حد ۰/۲ گرم $\text{H}_2\text{S}/100 \text{ SCF}$ دارد و اگر درجه بیشتری از بازیابی مد نظر باشد، دو مرحله جذب باید استفاده شود.

محلول تیلوکس بسیار خورنده است و پمپ‌ها، شیرها، تیوب‌های مبدل و ... باید ضد زنگ باشند. هدر رفت محلول در مقایسه با فرآیندهای فروکس و یا منچستر کمتر است اما به علت تشکیل تیوسولفات، تری‌اکسید آرسنیک و کربنات سدیم باید جایگزین شود [۳].

۸-۳-۱ فرآیند سولفروکس^۲:

فرآیند سولفروکس شامل مراحل اکسیداسیون و احیاء کاتیون آهن می‌باشد، که در آن سولفید هیدروژن مستقیماً به گوگرد شبه فلزی تبدیل می‌شود و همزمان کاتیون آهن احیاء می‌شود. سپس با دمیدن هوا، کاتیون آهن اکسید می‌شود. گوگرد حاصل از این فرآیند را می‌توان به صورت کیک یا

^۱ Arsenic trioxide

^۲ SulFerox

دوغاب جدا کرد. این فرآیند عمدتاً برای تصفیه گاز طبیعی، گاز خروجی واحد آمین و گاز خروجی از زمین در اثر فعالیت حرارتی زمین استفاده می‌شود [۴].

مزایای این روش عبارتند از :

۱. از آنجا که حجم مایع در گردش کم است و دستگاه‌های آن کوچک می‌باشد، هزینه نگهداری آن کم می‌باشد.

۲. توانایی جداسازی سولفید هیدروژن بدون جدا کردن دی‌اکسید کربن وجود دارد.

۳. مقدار سولفید هیدروژن در گاز تصفیه شده کم است (کمتر از ۵ PPM).

۴. در دمای محیط کار می‌کند و راه‌اندازی و بستن واحد آن آسان است.

۹-۳-۱ فرآیند لاسی-کلر^۱:

فرآیند لاسی-کلر در آمریکا توسعه یافته است. این فرآیند برای دفع سولفید هیدروژن به همراه مرکاپتان‌ها^۲ و حتی در حضور دی‌اکسید کربن نیز مناسب است. این فرآیند با استفاده از یک محلول شیمیایی خاص که نام آن گزارش نشده است، سولفید هیدروژن و مرکاپتان‌ها را در جریان گاز طبیعی دفع می‌کند و گوگردی با کیفیت خوب تولید می‌کند. گوگرد کلوییدی در سلول‌های شناورسازی الکترونیکی انباشته می‌شود و توسط فیلتراسیون خلاء جدا می‌گردد.

گاز ترش وارد برج جذب می‌شود و در حین بالا رفتن در برج با محلول مذکور به طور ناهمسو تماس می‌یابد. این برج معمولاً دارای پرکن‌هایی از جنس پلاستیک می‌باشد. در اثر انجام واکنش میان گاز ترش و محلول، گوگرد تولید می‌شود و به صورت معلق در محلول باقی می‌ماند. گاز شیرین از بالای برج جذب و محلول مصرف شده از پایین برج به سلول‌های شناورسازی الکترونیکی جریان می‌یابد. گوگرد انباشته شده در این سلول‌ها به صورت دوغابی غلیظ می‌باشد که به منظور جداسازی گوگرد به فیلتر خلاء ارسال می‌شود. محلول باقی‌مانده از مرحله فیلتراسیون، با مایع خروجی از پایین

^۱ Lacy-Keller

^۲ Mercaptan

سلول‌ها مخلوط شده و سپس به قسمت بازیافت ارسال می‌شود. محلول بازیافت شده مجدداً به برج جذب فرستاده می‌شود [۴].

۱-۳-۱۰ فرآیند تونسنده^۱:

در این فرآیند از یک محلول آلی مانند تری‌اتیلن گلیکول^۲ برای تماس با گاز ترش استفاده می‌شود. تری‌اتیلن گلیکول ماده‌ای با وزن مولکولی بالا و ویسکوز می‌باشد که ظرفیت جذب آب در آن بیشتر از جذب سولفید هیدروژن و تولید گوگرد است و از این جهت کاربرد بیشتری دارد. واکنش تولید گوگرد در این روش گرمازا است، لذا دمای گلیکول خروجی از پایین برج جذب با افزایش غلظت سولفید هیدروژن موجود در گاز ترش افزایش خواهد یافت. گاز ترش از پایین برج جذب-راکتور وارد می‌شود و در حین بالا رفتن، با مخلوطی از یک محلول آلی مانند تری‌گلیکول و دی‌اکسید گوگرد، با جریان ناهمسو تماس می‌یابند.

اتیلن گلیکول از محلول جدا شده و گوگرد نامحلول به صورت دوغاب در می‌آید. گاز شیرین از قسمت راکتور برج وارد قسمت جذب برج می‌شود و در آنجا با تری‌اتیلن گلیکول بازیافت شده تماس ناهمسو پیدا می‌کند. گاز آب‌گیری و شیرین‌شده از قسمت پایین برج خارج می‌گردد. آب و محلول غنی تری‌اتیلن گلیکول و گوگرد از پایین برج جذب خارج می‌شود و برای جداسازی گوگرد از مخلوط به سمت ظرف ته‌نشینی می‌رود. گوگرد ته‌نشین شده به مخزن ذخیره‌سازی می‌رود. قسمتی از گوگرد برای تأمین دی‌اکسید گوگرد لازم واکنش سوزانده می‌شود. آب و محلول غنی تری‌اتیلن گلیکول خروجی توسط جوش‌آوردن مجدد محلول جدا می‌شود. آب خروجی از بازیافت کننده شامل آب تولیدی واکنش بین دی‌اکسید گوگرد و سولفید هیدروژن و آب جدا شده از گاز می‌باشد. محلول بازیافتی تری‌اتیلن گلیکول، از پایین برج جذب بازیافت کننده خارج می‌شود که قسمتی از آن به بالای برج جذب اصلی فرستاده می‌شود و مابقی به بالای برج جذب دی‌اکسید گوگرد ارسال می‌شود،

^۱ Townsend

^۲ Tri-Ethylene Glycol

دی اکسید گوگرد حاصل از سوختن در راکتور را به خود جذب می کند. این فرآیند برای جداسازی سولفید هیدروژن با حضور در اکسید کربن نیز مناسب می باشد [۴].

۱-۳-۱۱ فرآیند شل سولفولان^۱:

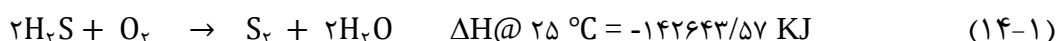
این فرآیند شل سولفولان توسط شرکت شل برای جداسازی سولفید هیدروژن توسط محلول سولفولان ارائه گردید. سولفولان شامل کاتالیست از جنس نمک آهن، اسید کربوکسیلیک پیریدینی^۲ و آب می باشد. سولفید هیدروژن با دی اکسید گوگرد واکنش می دهد تا گوگرد شبه فلزی به دست آید و فرآیند تولید آن نیز شبیه فرآیند تونسنند می باشد [۴].

۱-۳-۱۲ فرآیند فریپورت^۳:

این فرآیند توسط شرکت فریپورت به جهت بازیابی گوگرد از گاز ترش با استفاده از واکنش های کاتالیستی در فاز گوگرد مذاب ابداع گردید. تفاوت این روش با فرآیندهای تونسنند و شل سولفولان در این است که مایع گوگرد داغ در فاز مذاب می باشد. مقادیر استوکیومتری دی اکسید گوگرد با گاز ترش مخلوط می شود و جریان حاصل با گوگرد مذاب دارای کاتالیست آمین است به صورت نا همسو تماس می یابد. دی اکسید گوگرد مورد نیاز از سوزاندن مقداری از گوگرد محصول به دست می آید [۴].

۱-۳-۱۳ فرآیند کلاوس:

اولین بار در سال ۱۸۸۳ میلادی، روش کلاوس در تولید گوگرد توسط شیمیدان انگلیسی به نام کارل فریدریچ کلاوس^۴ پایه گذاری گردید. واکنش اصلی کلاوس بر پایه اکسیداسیون سولفید هیدروژن با هوا (اکسیژن) در حضور کاتالیست (بوکیست) در یک راکتور یک مرحله ای بود. محصولات این واکنش گوگرد عنصری و آب است [۵].



^۱ Shell Sulfolane

^۲ Pyridine carboxylic

^۳ Freeport

^۴ Carl Friedrich Claus

کنترل واکنش به شدت گرمازای فوق، مشکل بوده و بازده بازیافت گوگرد در محدوده ۸۰-۹۰ درصد می‌باشد. اولین اصلاحات در روش کلاوس توسط شرکت آی.بی.فاربنینداستری^۱ در حدود سال ۱۹۳۷ جهت از بین بردن نواقص اصلی کلاوس آغاز شد. این روش یعنی کلاوس اصلاح شده، شامل دو مرحله ذیل می‌باشد:

سوزاندن ۱/۳ از گاز اسیدی با تمام هوای لازم جهت واکنش.



ترکیب ۲/۳ باقیمانده گاز اسیدی با دی‌اکسید گوگرد تولیدی از مرحله اول.



واکنش کلی را می‌توان به صورت زیر نوشت:



در این واکنش‌ها فرض شده است هیچ ناخالصی و مواد مزاحم وجود ندارد. با توجه به اینکه درصد تبدیل گوگرد تابع دما می‌باشد، معمولاً تا ۷۰ درصد از کل واکنش در این مرحله تکمیل می‌گردد. بنابراین غیر از مرحله احتراق یک مرحله یا چند مرحله کاتالیستی نیز مورد نیاز می‌باشد. گوگرد تولیدی بعد از مرحله احتراق و مراحل کاتالیستی باید به منظور پیشرفت واکنش کندانس شده و از جریان جدا گردد. از طرفی به منظور پیشرفت واکنش در مرحله کاتالیستی و نگهداشتن دمای جریان گازی در درجه حرارت بیشتر از نقطه شبنم گوگرد، جریان گاز قبل از ورود به بسترهای کاتالیستی باید مجدداً گرم شود. گاز نهایی خروجی از کندانسور آخر نیاز به فراورش بیشتری جهت سازگاری با

^۱ I.B.Farbenindustrie

محیط زیست دارد. این سازگاری بسته به مکان و ملاحظات زیست محیطی کشورها متفاوت خواهد بود. بنابراین در مجموع، فرآیندهای بازیافت گوگرد توسط روش کلاوس شامل مراحل عملیاتی زیر می‌باشد :

۱. احتراق^۱ :

یعنی سوزاندن هیدروکربورها و دیگر قابل احتراق و مقدار $\frac{1}{3}$ و $\frac{2}{3}$ ، از جریان گاز اسیدی.

۲. دیگ بازیافت دما^۲ :

جهت خنک کردن محصولات احتراق، بیشتر واحدهای کلاوس، بخار با فشار ۵۰۰-۱۵۰ psig و دمای $185-243^{\circ}\text{C}$ در این مرحله تولید می‌کنند. دمای جریان گاز خنک شده معمولاً در محدوده $315-371^{\circ}\text{C}$ خواهد بود.

۳. تبدیل کاتالیستی :

این مرحله معمولاً شامل ۲-۴ راکتور کاتالیستی است به طوری که در این مرحله واکنش CO_2 و H_2S کامل می‌شود. گاهی کاتالیست‌ها، واکنش‌های جانبی تولیدی در مرحله احتراق را نیز هیدرولیز می‌کنند.

۴. گرم کردن مجدد^۳ :

بعد از کندانس نمودن و جداسازی گوگرد، به منظور بالا نگه‌داشتن جریان گاز در دمایی بالاتر از نقطه شبنم گوگرد، این عمل انجام می‌پذیرد.

۵. کندانس نمودن گوگرد :

جریان گازی خروجی از تبدیل کننده‌های کاتالیستی باید خنک شده و در این مورد بخار فشار

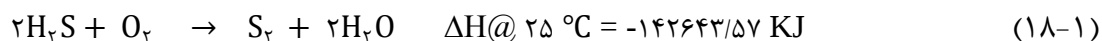
^۱ Combustion

^۲ Waste Heat Boiler

^۳ Reaheating

ضعیف تولید می‌شود. معمولاً ترکیب گاز ورودی به واحدهای کلاوس حدود ۸۰-۳۰ درصد مولی H_2S اشباع با آب و ۱/۵ درصد هیدروکربورها و مابقی CO_2 می‌باشد. با توجه به وجود انواع مختلف گوگرد در دماهای مختلف معمولاً گوگرد در این مرحله به صورت S_2 است [۶].

بنابراین می‌توان نوشت :



۴-۱ روش‌های مختلف فرآیند کلاوس^۱:

روش‌های مختلفی از فرآیند کلاوس اصلی تاکنون مشتق شده‌اند تا محدوده وسیعی از ترکیبات گاز خوراک را پوشش دهند. انواع مختلف این فرآیند در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۱-۱): روش‌های مختلف فرآیند کلاوس اصلی

روش مورد استفاده	درصد مولی H_2S در خوراک ورودی
مستقیم-کاملاً (یک‌بار - کاملاً)	۵۵ - ۱۰۰
مستقیم-کاملاً یا مستقیم-کاملاً با گاز اسیدی و هوای پیش‌گرم شده	۳۰ - ۵۵
جریان دو بخشی یا کاملاً مستقیم با خوراک و یا هوای پیش‌گرم شده	۱۵ - ۳۰
جریان دو بخشی با گاز اسیدی و یا هوای پیش‌گرم شده	۱۰ - ۱۵
جریان دو بخشی با سوخت اضافه شده یا با گاز اسیدی و هوای پیش‌گرم شده یا اکسیداسیون مستقیم یا بازیابی سولفور	۵ - ۱۰
بازیابی سولفور یا دگرگونی اکسیداسیون مستقیم یا فرآیندهای دیگر بازیابی گوگرد	< ۵

^۱ Claus Process Variation

۱-۴-۱ روش اصلی^۱:

برای گازهای اسیدی بیشتر از ۵۰ درصد مورد استفاده قرار می‌گیرد و بیشترین بازده را در کل فرآیندها دارا می‌باشد. تا جایی که ممکن باشد این روش توصیه می‌شود. در این روش جریان خوراک گاز اسیدی ابتدا با هوای استوکیومتری جهت سوزاندن $\frac{1}{3}$ از کل H_2S موجود و تبدیل آن به SO_2 و همه هیدروکربورها به CO_2 ترکیب می‌شوند. در این روش با توجه به دمای بالای کوره واکنش، تقریباً $\frac{2}{3}$ از کل گوگرد تولیدی را می‌توان در کندانسور اول جدا نمود. گازهای محفظه احتراق تقریباً $1800^\circ F$ دما داشته که در این دما تقریباً تمامی ناخالصی‌های همراه جریان گاز شکسته می‌شود. برای جریان‌های رقیق گاز اسیدی (۵۵ درصد) معمولاً روش‌های دیگری استفاده می‌شود.

۱-۴-۲ روش جریان اسپلیت^۲:

معمولاً برای محدوده ۴۰ - ۲۰ درصد از غلظت گاز اسیدی کاربرد فراوانی دارد. در این روش تمامی $\frac{1}{3}$ جریان گاز اسیدی با هوای استوکیومتری مورد نیاز سوخته شده و تبدیل به SO_2 می‌گردد. دی‌اکسید گوگرد تولیدی پس از عبور از مرحله بازیافت دما با $\frac{2}{3}$ باقیمانده گاز اسیدی مخلوط می‌شود. اساس کار کلیه روش‌های کلاوس یکی است و تمامی تغییرات جهت به حداقل رساندن مزاحمت مواد همراه جریان گاز و کنترل عملیاتی مناسب همراه با ملاحظات زیست محیطی مد نظر قرار گرفته است. در روش‌های مختلف تولید گوگرد با فرآیند کلاوس برای استفاده بهینه از حرارت ایجاد شده در مرحله احتراق، معمولاً از جریان‌های گاز داغ به صورت بای‌پس استفاده می‌شود [۶].

۱-۵ شرح مختصر جریان گاز اسیدی در واحدهای بازیافت گوگرد:

گاز اسیدی پس از خروج از بالای ظرف برگشتی در واحدهای تصفیه گاز، وارد کوره واکنش^۳ می‌شود. در کوره واکنش با هوای کنترل شده مخلوط شده و احتراق صورت می‌گیرد. ۵۴ درصد

^۱ Straight Through

^۲ Split- Flow or Split - Stream

^۳ Reactor Furnace

هیدروژن سولفور موجود در گاز اسیدی در کوره واکنش به بخار گوگرد تبدیل شده و ۴۶ درصد به صورت CO_2 و H_2S باقی می‌ماند. هیدروکربورهای موجود در گاز اسیدی نیز در کوره واکنش محترق شده و به CO_2 , CO , H_2O , H_2 , CS_2 , COS تبدیل می‌گردند. جهت جذب نمودن حرارت تولید شده در کوره واکنش و مایع کردن بخارات گوگرد و همچنین بالا بردن راندمان فرآیند، گازهای حاصله از احتراق، پس از کوره واکنش وارد یک دیگ بخار^۱ می‌شود تا قطرات گوگرد مایع جدا گردند. جهت کنترل درجه حرارت، گاز ورودی به دیگ بخار به دو بخش تقسیم می‌شود، یک بخش با عبور از ۱۹۴۰ تیوب دو اینچی به دمایی حدود ۲۳۰ درجه سانتیگراد رسیده و بخش دیگر با عبور از یک خط ۲۴ اینچی که در مرکز دیگ بخار قرار دارد، به دمایی حدود ۶۳۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. این دو بخش در خروجی با یکدیگر مخلوط شده و دمای گاز اسیدی ورودی به بستر کاتالیستی مرحله اول را کنترل می‌نمایند. در بستر کاتالیستی مرحله اول گازهای CO_2 و H_2S در حضور کاتالیست با یکدیگر ترکیب شده و بخار گوگرد تولید می‌نمایند، سپس گاز وارد سرد کننده ها شده و به صورت مایع به مخزن مخصوصی هدایت می‌شود. گاز اسیدی خروجی پس از آن به ترتیب وارد سرد کننده مرحله دوم، انعقاد کننده سوم و چهارم می‌شود به طوریکه در هر مرحله گوگرد مایع شده و به مخزن زیر زمینی هدایت می‌گردد.

دیگ بخار، بخاری با فشار متوسط تولید می‌نماید که جهت چرخاندن توربین دمنده‌های هوا استفاده می‌گردد. سردکننده‌های مرحله اول و دوم نیز، بخار فشار ضعیف تولید می‌کنند.

۱-۵-۱ دیگ بازیافت حرارت^۲ WHB :

به جهت جذب حرارت تولید شده در کوره واکنش و مایع کردن گوگرد، همچنین بالا بردن راندمان واحد، گازهای حاصله، پس از کوره واکنش وارد دیگ بخار می‌شوند. معمولاً در بیشتر واحدهای جدید بازیافت گوگرد با روش کلاوس، مبدل بازیافت حرارت و کوره واکنش در یک مخزن با یکدیگر ترکیب

^۱ Waste Heat Sulfur Coalescer

^۲ Waste Heat Boiler

شده‌اند. گازهای خروجی از کوره واکنش با درجه حرارتی حدود 840°C از لوله‌های داخلی مبدل بازیافت حرارت که از نوع پوسته و لوله می‌باشد عبور نموده و گرمای خود را صرف تولید بخار آب می‌نمایند. در این مرحله ۱۵ درصد از کل گوگرد تولیدی به دست می‌آید.

این مبدل گرمایی که با بخار فشار متوسط تولیدی خود به عنوان یک بویلر قابل توجه عمل نموده و نیروی محرکه دمنده‌های هوای واحد را تأمین می‌کند، دارای پوسته از جنس کربن استیل بوده که فشار و دمای عملیاتی آن به صورت $21/02\text{ psia}$ و 210°C می‌باشد. لوله دو اینچی از نوع کربن استیل و یک لوله ۲۴ اینچی در داخل این پوسته قرار گرفته که دارای دما و فشار عملیاتی 840°C و $1/31\text{ psia}$ می‌باشد. در مبدل بازیافت دما برای استفاده بهینه از دما و کاهش یک کوره کمکی (پیش-گرم کننده)، از لوله‌ای به قطر ۲۴ اینچ موسوم به گاز داغ^۱ استفاده می‌شود. دمای خروجی از این لوله با 650°C و دمای خروجی از تیوب‌های مبدل در شرایط عملیاتی 240°C است.

با توجه به دماهای موجود، توزیع گوگرد که در محفظه کوره واکنش به فرم S_{1-2} بوده به S_{3-8} تبدیل خواهد شد. گوگرد جداشده در انتهای WHB به صورت مایع به مخزن گوگرد هدایت می‌شود. جهت جلوگیری از بیش از حد گرم شدن^۲ تیوب‌های WHB به علت کم بودن ضخامت آن، ورودی لوله‌های ۲ اینچی با استفاده از حلقه‌های سرامیکی^۳ در مقابل حرارت محافظت می‌شود.

این حلقه‌ها ماده نسوزی با ۸۰-۹۰ درصد آلومین می‌باشد که با طولی حدود ۴ اینچ دارای کاغذ فیبر سرامیکی بوده که این کاغذ از ترک خوردن فرول به هنگام افزایش درجه حرارت جلوگیری می‌کند. کل صفحه لوله و ورودی ۲۴ اینچی نیز، توسط سیمان نسوز محافظت می‌گردد. عموماً به هنگام استارت و افزایش و کاهش درجه حرارت کوره، حلقه‌ها ترک خورده و در نتیجه آن گازهای داغ فرآیند باعث دمای بیش از حد دهانه لوله‌ها و نیز تخریب سولفیدی آن می‌گردد که سرانجام منجر به تخریب لوله و نیز نشت آب تغذیه به درون لوله‌ها می‌شود، بنابراین بایستی در نصب این حلقه‌ها و نیز

^۱ Hot Gas

^۲ Over Heat

^۳ Ceramic Ferrules

پوشاندن کل صفحه لوله توسط سیمان نسوز بسیار دقت گردد.

علاوه بر آن، بازبینی و کنترل مدار بسته PH آب بویلر و رسانایی و ... آن در حفظ لوله‌ها مؤثر می‌باشد. برای جلوگیری از تجمع رسوبات و لجن سیستم، بلودان دائم و لحظه‌ای تعبیه شده است. برای تنظیم شرایط دیگ بخار نیز از مواد شیمیایی (سود و فسفات) استفاده می‌شود. مشخصات و آنالیز سیمان استفاده شده مانند کوره واکنش می‌باشد [۷].

فصل دوم

مروری بر منابع

۱-۲ کلیات

جداسازی گوگرد از گاز ترش یکی از مهمترین فرایندهای صنایع پالایشی می‌باشد که همواره محققان را بر آن داشته تا در پی یافتن فرایندهای جدیدتر، کم هزینه‌تر و با بازدهی جداسازی بیشتر باشند. جداسازی ناخالصی‌های گازها از نقطه نظر ایمنی، کنترل خوردگی، تنظیم ترکیب استاندارد محصولات گاز و مایع، جلوگیری از مسمومیت کاتالیزورهای کارخانه‌های دریافت کننده محصولات گاز یا مایع و بالاخره حد مجاز انتشار مواد آلاینده به محیط زیست الزامی می‌باشد. فرآیندهای زیادی در جهت تولید گوگرد از سولفید هیدروژن به کار برده می‌شود. در برخی از این فرآیندها هدف تولید گوگرد بوده و در بعضی دیگر بازیافت سولفید هیدروژن از یک جریان گاز همراه با تولید گوگرد مد نظر است. واکنش کلاوس جدیدترین روش و بهترین روش برای بازیافت گوگرد می‌باشد. واکنش اصلی کلاوس بر پایه اکسیداسیون سولفید هیدروژن با هوا (اکسیژن) در حضور کاتالیست (بوکیست) در یک راکتور یک مرحله‌ای بود. محصولات این واکنش گوگرد عنصری و آب است. کنترل واکنش به شدت گرمای فوق، مشکل بوده و بازده بازیافت گوگرد در محدوده ۹۰-۸۰ درصد می‌باشد. بعد از تحقیقات بسیار اصلاحات زیادی بر روی این واکنش صورت گرفت که آن را به چند مرحله تبدیل نمودند، در این واکنش‌ها فرض شده است هیچ ناخالصی و مواد مزاحم وجود ندارد. با توجه به اینکه درصد تبدیل گوگرد تابع دما می‌باشد، معمولاً تا ۷۰ درصد از کل واکنش در این مرحله تکمیل می‌گردد. بنابراین غیر از مرحله احتراق یک مرحله یا چند مرحله کاتالیستی نیز مورد نیاز می‌باشد. گوگرد تولیدی بعد از مرحله احتراق و مراحل کاتالیستی باید به منظور پیشرفت واکنش کندانس شده و از جریان جدا گردد. از طرفی به منظور پیشرفت واکنش در مرحله کاتالیستی و نگهداشتن دمای جریان گازی در درجه حرارت بیشتر از نقطه شبنم گوگرد، جریان گاز قبل از ورود به بسترهای کاتالیستی باید مجدداً گرم شود. گاز نهایی خروجی از کندانسور آخر نیاز به فراورش بیشتری جهت سازگاری با محیط زیست دارد. این سازگاری بسته به مکان و ملاحظات زیست محیطی کشورها متفاوت خواهد بود.

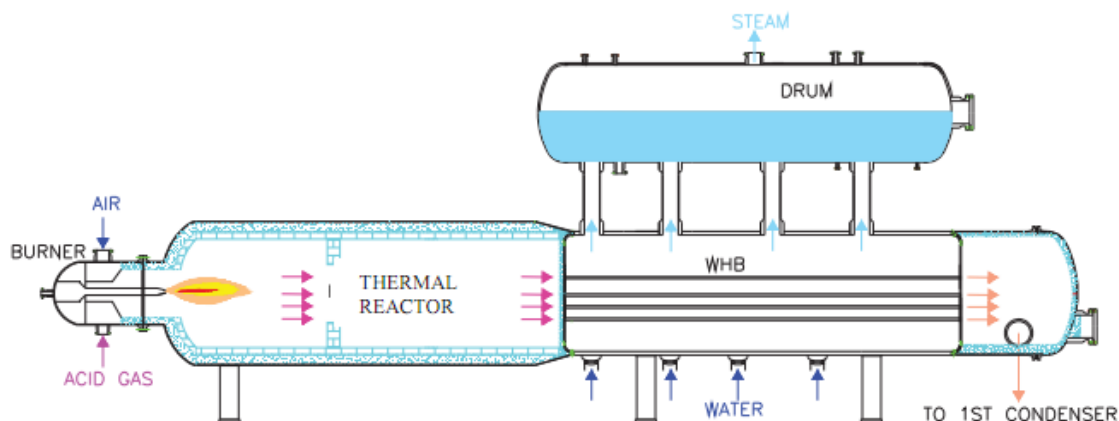
یکی از مهمترین قسمت‌های این واکنش مرحله بازیافت دما می‌باشد که توسط WHB^۱ صورت می‌پذیرد. جهت جذب نمودن حرارت تولید شده در کوره واکنش و مایع کردن بخارات گوگرد و همچنین بالا بردن راندمان فرآیند، گازهای حاصله از احتراق، پس از کوره واکنش وارد یک دیگ بخار^۲ می‌شود تا قطرات گوگرد مایع جدا گردند. جهت کنترل درجه حرارت، گاز ورودی به دیگ بخار به دو بخش تقسیم می‌شود، یک بخش با عبور از تیوب‌های ۲ اینچی به دمایی حدود ۲۳۰ درجه سانتیگراد رسیده و بخش دیگر با عبور از یک خط ۲۴ اینچی که در مرکز دیگ بخار قرار دارد، به دمایی حدود ۶۳۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. این دو بخش در خروجی با یکدیگر مخلوط شده و دمای گاز اسیدی ورودی به بستر کاتالیستی مرحله اول را کنترل می‌نمایند.

به جهت جذب حرارت تولید شده در کوره واکنش و مایع کردن گوگرد، همچنین بالا بردن راندمان واحد، گازهای حاصله پس از کوره واکنش وارد دیگ بخار می‌شوند. متأسفانه در قسمت اتصال کوره با مبدل بازیافت حرارتی تخریب اتصال بین تیوب‌ها و تیوب شیب مشاهده شده است. تخریب اتصالات می‌تواند مشکلات زیادی را در فرایندهای تولید و انتقال گوگرد ایجاد کند که هزینه‌های بسیار زیادی را برای برطرف کردن این مشکلات بر صنعت نفت اعمال می‌کند. پیش‌بینی پروفیل حرارتی و تنش‌های حرارتی به وجود آمده در قسمت اتصال تیوب‌ها و تیوب شیت در محل اتصال کوره با WHB می‌تواند جهت ارائه یک راهکار مناسب و ارزان بسیار با اهمیت و مفید باشد.

در شکل (۱-۲) شماتیکی کلی از قسمت کوره واکنش بازیافت گوگرد به همراه قسمت مبدل حرارتی WHB جهت خنک‌کاری نشان داده شده است.

۱ Wast Heat Boiler (مبدل بازیافت حرارت)

۲ Waste Heat Sulfur Coalescer



شکل (۱-۲): شماتیکی از کوره واکنشی SUR و مبدل بازیافت حرارت WHB [۸]

حساس‌ترین قسمت این کوره محل اتصال کوره با WHB می‌باشد، زیرا در این قسمت گازهای خروجی از کوره با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد از تیوب‌های ۲ اینچی که به تیوب شیت با جوش متصل شده‌اند عبور می‌کنند. این تیوب‌ها بار حرارتی و تنش حرارتی بسیار زیادی را باید تحمل کنند. در پالایشگاه‌های کشور موارد زیادی از تخریب اتصال تیوب‌ها با تیوب شیت دیده شده است که باعث اختلال در کار بازیافت گوگرد گردیده.

کوره واکنش واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه ایلام تا کنون به علت نامعلومی، چهار بار از ناحیه جوش بین تیوب و تیوب شیت (سمت کوره) ترک و نشتی پیدا کرده است. در شکل (۲-۲) این پدیده نشان داده شده است.

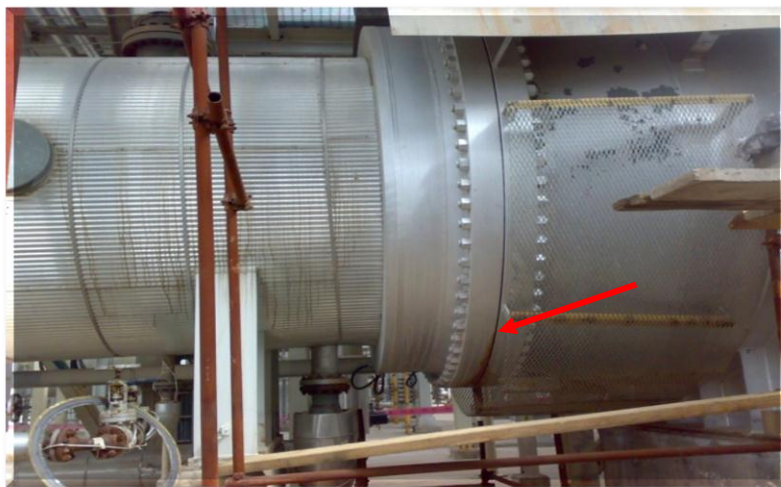


شکل (۲-۲): ترک و نشتی‌های پدید آمده بین تیوب و تیوب شیت [۹]

موارد ذکر شده در بالا و آسیب‌ها به شرح زیر می‌باشند:

۱. واحد گوگرد شماره دو SRU^۲ در مرحله اول ۳۵ روز در سرویس قرار داشت که ۲۵ روز در مد گاز سوخت و ۱۰ روز در مد گاز اسیدی بوده است. در این مدت بخاطر شرایط راه‌اندازی بیش از ۱۰ بار کوره واکنش از سرویس خارج شده و یا از مد گاز اسیدی به گاز سوخت و بالعکس تغییر مد داده است.

در تاریخ ۸۸/۱۱/۲۰ کوره واکنش در مد گاز سوخت قرار داشت که به علت نشتی آب از فلنج بین کوره و WHB واحد از سرویس خارج گردید (شکل ۲-۳) و بعد از بازدید از داخل کوره و تخریب ریفراکتوری مشخص گردید که تعداد ۵۰ عدد از ۳۶۷ تیوب از ناحیه جوش بین تیوب و تیوب شیت دچار آسیب شده‌اند.



شکل (۳-۲): نشتی آب از فلنج بین کوره و WHB [۹]

با توجه به اینکه لوبیایی مربوط به پایه‌های سدل^۱ به انتهای کورس خود رسیده بودند و حتی در بعضی پایه‌ها فوندانسیون نیز ترک خورده بود. در شکل (۲-۴) این پدیده نشان داده شده است.

^۱ Saddle



شکل (۴-۲): رسیدن لوبیایی پایه های سدل به انتهای کورس و ترک روی فوندانسیون [۹]

علت آسیب، مقاومت پایه در برابر حرکت انبساطی تجهیزات تشخیص داده شد و در اسرع وقت نسبت به تعمیر تیوب شیت (با الکتروود *Inconel*)، تنش زدایی، هیدروتست، انجام ریفرکتوری و اضافه کردن طول لوبیای (جهت هر دو واحد بازیافت گوگرد) اقدام شد.

۲. واحد گوگرد شماره یک SRU۱ بعد از کیورینگ اولیه و اصلاح لوبیایی در سرویس قرار گرفت ولی متأسفانه بعد از ۱۳ روز کارکرد (۴ روز گاز شیرین و ۹ روز گاز اسیدی) مشکل عیناً برای این واحد نیز تکرار شد و تعداد ۹۱ عدد تیوب دچار آسیب شدند. لازم بذکر است که در این مرحله توقف^۱ ناخواسته وجود نداشت و فقط در تاریخ ۸۹/۲/۲۸ به علت قطع خوراک گاز و در هنگام تغییر مد وجود نشتی مشخص گردید.

پس از بررسی های متعدد با توجه به اینکه احتمال می رفت که مشکل از جوش باشد و ۵۰ عدد از تیوب ها تعمیر شده بودند، تصمیم گرفته شد واحد بازیافت شماره دو که تعمیر شده بود با سوخت گاز (گاز شیرین) در سرویس قرار گیرد، تا علاوه بر تست جوش های جدید، عملیات بدون گاز اسیدی باشد. در شکل (۵-۲) نمونه هایی از تعمیر و جوشکاری مجدد نشان داده شده است.

^۱ Shut down



شکل (۵-۲): نمونه‌هایی از تعمیر و جوشکاری مجدد [۹]

۳. همانطور که گفته شد، تصمیم گرفته شد که واحد گوگرد شماره دو SRU۲ در مد گاز سوخت در سرویس قرار گیرد، ولی متأسفانه مشکل در کمتر از ۱۵ روز مجدداً تکرار شد و تعداد ۷۳ عدد تیوب دچار نشتی شده بودند که از این تعداد ۲۷ عدد مربوط به تیوب‌هایی بودند که به تازگی جوشکاری و تعمیر شده بودند.

۴. با توجه به تجربیات قبلی و با همکاری سایر پالایشگاه‌ها تصمیم گرفته شد که تمامی جوشها برداشته و با الکتروود جدید (DR ۷۰S۶) مجدداً جوشکاری شود، همچنین جهت روان کردن حرکت انبساطی تجهیز سدل‌های زیر WHB از لغزشی به غلطشی تغییر داده شدند. تدبیرهای انجام شده در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.



شکل (۶-۲): جوشکاری با الکتروود جدید (DR ۷۰S۶) و تجهیز سدل‌های زیر WHB از لغزشی به غلطشی [۹]

بعد از اقدامات فوق واحد بازیافت گوگرد شماره دو، در دیماه ۱۳۸۹ در سرویس قرار گرفت و متأسفانه بعد از مدت ۹ روز کارکرد در مد گاز سوخت برای بار سوم جوش بین تیوب و تیوب شیت آسیب دید که در شکل (۷-۲) نشان داده شده است [۹].



شکل (۷-۲) : آسیب‌های پدید آمده جوش بین تیوب و تیوب شیت برای بار سوم بعد از تعمیرات [۹]

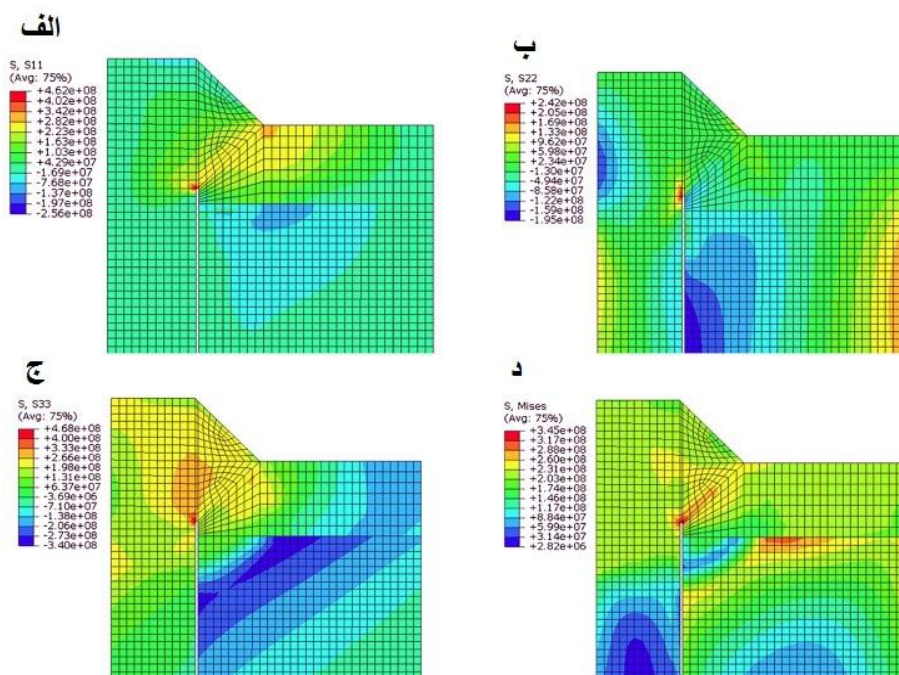
با توجه به موارد ذکر شده بر آن شدیم که تحلیل‌های حرارتی و تنش‌ها را مورد بررسی قرار دهیم و مشکل پدید آمده را مرتفع سازیم. به طور کلی بر روی کوره واکنشی بازیافت گوگرد تحقیقات عدیده‌ای انجام گرفته است. بیشترین بررسی‌ها در قسمت واکنش‌هایی که در کوره واکنش صورت پذیرفته است و بهینه نمودن واکنش جهت بازیافت گوگرد بیشتر صورت پذیرفته است.

۲-۲ کارهای انجام شده در سال‌های اخیر

تنش پسماند تنشی است که بر اثر انجام عملیات خاصی در جسم باقی می‌ماند و در حالی که جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست نیز وجود دارد. عموماً، عبارت تنش پسماند به صورت اثر استاتیکی، نماینده میدان‌های تنشی تک محوری یا چند محوری در یک سیستم بسته، بدون وجود هیچ‌گونه نیرو یا گشتاور خارجی است. طبیعت تنش پسماند به گونه‌ای است که در مقابل هر تنش کششی، تنش فشاری نیز باید وجود داشته باشد، به گونه‌ای که جسم در حالت تعادل باقی بماند که به این حالت «حالت خود تعادلی» می‌گویند. این مواضع تنشی با هم در تعادل هستند.

تنش فون مایز به طور گسترده‌ای برای بررسی اینکه آیا طراحی انجام شده تحمل شرایط واقعی بار ارائه شده را دارد یا خیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر مقدار حداکثر تنش فون مایز ناشی از مواد بیشتر از قدرت مادی آن باشد، طراحی انجام شده شکست خواهد خورد. این آثار به خوبی برای بسیاری از موارد، به ویژه هنگامی که مواد انعطاف پذیر در طبیعت است مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شوگن^۱ و همکارش ویکیانگ^۲ به بررسی تنش‌های پسماند^۳ ایجاد شده در قسمت جوش بین تیوب و تیوب شیت در یک مبدل حرارتی، با استفاده از روش‌های عددی المان محدود به صورت دوبعدی پرداخته‌اند.



شکل (۸-۲): تنش‌های باقیمانده: (الف شعاعی (ب محوری (ج حلقه‌ای^۴ (د فون مایز [۱۰]

در این تحقیق تاثیر دمای ورودی گازها، پیش گرمایش جوشکاری و فاصله بین تیوب و تیوب شیت هنگام جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش دمای گازهای

^۱ Shugen Xu
^۲ Weiqiang Wang
^۳ Residual Stresses
^۴ Hoop

ورودی تخریب بیشتری به همراه دارد، در صورتی که با افزایش دمای پیش گرمایش جوشکاری تنش پسماند کمتری در قسمت جوش بین تیوب و تیوب شیت در مبدل حرارتی به وجود می‌آید و با افزایش اندازه شکاف بین تیوب و تیوب شیت در حین جوشکاری تنش پسماند بیشتری را در ناحیه مورد بحث مشاهده شده است. موارد ذکر شده از نتایج حل عددی که در شکل (۲-۸) نشان داده شده است به دست آمده‌اند [۱۰].

جوز لوییس اوتگوی^۱ و همکارش پابلو گابریل فازینی^۲ به بررسی مبدل‌های حرارتی که در موارد مختلف مورد استفاده قرار گرفتند پرداخته‌اند. برای تعیین ضخامت لوله و تیوب و تنش‌های مجاز در المان محدود از ASME BPVC section ۸ استفاده کرده‌اند. بیشترین دما در زمان آغاز به کار و توقف پدید می‌آید. در دمای 620°C عملیات نصب انجام می‌گیرد و تیوب‌ها در کوره جاسازی می‌شوند. بیشترین عوامل به وجود آمدن تخریب را جنس، ساخت، جوشکاری، تعمیر و نگهداری و عملکرد می‌دانند. در قسمت تیوب شیت‌های سرد شاهد آسیب بیشتری بودند. آنها بر این باور بودند که همیشه آب‌بند کردن تیوب و تیوب شیت با جوشکاری موفق نبوده زیرا شاهد شکاف‌هایی بین آنها بودند. اساس اکثر این شکاف‌ها جوش بین تیوب و تیوب شیت می‌باشد. همانطور که در شکل (۲-۹) نشان داده شده است [۱۱].



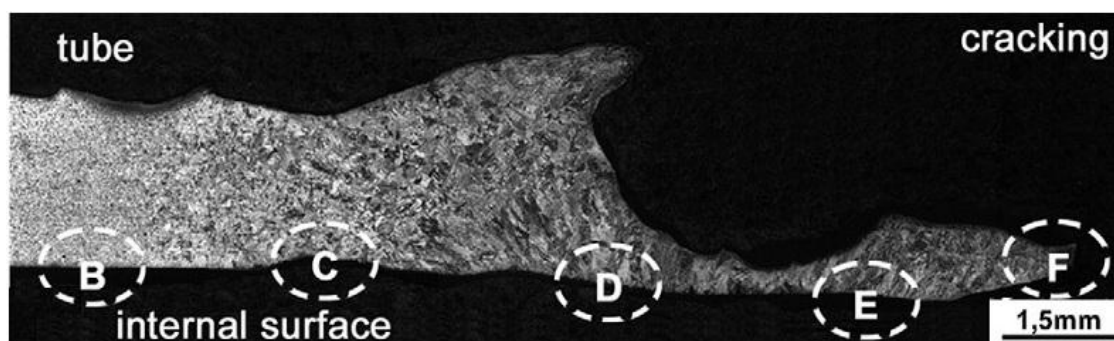
شکل (۲-۹): شکاف‌های پدید آمده بر روی جوش و تیوب [۱۱]

^۱ Jose Luis Otegui

^۲ Pablo Gabriel Fazzini

جوز لوییس اوتگویی و همکارش ادعا کردند که نصب نامناسب و کار کردن بیش از حد سیستم دلیل شکاف و تخریب تیوب می‌باشند و بر این باورند که تیوب‌های سرد ناخالصی‌هایی دارند که باید روش ساخت آنها اصلاح گردد [۱۱].

آزودو^۱ و همکارانش^۲ نیز به بررسی علل تخریب و شکستن جوش از لحاظ جنس و کارکرد پرداختند. مبدل حرارتی مورد تحقیق در دمای 580°C به مدت ۵۰۰۰۰ ساعت کار کرده است. آنها مشاهده کردند که در زمان توقف که تیوب شیت سرد می‌شود، به علت تنش‌های پسماند بالا شاهد تخریب جوش و تیوب شیت هستند. آنها دریافتند که درجه حرارت بالای تخریب جوش تیوب و تیوب شیت توسط دانه‌های اکسیداسیون وابسته به شدت شکاف بسیار ریز که در مناطق ذوب فضاها را پر می‌کنند تا به سختی کربن‌ها را جدا سازد. در شکل (۲-۱۰) نمونه‌ای از این بررسی همچنین نتایج به دست آمده قابل مشاهده می‌باشد که نشان دهنده‌ی شکاف‌های بسیار ریز ذکر شده می‌باشد [۱۲].



شکل (۲-۱۰): مثال از شکاف‌های پدید آمده بر روی جوش و تیوب و تیوب شیت [۱۲]

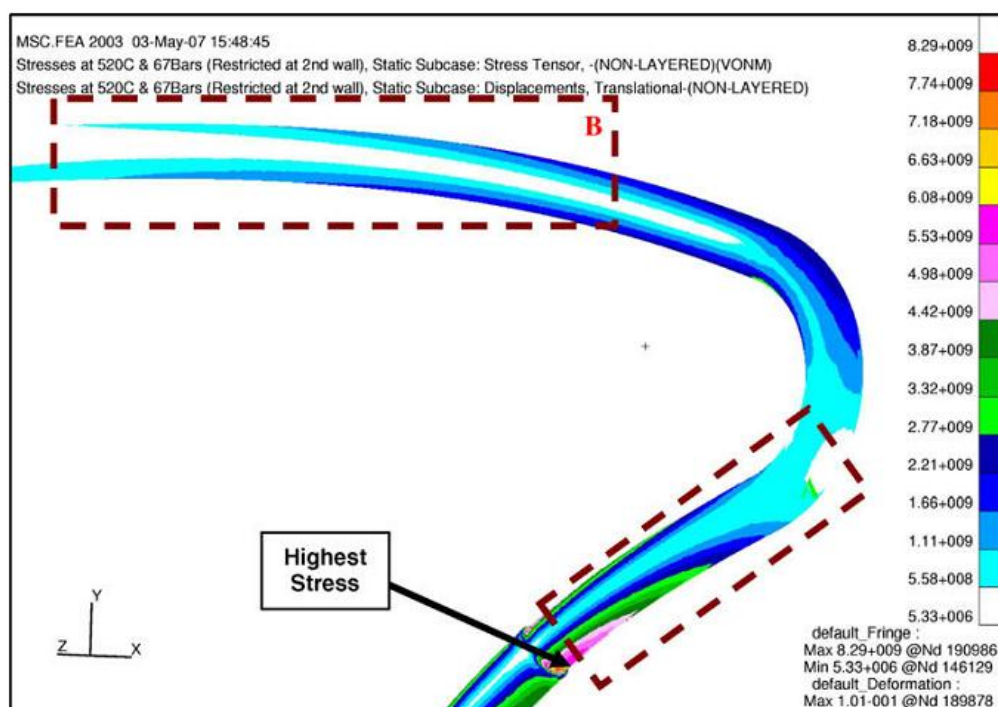
اوتمان^۳ و همکارانش^۴ به بررسی علل تخریب تیوب‌های سوپرهیت در بویلر با روش المان محدود پرداختند. آنها به بررسی روابط بین بیشترین تنش و تغییر شکل با شرایط محدود مجاز پرداختند و نتیجه این که دما مهمترین عامل تخریب تیوب می‌باشد. در شکل (۲-۱۱) تنش‌ها و تغییر شکل در قسمتی که بیشترین دما را دارد قابل مشاهده می‌باشند [۱۳].

^۱ Azevedo

^۲ F. Beneduce Neto & S.D. Brandi & A.P. Tschiptschin

^۳ Othman

^۴ J. Purbolaksono & B. Ahmad



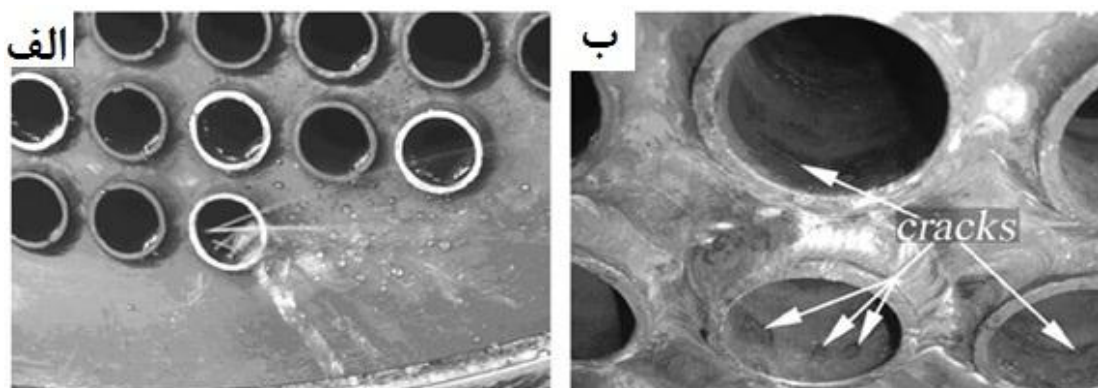
شکل (۱۱-۲) : تنش‌ها و تغییر شکل‌های حاصل شده از شبیه‌سازی [۱۳]

گو^۱ و همکارانش^۲ ترکیب شیمیایی، توزیع عناصر و ریخت‌شناسی شکاف‌ها و ترک‌ها را در مبدل حرارتی به صورت دسته‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند. اختلاف زیاد ضریب انبساط حرارتی آهن و آستنیک^۳ نیز باعث تشدید تخریب می‌گردد. این محققان جوش‌ها را تحت فشار آب تست کرده‌اند که نتایج در شکل (۱۲-۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌های حاصل از تست مشاهده شده است تخریب در قسمت اتصال بین تیوب و تیوب شیت می‌باشد. در حقیقت نقاط بحرانی نقاط اتصال تیوب به تیوب شیت تشخیص داده شده است. راه‌های پیشنهادی این محققان سازگاری بین مواد تیوب و مواد جوش می‌باشد، همچنین جوشکاری با دمای ورودی پایین و تکرار جوشکاری بعد از سرد شدن کامل جوش می‌باشد و این محققان چنین فرض کرده‌اند که با تغییر جنس تیوب از $Cr^{13}Al$ به Austenitic steel TP^{321} می‌توان جلوی این پدیده را گرفت [۱۴].

^۱ C. Guo

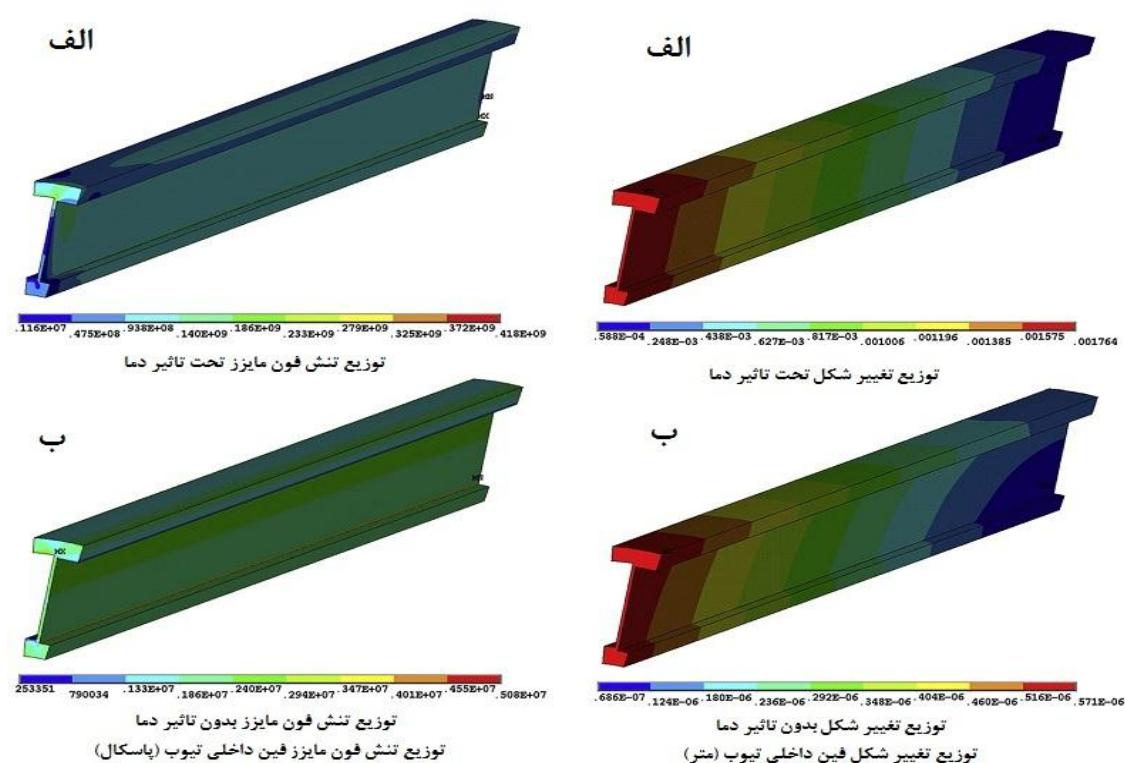
^۲ C.J. Han & Y.M. Tang & Y. Zuo & S.Z. Lin

^۳ Asthenic



شکل (۲-۱۲): (الف) ترک ایجاد شده در هنگام تست آب (ب) ترک ایجاد شده پس از تست آب [۱۴]

تینگ ما^۱ و همکارانش^۲ به بررسی استرس‌های فین‌های داخلی تیوب‌های مبدل حرارتی با روش المان محدود پرداخته‌اند. این تحقیقات شامل تاثیر بار حرارتی، شکل تیوب و فاصله آنها می‌شود. بار حرارتی بالا مهمترین دلیل تنش بالا و تغییر شکل در مقایسه با فشار می‌باشد. بیشترین تنش در قسمت اتصال فین داخلی به تیوب داخلی می‌باشد.



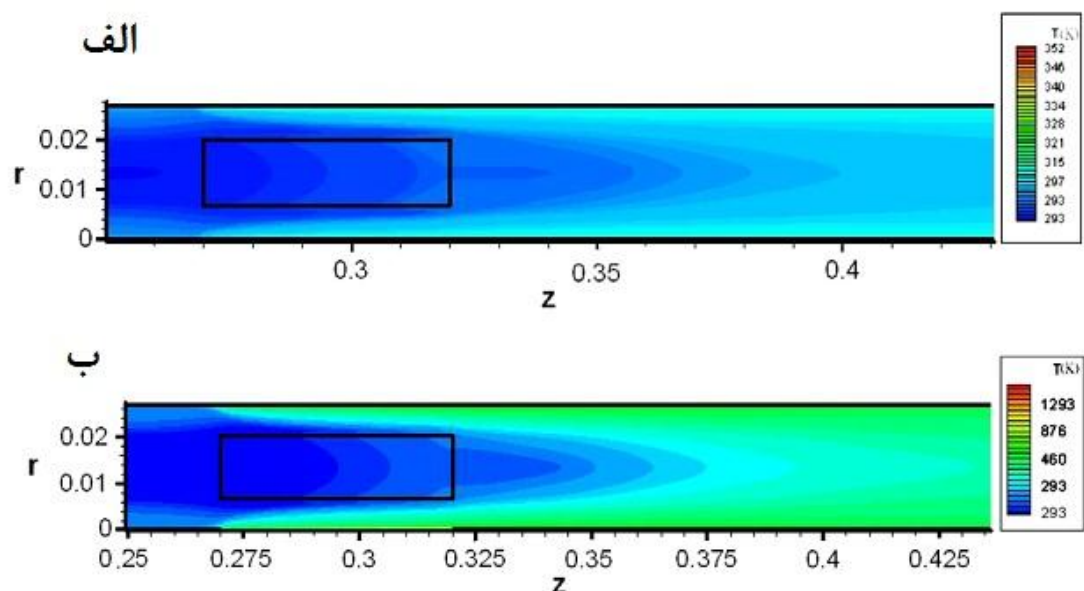
شکل (۲-۱۳): توزیع تغییر شکل و تنش فون مایز فین داخلی در دو حالت با بار حرارتی و بدون آن [۱۵]

^۱ Ting Ma

^۲ Yitong Chen & Min Zeng & Qiuwang Wang

شکل (۲-۱۳) نتایج شبیه‌سازی این محققان و موارد ذکر شده از آن را به طور واضح نشان می‌دهد. این محققان جهت مرتفع نمودن این پدیده پیشنهاد دادند که باید فاصله کمتر از یک میلی متر در نظر گرفته شود و فین داخلی با تیوب داخلی جوشکاری نگردد [۱۵].

یانگ^۱ و همکارش مینگلو اچوانگ^۲ به بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت در جریان توربولنت درون تیوب‌های مبدل حرارتی توسط مدل‌سازی عددی پرداختند. شبیه‌سازی به صورت دو بعدی و با در نظر گرفتن مدل توبولنس $k-\epsilon$ انجام گرفت. نتایج این محققان که در شکل (۲-۱۴) آمده است نشان می‌دهد توزیع عدد ناسلت در راستای جریان با افزایش عدد رینولدز لایه مرزی افزایش و عدد دارسی کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفته‌اند که عدد دارسی تاثیر چندانی بر روی افت فشار ندارد [۱۶].



شکل (۲-۱۴): پیش‌بینی عددی توزیع دما درون تیوب: الف) $T_w = 80^\circ\text{C}$ ب) $q_w = 80 \text{ kW/m}^2$ [۱۶]

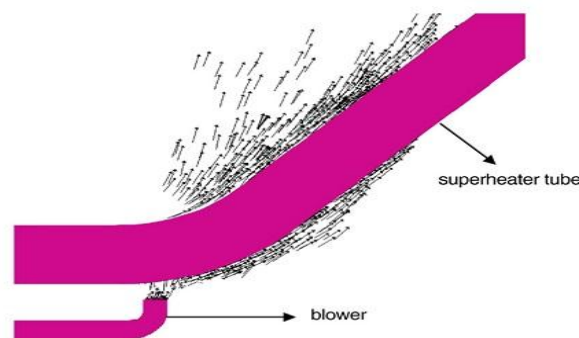
مسعود رحیمی و همکارانش^۳ به بررسی علل تخریب تیوب‌های سوپر هیت در بویلرها با استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداختند. با بررسی‌های صورت گرفته دریافتند که روش مدل‌سازی عددی جهت

^۱ Yue-Tzu Yang

^۲ Ming-Lu Hwang

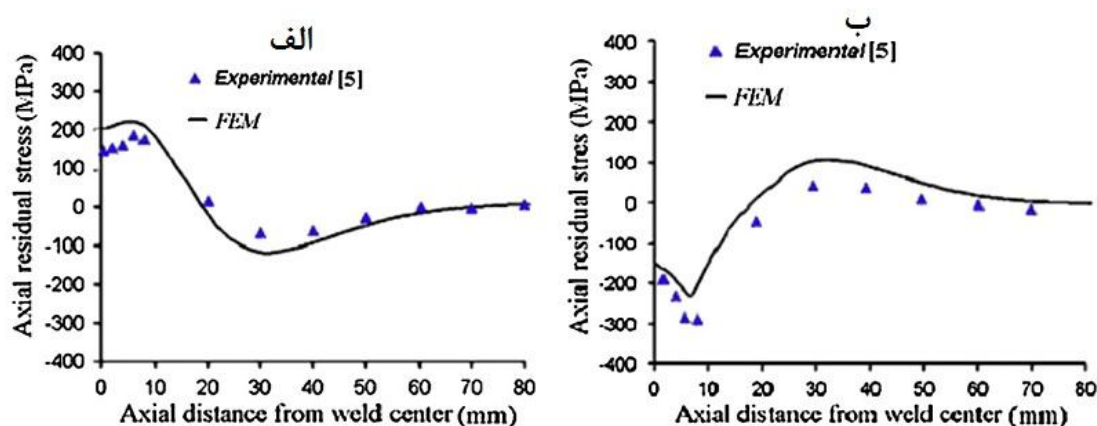
^۳ A. Khoshhal & A. A. Alsairafi

پیش‌بینی پدیده‌ها مناسب می‌باشد. این محققان چنین نتیجه گرفتند که در لوله با طول بیشتر درجه حرارت بالاتری مشاهده می‌شود در نتیجه تنش پسماند بیشتری دارد و منجر به شکست خواهد شد. جهت جلوگیری از این تخریب لوله جریان هوا جهت خنک کاری این تیوب قرار داده شده است که مدل‌سازی آن در شکل (۲-۱۵) نشان داده شده است [۱۷].



شکل (۲-۱۵): جریان هوای اعمال شده به بدنه بیرونی تیوب سوپر هیت [۱۷]

اکبری و همکارش ستاری‌فر با استفاده از روش عددی المان محدود به بررسی تاثیر حرارت ورودی جوشکاری بر تنش‌های پسماند در تیوب و جوش با جنس‌های متفاوت پرداختند. آنها از نتایج تجربی نیز استفاده نمودند و نتایج را با حل عددی مقایسه نمودند که در شکل (۲-۱۶) این مقایسه نشان داده شده است [۱۸].



شکل (۲-۱۶): تنش پسماند محوری روی الف) سطح داخلی ب) سطح بیرونی و مقایسه با نتایج تجربی [۱۸]

نتایج تحقیقات این محققان نشان می‌دهد که در قسمت جوشکاری فولاد زنگ نزن^۱ ۳۰۴ با کربن استیل A۱۰۶ بیشترین تنش پسماند بر روی فولاد زنگ نزن اعمال می‌شود و این یک توزیع نامناسب می‌باشد. مقدار تنش هوپ^۲ با تغییر دمای ورودی تغییر چندانی نمی‌کند. نتایج آنها نشان می‌دهد وقتی حرارت ورودی جوشکاری کاهش یابد تنش پسماند فولاد زنگ نزن در نزدیکی قسمت جوش نیز کاهش می‌یابد [۱۸].

با توجه به عملکرد WHB که برای بازیابی حرارت گازهای داغ خروجی کوره واکنش گوگرد به کار می‌رود شاهد تولید بخار در پوسته مبدل WHB بوده‌اند. علاوه بر بررسی تنش‌های اعمال شده به تیوب و تیوب شیت و جوش اتصال بین آنها بحث مدلسازی جوش و تشکیل حباب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این قسمت به بررسی و بازبینی مطالعات و پژوهش‌هایی که در زمینه جوش و تشکیل حباب انجام گرفته می‌پردازیم. محققان بسیاری در این زمینه کارهای متفاوت و بسیار با ارزشی را انجام داده‌اند. جوش را در انواع سیالات مورد بررسی قرار داده‌اند که در اینجا چند نمونه را برگزیده و مورد بررسی قرار می‌دهیم.

شایو یین^۳ و همکارانش به بررسی پارامترهای موثر بر جوش آب در یک تیوب افقی پرداخته‌اند. با تغییر پارامترهایی همچون سرعت آب، قطر تیوب و شار حرارتی در شش الگوی جوش شامل جریان حبابی^۴، تویی یا قالبی^۵، لایه‌ای^۶، موجی^۷، لخته‌ای^۸ و حلقوی^۹ نتایجی که در اشکال (۲-۱۷)

^۱ Stainless Steel

^۲ Hoop

^۳ Shaowu Yin

^۴ Bubble

^۵ Plug

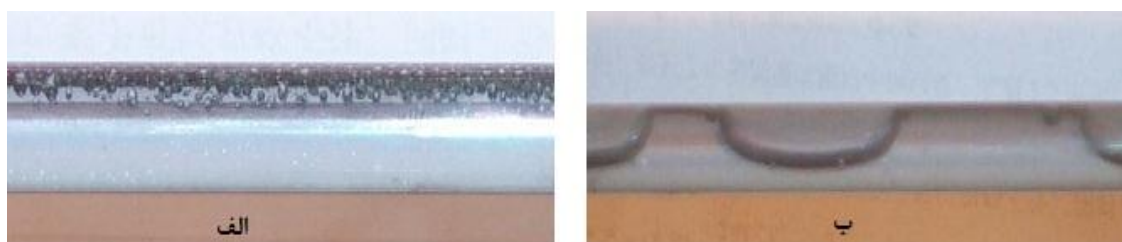
^۶ Stratified

^۷ Wave

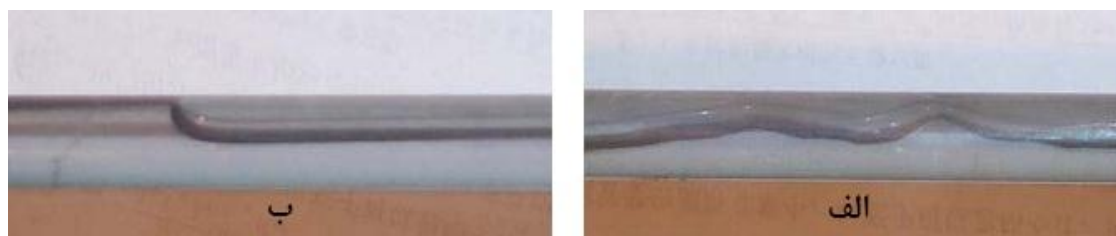
^۸ Slug

^۹ Annular

تا (۱۹-۲) نشان داده شده است را به دست آوردند. البته این الگوها در سه دسته متناوبی^۱، لایه‌ای-موجی^۲ و حلقوی که متناوبی و لایه‌ای-موجی در جریان سیال پایین و حلقوی در جریان سیال بالا هستند نیز بررسی گردید [۱۹].



شکل (۱۷-۲): الف) جریان حبابی ب) جریان قالبی یا تویی [۱۹]



شکل (۱۸-۲): الف) جریان موجی ب) جریان لخته‌ای [۱۹]



شکل (۱۹-۲): الف) جریان حلقوی ب) جریان لایه‌ای [۱۹]

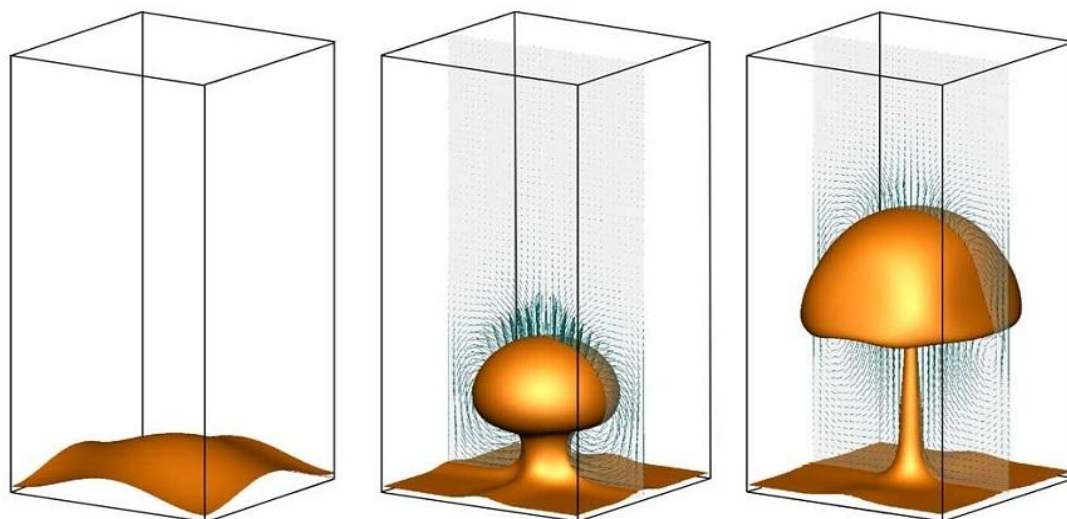
همانطور که در نتایج به دست آمده مشاهده گردید؛ شار گرما، سرعت سیال و قطر تیوب تاثیر به سزایی در این پدیده دارند. حرارت بر واحد جرم در طول کل لوله با زیاد شدن شار گرمایی، کم شدن سرعت سیال و کم شدن قطر تیوب افزایش می‌یابد. حالت گذار با کیفیت بخار کوچکتر همراه با افزایش حرارت بر واحد جرم پدید می‌آید. نتایج تجربی با الگوهای آدیاباتیک مقایسه گردیده که نشان

^۱ Intermittent

^۲ Stratified-wave

می‌دهد این الگوها آدیاباتیک برای پیش‌بینی جوشش آب مناسب نمی‌باشند [۱۹].

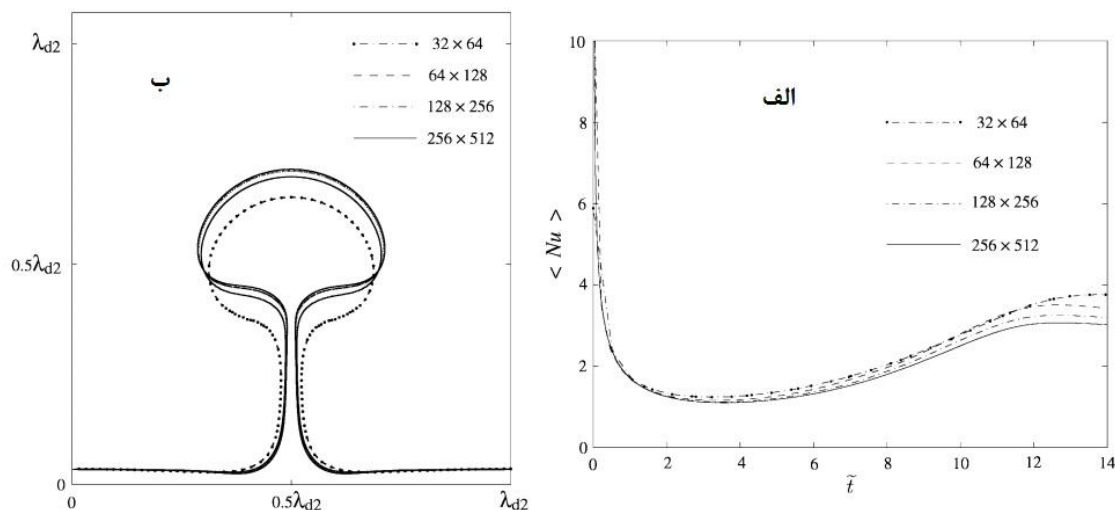
اسماعیلی و همکارش گرتار تریگواسون^۱ بر روی جوشش مستقیم فیلم سیال از یک سطح افقی تحقیق و بررسی نمودند. آنها در این تحقیق از روش‌های عددی و تکرار معادلات بهره بردند. این محققان نتایج مدلسازی خود را با نتایج تجربی به دست آمده معتبرسازی کرده‌اند. در این مدلسازی روش فرمول‌بندی تک زمینه‌ای^۲ که یک سری معادلات بقاء^۳ برای هر دو فاز نوشته می‌شود به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از مدلسازی در شکل (۲-۲۰) نشان داده شده است که به طور دقیق و مرحله به مرحله تشکیل حباب را نشان داده است [۲۰].



شکل (۲-۲۰): توسعه فصل مشترک مایع و بخار (تشکیل حباب) و سرعت فرآیند فیلم جوشش [۲۰]

شکل (۲-۲۱) مقایسه مرز فازها را قبل از تشکیل حباب و عدد ناسلت را بر حسب زمان بر روی نمودار به صورت منحنی نشان می‌دهد. خط‌های نشان داده شده در این شکل اعداد بی‌بعدی هستند که شبکه دوبعدی را تفکیک نموده و به شبکه‌های ریزتر و با دقت بیشتر تبدیل می‌کند. این محققان با مقایسه پدیده با مدلسازی انجام شده به این نتیجه رسیدند که مدلسازی با شبکه‌های ریزتر به واقعیت نزدیکتر خواهد بود [۲۰].

^۱ Gré tar Tryggvason
^۲ Single-Field Formulation
^۳ Conservation Equations

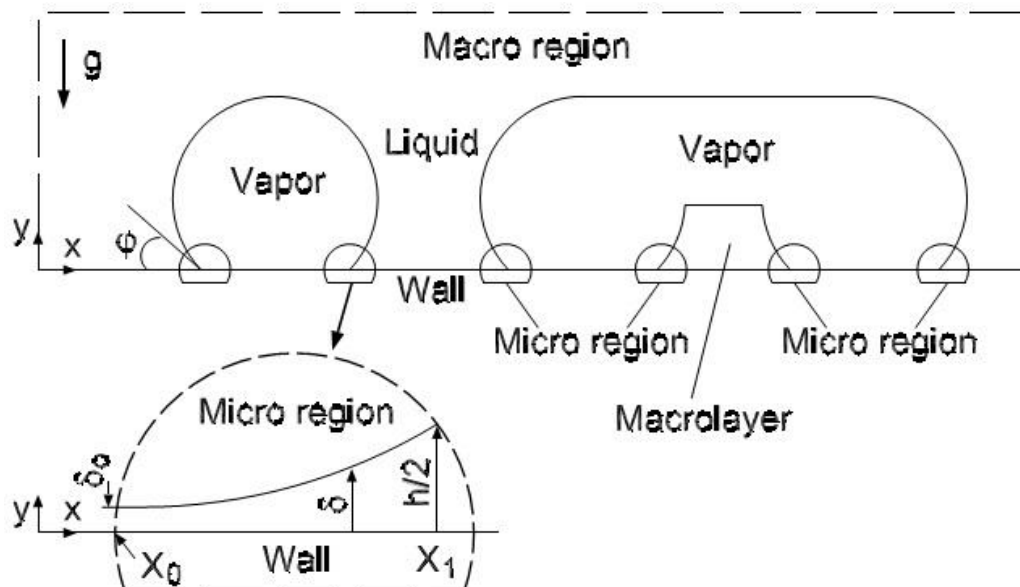


شکل (۲-۲۱): الف) تغییرات عدد ناسلت بر حسب زمان ب) مقایسه مرز فازها قبل از تشکیل حباب [۲۰]

گیهون سون^۱ و همکارش ویجای کی دهیر^۲ بر روی تشکیل حباب در جوشش با شار گرمایی بالا کار کردند. آنها از معادلات بقاء حاکم بر جرم، ممنتوم و انرژی برای مدل سازی عددی در فازهای مایع و بخار موجود استفاده نمودند. جوشش حباب ها در لایه های میکروسکوپی با شار گرمایی زیاد بررسی شده است. تاثیر دیوار بسیار داغ، عدد دانسیته مکان تشکیل هسته حباب و زمان انتظار برای تشکیل حباب دینامیکی و انتقال حرارت به حباب مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل (۲-۲۲) مناطق ماکرو و میکرو مورد استفاده در مدل سازی به صورت واضح تشریح شده است [۲۱].

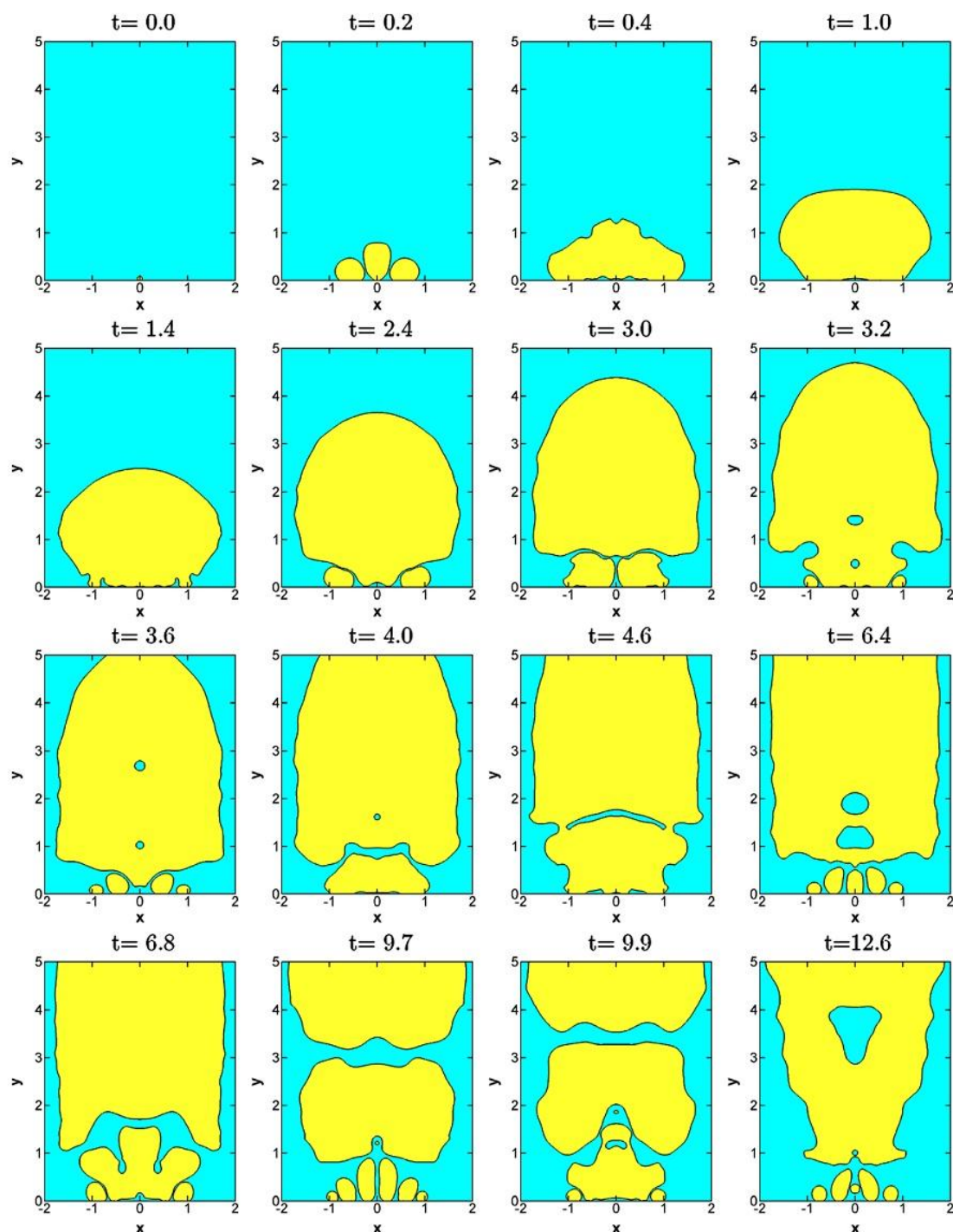
^۱ Gihun Son

^۲ Vijay K. Dhir



شکل (۲-۲۲) : مناطق ماکرو و میکرو مورد استفاده در مدل سازی [۲۱]

نتایج تحقیقات این محققان نشان می دهد که در دیواری که گرمای آن بسیار زیاد نباشد حبابها جداگانه رشد می کنند و به وجود می آیند و بعضی از اوقات ادغام حبابها اتفاق می افتد، ولی در دمای بالاتر حبابها به صورت قارچ سریع به وجود می آیند و به طور منظم شاهد ادغام حبابها بودند. تنها دلیل افزایش عدد دانسیته نواحی فعال شار حرارتی دیواره بسیار داغ نیست بلکه کاهش زمان انتظار نیز دلیلی بر افزایش آن می باشد. نتایجی که در مورد آن بحث شد در شکل (۲-۲۳) قابل نشان داده شده است [۲۱].



شکل (۲-۲۳): رشد و ادغام حباب در اختلاف دمای 25°C ، فضای بین نواحی فعال 0.5 ، عدد دانسیته $5/4$ و زمان انتظار 0.1 [۲۱]

۳-۲ جمع‌بندی کارهای قبلی و نوآوری این پایان نامه ارشد

در موارد ذکر شده به بررسی تنش‌های حرارتی در مبدل‌های مختلف در زمینه نوع جوش، دمای ورودی به مبدل، جنس تیوب و تیوب شیت، قطر لوله و همچنین پدیده جوشش بر روی سطوح داغ پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از آزمایشات تجربی و مدلسازی‌های عددی صورت گرفته به صورت دوبعدی بوده و در هیچ کدام اتصال مستقیم کوره با مبدل حرارتی WHB مورد توجه قرار نگرفته است.

در این پایان نامه ارشد به بررسی پرفیل حرارتی، تنش حرارتی و جوشش آب در قسمت خارجی مبدل حرارتی WHB در محل اتصال مستقیم کوره با مبدل حرارتی WHB به صورت سه بعدی پرداخته می‌شود. در حقیقت در این پایان نامه ارشد سعی بر مرتفع‌سازی مشکل تخریب تیوب و تیوب شیت در واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه‌های کشور و جلوگیری از توقف کار این واحد و همچنین جلوگیری از هزینه‌های سنگین ناشی از این تخریب‌ها را دارد. خودکفایی در صنعت نفت کشور مهمترین هدف این پایان نامه ارشد به شمار می‌آید.

فصل سوم

معادلات حاکم

۳-۱ کلیات

دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD علم پیش‌بینی جریان سیال، انتقال حرارت، انتقال جرم، واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های مربوطه با حل معادلات ریاضی حاکم بر فرآیندها با استفاده از روش‌های عددی است. CFD یک توصیف کمی از سیال‌های جریان‌دار نسبت به محیط اطراف سیال ارائه می‌دهد. معادلات ریاضی، پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی جریان سیال را توصیف می‌کنند. مدل‌های ریاضی فرآیندهای جریانی به صورت معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیرخطی کوپل می‌باشند. حل تحلیلی آنها فقط برای برخی حالت‌های ساده امکان‌پذیر است. برای بیشتر فرآیندهای جریانی مرتبط با مهندسی مکانیک، معادلات حاکم از طریق عددی حل می‌شوند. در کاربردهای محاسباتی ریاضیات به زبان کامپیوتر ترجمه می‌شود، در نتیجه هزاران محاسبه برای توصیف جریان سیال انجام می‌گیرد. CFD نیازمند چندین فرض محدود کننده است و توصیف کاملی از میدان جریان برای تمامی متغیرها را می‌دهد. شبیه‌سازی CFD پلی میان تئوری و واقعیت است. میدان جریان پیش‌بینی شده با جزئیات یک دیدگاه دقیقی برای رفتار سیال را می‌دهد که برخی اوقات اطلاعات داده شده را نمی‌توان از آزمایشات به دست آورد.

به طور کلی حل عددی معادلات انتقال حاکم جایگزین کردن اطلاعات پیوسته موجود در حل دقیق معادلات دیفرانسیل پاره‌ای با اطلاعات گسسته قابل دسترس در تعداد معینی از موقعیت‌ها است. مقادیر تمام متغیرهای وابسته به این تعداد معین از نقاط شبکه، بعنوان مجهولات اصلی در نظر گرفته می‌شوند. وظیفه یک روش عددی فراهم آوردن یک سری معادلات جبری برای این مجهولات و تجویز یک الگوریتم جهت حل این معادلات جبری می‌باشد. معادلات جبری شامل مقادیر مجهول متغیرهای وابسته به دست آمده از معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم هستند. فرضیاتی درباره اینکه چگونه متغیرهای وابسته مابین نقاط شبکه تغییر می‌کنند، برای این قبیل مشتقات نیاز می‌باشد. از تکنیک CFD به طور گسترده جهت تحلیل جریان و عملکرد تجهیزات فرایندی از قبیل

میکسرها، راکتورهای شیمیایی، بسترهای پرشده، مبدل‌های حرارتی، تجهیزات انحلال و کریستالیزاسیون، جریان داخل لوله‌ها، برج‌های تقطیر و غیره استفاده می‌شود. CFD اجازه تحلیل عمیق مکانیک سیالات و اثرات موضعی در این نوع تجهیزات را به ما می‌دهد. این نتایج در بسیاری از حالات موجب بهبود عملکرد، اطمینان بیشتر، بزرگنمایی قابل اعتماد، بهبود یکنواختی محصول و بهره‌وری بیشتر کارخانه می‌شود. می‌توان گفت که با پیش‌بینی عملکرد یک سیستم در سطوح مختلف، CFD توانایی بهبود راندمان سیستم‌های عملیاتی موجود و همچنین طراحی سیستم‌های جدید را دارد. به طور صریح، تکنیکهای CFD شامل روابط تشکیل دهنده^۱، روشهای ریاضی و تأیید تجربی می‌باشد. روابط تشکیل دهنده محدودیت‌های سیال را در روابطی به محیط اطراف و روابط داخلی متغیرهای جریان توصیف می‌کنند. بسیاری از این روابط تشکیل دهنده تجربی می‌باشند و برخی دیگر نیز بر اساس تئوری یا مفاهیم اصلی فیزیکی می‌باشند. روش‌های ریاضی ابزارهای استفاده شده برای حل معادلات توصیف شده می‌باشند. استفاده از روش عددی وابسته به فرم مخصوص معادلات، دقت مطلوب حل، دانش و مهارت محقق می‌باشد. دقت شبیه‌سازی در مقابل داده‌های تجربی به دست آمده از سیستم عملیات واقعی بایستی چک یا تصدیق شود. این تأیید تجربی برای اطمینان از دقت بودن ابزار محاسباتی بسیار ضروری می‌باشد [۲۲].

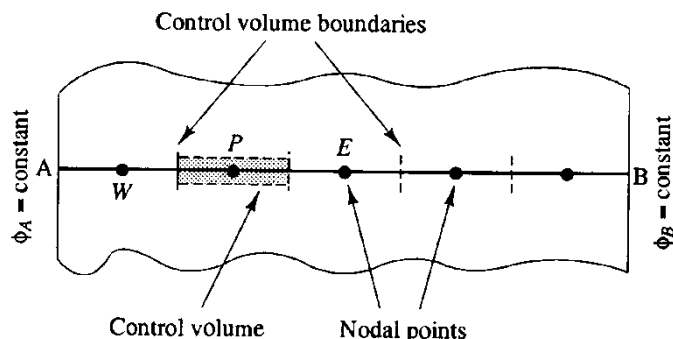
۳-۲ روش‌های گسسته‌سازی

برای هر معادله دیفرانسیل معین، چندین روش مختلف برای به دست آوردن معادلات انفصال (تفاضل محدود، حجم محدود، اجزاء محدود) وجود دارد. اگر شبکه به اندازه کافی ریز باشد، روشهای فوق منجر به حل یکسان می‌شوند.

در این تحقیق از روش حجم محدود بیشترین استفاده شده است. اولین قدم در روش حجم محدود، تقسیم کردن میدان جریان به حجم‌های کنترل گسسته می‌باشد. نمونه‌ای از این گسسته

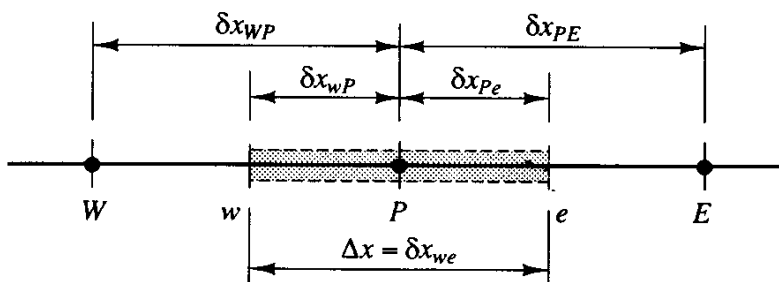
^۱ Constitutive

سازی یک بعدی در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است هر گره توسط یک حجم کنترل احاطه شده است.



شکل (۱-۳): نمونه‌ای از گسسته‌سازی میدان جریان در حالت یک بعدی [۲۲]

در اینجا لازم است که یک سیستم علامتگذاری برای روش حجم محدود معرفی شود. یک قرارداد مرسوم در روشهای CFD در شکل (۲-۳) نشان داده شده است [۲۲].



شکل (۲-۳): سیستم علامتگذاری برای روش حجم محدود [۲۲]

۳-۳ مزایای استفاده از CFD

پیشرفت در دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند مستقیماً با اهداف بیان شده در صنایع شیمیایی سهیم شود. مخصوصاً با کاربرد تکنولوژی‌های محاسباتی نتایج زیر برآورده می‌شوند.

- سیکل‌های توسعه فرآیند کوتاه می‌شود.
- مصرف انرژی، بهینه‌سازی و کنترل می‌شود.
- محصولات جدید و فرایندها به طور موثر طراحی می‌شوند.
- سلامتی، ایمنی و شاخص‌های زیست محیطی بهبود می‌یابد.

مزیت اصلی CFD پتانسیل موجود در کوتاه کردن توسعه فرایندها می‌باشد. با استفاده از روش‌های معمول توسعه بدون بکارگیری CFD زمان مورد نیاز برای رسیدن به هدف مطلوب افزایش می‌یابد. CFD طراحی فرایندها را با افزایش واقعی بودن طراحی، کاهش خطای طراحی، اجازه به توسعه دهنده‌ها برای نمایش نتایج طراحی یا ابداع فرایند را تسهیل می‌کند. با استفاده از CFD برای حل مشکلات فرایندهای موجود خرابی تجهیزات نیز کاهش می‌یابد. CFD اجازه مطالعه عمیق مکانیک سیال و اثرات موضعی در بخشی از دستگاه را می‌دهد. مزایای CFD را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- درک عمیقی از توزیع جریان، انتقال جرم و حرارت، جداسازی خاص و غیره را فراهم می‌کند.
- امکان برآورد و تغییرات هندسی با زمان و هزینه کمتر در مقایسه با تست‌های آزمایشگاهی را فراهم می‌کند.

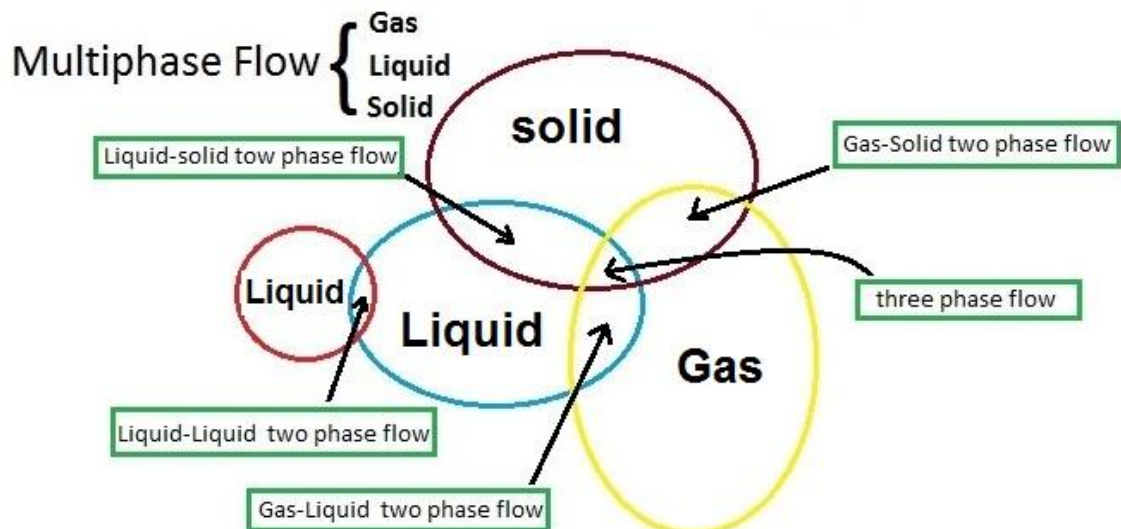
- به بسیاری از سئوالات در کوتاهترین زمان ممکن پاسخ می‌دهد.
- مسایل بزرگنمایی را بدلیل اینکه مدل‌ها بر اساس اصول فیزیکی به دست آمده مستقل از مقیاس هستند را کاهش می‌دهد.

- برای شبیه‌سازی شرایطی که امکان اندازه‌گیری‌های دقیق وجود ندارند (مثل دماهای بالا و محیط‌های خطرناک) مناسب می‌باشد.

بعنوان نمونه بکارگیری CFD برای بهینه‌سازی فرآیندهای با مصرف انرژی بالا (همانند جداسازی) می‌تواند بازده جداسازی را بهبود، نیاز به انرژی را کاهش و عملکرد زیست محیطی را بهبود دهد [۲۲].

۳-۴ شناخت جریان‌های دو فازی :

جریان‌های دو فازی همانطور که از اسم آن مشخص است به جریان‌هایی گفته می‌شود که در آن دو فاز متفاوت از هم در کنار هم حرکت می‌کنند و یک جریان شامل دو فاز متفاوت را ایجاد می‌کند. شکل (۳-۳) نشان دهنده‌ی انواع جریان‌های چند فازی ممکن است :



شکل (۳-۳) : انواع جریان های چند فازی

همانطور که در شکل (۳-۳) نمایان است فازهای متفاوتی که وجود دارد گاز و مایع و جامد است که مشخصاً جریان‌های چند فازی از ترکیب این فازها با هم ایجاد می‌شوند. جریان‌های چند فازی کاربردهای فراوانی در صنعت و در موارد زیادی دارند که به برخی از این کاربردها در جدول (۱-۳) اشاره شده است [۲۳] :

جدول (۱-۳) : از جمله موارد کاربرد جریان‌های چند فازی

توفان شن ، آتشفشان ، بهمن ، ذرات جامد در هوا	طبیعت	گاز- جامد
جمع کننده ی گرد و خاک ، قسمت مایع کننده ی پیشران راکت ، خشک کن اسپری	صنایع	
حرکت شن در رودخانه و دریا ، جریان گل	طبیعت	جامد- مایع
جریان خون	موجود زنده	
جریان دوغاب ، برش کاری واتر جت	صنایع	مایع- گاز
باران ، مه	طبیعت	
راکتور هسته ای بویلر	صنایع	مایع- مایع
امولوسیون ، محلول چربی	صنایع	
پمپ بالا بر هوایی	صنایع	جریان سه فاز

در مورد جریان‌های چند فاز می‌توان اشکال زیر را جهت شناخت بهتر نحوه‌ی جریان‌های چند فاز ارائه کرد :

۳-۴-۱ جریان دو فاز جامد-گاز :

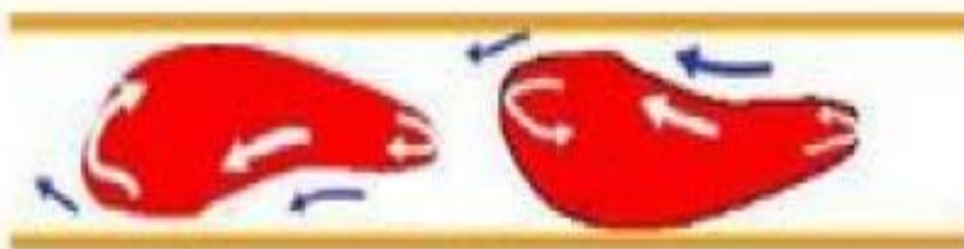
پخش شدن شن در هوا از نمونه‌ای طبیعی این جریان دو فاز است :



شکل (۳-۴) : جریان دو فاز جامد-گاز

۳-۴-۲ جریان دو فاز جامد-مایع :

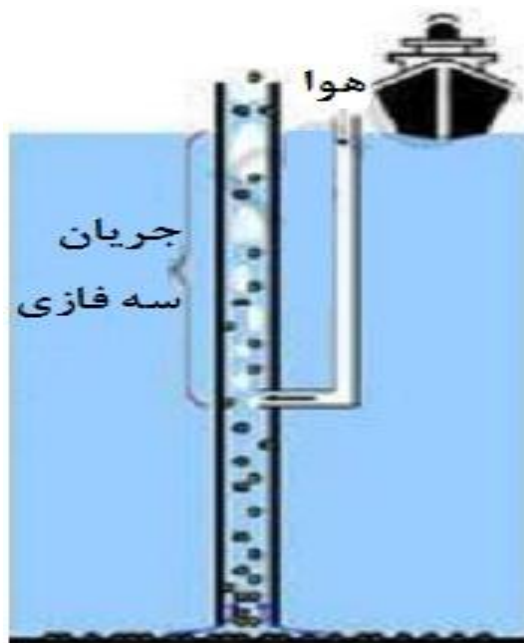
جریان خون در رگ‌ها نمونه‌ای از این جریان است که در آن ذرات معلق جامد در مایع وجود دارد.



شکل (۳-۵) : جریان خون در رگ

۳-۴-۳ جریان سه فازی :

یکی از کاربردهای این جریان‌ها در پمپ‌های بالابر هوایی است :



شکل (۳-۶) : جریان ۳ فازی در پمپ های بالا بر هوایی

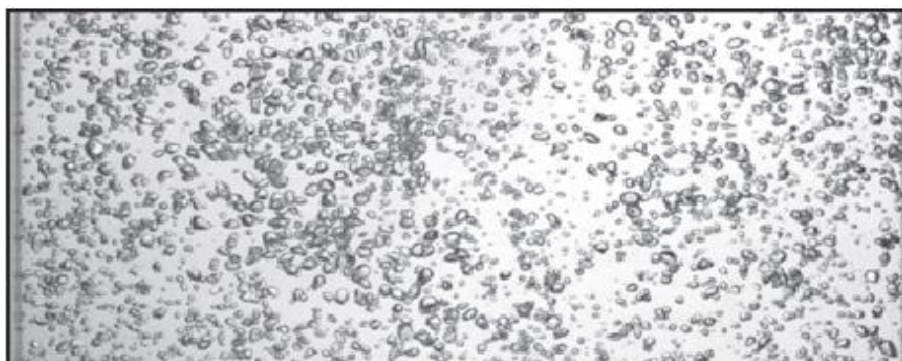
حال با شناخت جریان‌های چند فازی و کاربردهای آنها و جاهایی که امکان وجود این نوع جریان‌ها وجود دارد، به بررسی حالات مختلف ایجاد شده برای جریان‌های دو فازی گاز-مایع می‌پردازیم.

یکی از مهم‌ترین جاهایی که ما با جریان دو فازی مایع-گاز سروکار داریم در پدیده‌ی جوشش است که در آن به واسطه‌ی انتقال حرارت به مایع، کم‌کم حباب‌ها در سطوح ایجاد می‌شوند و این حباب‌ها گسترش پیدا کرده و موجب پدیده‌ی جوشش می‌شوند. جوشش با جابه‌جایی اجباری، همان حباب‌های تشکیل شده در سطح داخلی لوله حاوی مایع گرم می‌باشد. در این شرایط رشد و جدایی حباب، شدیداً تحت تاثیر سرعت جریان قرار دارد و اثر هیدرودینامیکی در این حالت با اثر متناظر در جوشش استخری کاملاً تفاوت دارد. وجود نقش‌های متفاوت در جریان دوفازی باعث پیچیدگی فرآیند و مانع استنتاج نظریه‌های کلی می‌شود. در مورد جریان‌های دو فازی مایع-گاز شکل حباب‌ها مساله‌ی

مهمی است به نحوی که حباب‌های موجود در این جریان‌ها به دو دسته‌ی حباب‌های گروه یک و دو تقسیم می‌شوند :

حباب‌های گروه یک به آن دسته از حباب‌هایی گفته می‌شود که دارای ابعاد کوچک می‌باشند و به صورت جدا از هم امکان حرکت را دارند و می‌توان این حباب‌ها را به صورت کره‌هایی در نظر گرفت که برای این حباب‌ها می‌توان مفهوم قطر متوسط را بیان کرد.

در شکل (۷-۳) حباب‌های بسیار کوچکی در داخل فاز مایع پراکنده شده‌اند که نمایشی از حباب‌های گروه یک است :



شکل (۷-۳) : حباب‌های گروه ۱ [۲۳]

اما در مورد حباب‌های گروه دو باید گفت که در این نوع از حباب‌ها، فاز گازی در قالب حباب‌های با ابعاد بزرگ و شکل‌هایی نامتوازن دیده می‌شوند [۲۳].

حباب‌های گروه یک در فاز مایع به جریان‌های بابل^۱ معروف هستند و در مورد حباب‌های گروه دو حالات مختلفی امکان ایجاد را دارد که جریان‌های حاصل از این حباب‌ها اسلاگ^۲ و یا چورن^۳ هستند. در شکل (۸-۳) حباب‌های گروه دو نشان داده شده است :

^۱ Bubbly Flow

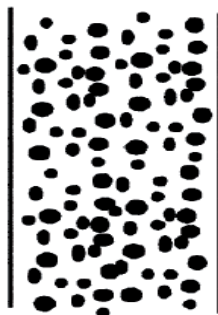
^۲ Slug Flow

^۳ Churn flow



شکل (۸-۳) : حباب‌های گروه ۲ [۲۳]

همانطور می‌دانیم علاوه بر اینکه فاز گاز امکان پراکنده‌گی در فاز مایع را دارد، فاز مایع نیز امکان پراکنده‌گی در فاز گازی را دارد که مثال بارز آن مه است که جریان‌های دراپلت^۱ نامیده می‌شوند که در شکل (۱۱-۳) این جریان را در لوله‌ی قائم نشان داده شده است [۲۳]:



شکل (۹-۳) : جریان دراپلت [۲۳]

۳-۵ جوشش

تبخیر در فصل مشترک جامد-مایع را جوشش گویند. این فرآیند وقتی روی می‌دهد که دمای T_s سطح، از دمای اشباع T_{sat} ، متناظر با فشار مایع، بیشتر شود. گرما از سطح جامد به مایع منتقل می‌شود، قانون سرمایش نیوتن به صورت زیر است :

^۱ Droplet Flow

$$h(T_s - T_{sat}) = q_s'' \quad (۱-۳)$$



شکل (۱۰-۳): جوشش آب

که این اختلاف دما یعنی $T_s - T_{sat}$ را دمای مازاد می‌گویند. فرآیند با تشکیل حباب‌های بخار، که رشد می‌کنند و پشت سر هم از سطح جدا می‌شوند، مشخص می‌گردد. رشد و تحرک حباب‌های بخار، به شکل پیچیده‌ای به دمای مازاد، ماهیت سطح و خواص ترمودینامیکی از قبیل کشش سطحی بستگی دارد. همچنین تشکیل حباب‌های بخار بر حرکت سیال نزدیک سطح، و لذا بر ضریب انتقال حرارت به شدت تاثیر می‌گذارد [۲۳].

۳-۵-۱ انواع جوشش

۱. جوشش استخری

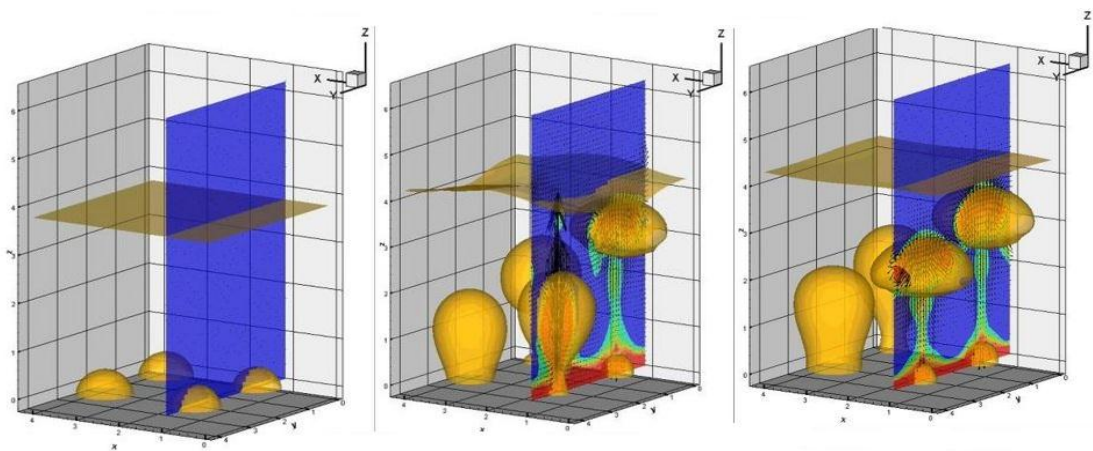
در این حالت، مایع ساکن است و حرکت آن در نزدیک سطح بر اثر جابه جایی آزاد و آشفتگی ناشی از رشد و جدایی حباب از سطح می‌باشد.

۲. جوشش با جابه جایی اجباری

در این حالت، حرکت سیال توسط عوامل خارجی و همچنین بر اثر جابه جایی آزاد و آشفتگی حبابی به وجود می‌آید.

جوشش را می توان به دو صورت فرو سرد و اشباع دسته بندی کرد:

در جوشش فرو سرد دمای مایع کمتر از دمای اشباع است و حباب های تشکیل شده در سطح، ممکن است چگالیده شوند. ولی در جوشش اشباع، دمای مایع کمی بیشتر از دمای اشباع است. لذا حباب های تشکیل شده در سطح توسط نیروهای شناوری پشیرانده و سرانجام از سطح آزاد فرار می کنند [۲۳].



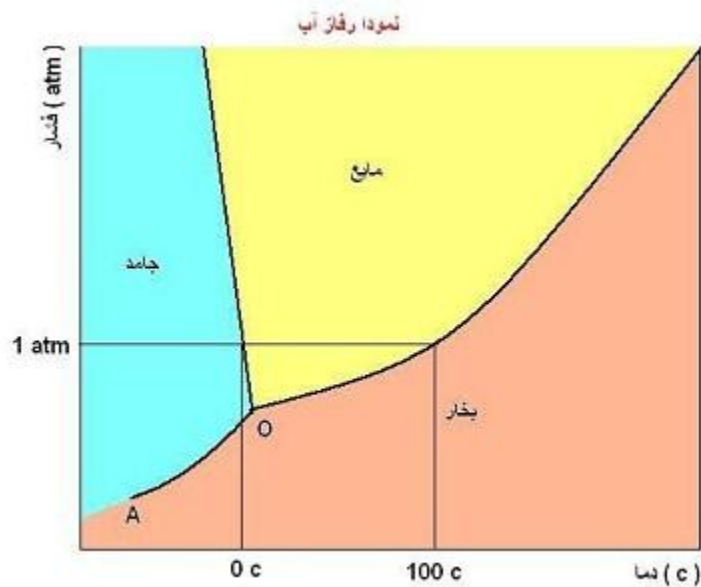
شکل (۳-۱۱): تشکیل حباب ها و تاثیر آنها بر سیال

۳-۵-۲ منحنی جوشش

نوکیاما اولین کسی بود که نواحی مختلف جوشش استخری را با استفاده از وسیله گرمایش بررسی کرد. این محقق با اندازه گیری شدت جریان (I)، و افت ولتاژ (E)، شار گرمایی سیم نیکل-کرم که مورد آزمایش قرار گرفته شده بود را محاسبه کرد.

نوکیاما مشاهده کرد که جوشش، که با تشکیل حباب ها مشخص می شود، تا $T_{sat}-T_s=5$ درجه سانتیگراد شروع نمی شود. با افزایش قدرت، شار گرمایی شدیداً افزایش می یافت تا اینکه، برای مقدار کمی بیشتر از q_{max} ، دمای سیستم به طور ناگهانی به نقطه ی ذوب جهش می کرد و سیم گسیخته می شد. نوکیاما توانست با تغییر جنس سیم به پلاتین، به شارهای گرمایی بیشتر از q_{max} بدون

گسیخته شدن سیم دست یابد.



شکل (۳-۱۲) : نمودار فازهای آب

۳-۵-۳ شیوه‌های جوشش استخری

با بررسی شیوه‌های مختلف جوشش استخری می‌توان به مکانیزم‌های فیزیکی حاکم بر جوشش پی برد. طبق قانون سرمایش نیوتن، q_s'' به ضریب جابه جایی (h) و همچنین به دمای مازاد بستگی دارد. شیوه‌های جوشش استخری عبارتند از:

۱-۳-۵-۳ جوشش با جابه جایی آزاد

اگر دمای مازاد کوچکتر مساوی ۵ درجه سانتیگراد باشد، جوشش با جابه جایی آزاد است. در این حالت، بخاری که با فاز مایع تماس دارد، به اندازه‌ای نیست که بتواند جوشش در دمای اشباع ایجاد کند. با افزایش دمای مازاد، تشکیل حباب شروع می‌شود، اما در زیر نقطه‌ی شروع جوشش هسته‌ای، حرکت سیال اصولاً از اثر جابه جایی آزاد ناشی می‌شود [۲۳].

۲-۳-۵-۳ جوشش هسته‌ای

جوشش هسته‌ای در دمای مازاد بین گستره‌ی ۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد. در این

گستره، دو جریان مختلف را می‌توان تشخیص داد. بین ۵ تا ۱۰ حباب‌های مجزا در مواضع هسته‌زایی به وجود می‌آیند و از سطح جدا می‌شوند. این جدایی باعث می‌شود که سیال نزدیک سطح شدیداً آمیخته و پارامترهای h و q_s'' افزایش یابند. در جوشش استخری، بیشتر تبادل گرما مستقیماً از سطح به مایع انجام می‌گیرد، حباب‌های بخار که از سطح به طرف بالا حرکت می‌کنند در این تبادل گرما نقشی ندارند. وقتی دمای مازاد از ۱۰ درجه سانتیگراد بیشتر می‌شود، مواضع هسته‌زایی بیشتری فعال می‌شوند و تشکیل حباب‌های بیشتر باعث تداخل و به هم پیوستن حباب‌ها می‌شود. در گستره‌ی ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد حباب‌های بخار به صورت جت یا ستون از سطح جدا شده و سرانجام به هم می‌پیوندند و بخار بی‌شکلی را تشکیل می‌دهند. و نهایتاً در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد شار گرمایی بحرانی یعنی q_s'' رخ می‌دهد. مقدار گرمای هسته‌ای را از رابطه زیر می‌توان به دست آورد.

$$q_{\max}'' = \mu_L h_{fg} \left[\frac{g(\rho_L - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{c_{p,L} \Delta T_e}{c_{s,f} h_{fg} Pr_L^n} \right)^3 \quad (2-3)$$

مقدار شار گرمایی ماکزیمم را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد :

$$q_{\max}'' = C h_{fs} \rho_v \left[\frac{\sigma(\rho_L - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3-3)$$

ضریب C برای سطوح افقی برابر ۰/۱۴۹ و برای استوانه با طول زیاد برابر ۰/۱۲ می‌باشد [۲۳].

۳-۳-۵-۳ جوشش انتقالی (گذار)

ناحیه‌ای که در گستره‌ی دمایی مازاد بین ۳۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد باشد را جوشش انتقالی، جوشش با فیلم ناپایدار، یا جوشش با فیلم جزی می‌گویند. تشکیل حباب در اینجا به اندازه‌ای سریع است که لایه‌ایی از بخار روی سطح تشکیل می‌شود. در هر نقطه روی سطح، شرایط بین جوشش

فیلمی و جوشش هسته‌ای نوسان می‌کند، اما کسری از سطح کل که با لایه بخار پوشیده می‌شود با افزایش دمای مازاد، افزایش می‌یابد. چون رسانندگی گرمایی بخار خیلی کمتر از رسانندگی گرمایی مایع است، h و q_s'' با افزایش دمای مازاد کاهش می‌یابد. جوشش انتقالی در عمل کمتر اتفاق می‌افتد، زیرا آن را فقط با کنترل دمای سطح می‌توان به دست آورد، اگرچه نظریه‌ی مناسبی برای این جوشش داده نشده است، ولی می‌توان گفت بین سطح مایع و سطح گرم یک تماس متناوب و ناپایدار برقرار است. البته حد بالای این جوشش مورد توجه است زیرا در آن لایه پایدار بخار تشکیل می‌شود و شار گرما مینیمم است. اگر شار گرما کمتر از این مقدار مینیمم شود لایه بخار از بین می‌رود و سطح سرد می‌شود و دوباره جوشش هسته‌ای برقرار می‌شود. برای یک صفحه‌ی افقی بزرگ مقدار شار گرمایی مینیمم برابر است با [۲۳]:

$$q_{\min}'' = C \rho_v h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_L - \rho_v)}{(\rho_L + \rho_v)^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (۴-۳)$$

۴-۳-۵ جوشش فیلمی استخری

جوشش فیلمی برای دمایی مازاد بالای ۱۲۰ درجه سانتیگراد وجود دارد. نقطه‌ای که شار گرمایی مینیمم دارد، نقطه لیدن فراست نامیده می‌شود. یکی از روابطی که برای جوشش فیلمی روی استوانه یا کره‌ای به قطر D به کار می‌رود به شکل زیر است :

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h}_{conv} D}{k_v} = 0.62 \left[\frac{g (\rho_L - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\nu_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (۵-۳)$$

h'_{fg} گرمای نهان تصحیح شده می‌باشد و عدد پرانتل بخار در مقدار آن تاثیر ضعیفی دارد.

$$h'_{fg} = h_{fg} + \cdot / \wedge c_{p,v}(T_s - T_{sat}) \quad (۶-۳)$$

خواص بخار در دمای فیلم $T_f = \frac{T_s + T_{sat}}{۲}$ و چگالی مایع در دمای اشباع ارزیابی می‌شود. در دماهای زیاد سطح انتقال گرمای تشعشعی در عرض لایه بخار قابل توجه است. در این حالت فرایندهای تشعشعی و جابه جایی جمع پذیرند و معادله زیر برای محاسبه ضریب کلی انتقال گرما ارائه می‌شود :

$$\bar{h}_f = \bar{h}_{conv} + \bar{h}_{rad} \bar{h}_f \quad (۷-۳)$$

اگر $\bar{h}_{rad} < \bar{h}_{conv}$ ، از رابطه ساده زیر می‌توان استفاده کرد :

$$\bar{h} = \bar{h}_{conv} + \frac{\bar{h}_{rad}}{\bar{h}_f} \quad (۸-۳)$$

ضریب تشعشع مؤثر به صورت زیر است :

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^f - T_{sat}^f)}{(T_s - T_{sat})} \quad (۹-۳)$$

که در آن ε گسیل‌مندی سطح جامد و σ ثابت استفان بولتزمن است [۲۳].

۳-۵-۴-۱ تاثیر سایر پارامترها بر جوشش استخري

۱. میدان گرانشی

تاثیر میدان گرانشی در جوشش در کاربردهای فضایی و ماشین‌آلات چرخان باید در نظر گرفت. وگرانش نزدیک ONB می‌تواند بر جابه‌جایی ناشی از حرکت حباب‌ها تاثیر بگذارد.

۲. فروسرد کردن مایع

اگر دمای مایع در جوشش استخری کمتر از دمای اشباع باشد، گفته می‌شود مایع فرو سرد است. $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_l$ در جوشش هسته‌ای تاثیر فروسرمايش ناچيز است ولی شارهای گرمای ماکزیمم و مینیمم بر حسب ΔT_{sub} به طور خطی افزایش می‌یابند. برای جوشش فیلمی شار گرما با افزایش ΔT_{sub} به شدت افزایش می‌یابد [۲۳].

۳. زبری سطح

در حالت جوشش هسته‌ای به مقدار زیاد شار گرما افزایش می‌یابد، ولی پس از جوشش طولانی تاثیر زبری از بین می‌رود.

سطوح خاصی که برای تقویت جوشش هسته‌ای در بازار موجود است :

۱. سطوح با روکش بسیار متخلخل که با تف جوشی، زرد جوشکاری، شعله پاشی، رسوب

الکترولیتی و یا کف‌سازی تشکیل می‌شوند.

۲. حفره‌هایی که به طور مکانیکی ایجاد می‌شوند و دارای تورفتگی دوتایی می‌باشند و به طور

دائم بخار را گیر می‌اندازند.

۵-۳-۵ جوشش با جابه جایی اجباری

در جوشش استخری جریان سیال عمدتاً ناشی از حرکت حباب‌هایی است که از سطح گرم منشأ می‌گیرند و حرکت این حباب‌ها نیز بر اثر نیروی شناوری است. در جوشش با جابه جایی اجباری جریان بر اثر حرکت جهت دار سیال و همچنین ناشی از شناوری است. هندسه جریان شامل جریان خارجی روی استوانه‌ها و صفحات گرم یا شامل جریان داخلی (جریان در مجرا) بر شرایط جوشش تاثیر زیادی دارد. جوشش با جابه جایی اجباری داخلی را معمولاً جریان دوفازی می‌گویند و مشخصه آن تغییرات سریع از مایع به بخار در جهت جریان است.

۳-۵-۳ جوشش با جابه جایی اجباری خارجی

شار گرما را در جریان خارجی روی صفحات گرم قبل از جوشش می‌توان از رابطه‌های جابه جایی اجباری تخمین زد. با افزایش دمای صفحه گرم، جوشش هسته‌ای روی می‌دهد و باعث افزایش شار گرمایی می‌شود. برگلز و روسنو روشی را در جوشش استخری و در جابه جایی اجباری خالص ارائه کردند. این روش وقتی به کار می‌رود که تولید بخار زیاد نیست و مایع فروسرد است.

جابه جایی اجباری و فروسرمایش هر دو شار گرمایی بحرانی q_{max}'' را در جوشش هسته‌ای افزایش می‌دهند. برای مایعی که به سرعت V روی استوانه‌ای به قطر D به طور عرضی جریان دارد، لینهارد و ایکورن عبارت‌های زیر را برای جریان با سرعت کم و زیاد به دست آورده‌اند:

سرعت کم :

$$\frac{q_{max}''}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{1}{\pi} \left[1 + \left(\frac{4}{We_D} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (10-3)$$

سرعت زیاد :

$$\frac{q_{max}''}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{(\rho_l / \rho_v)^{\frac{2}{3}}}{169\pi} + \left[\frac{(\rho_l / \rho_v)^{\frac{1}{3}}}{19/2\pi We_D^{\frac{1}{3}}} \right] \quad (11-3)$$

عدد وبر، We_D نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی است، به صورت زیر محاسبه

می‌گردد:

$$We_D = \frac{\rho_v V^2 D}{\sigma} \quad (12-3)$$

در ناحیه با سرعت زیاد، پارامتر شار گرما، $\frac{q_{max}''}{\rho_v h_{fg} V}$ کمتر از $\left[\left(\frac{169}{\pi} \right) (\rho_l / \rho_v)^{\frac{2}{3}} + 1 \right]$ است و

در ناحیه با سرعت کم برعکس است. در اغلب موارد از معادله‌های فوق با خطای کمتر از ۲۰٪ برای

q_{max}'' می‌توان استفاده کرد [۲۳].

۳-۶ جریان دوفازی

جوشش با جابه جایی اجباری داخلی مربوط می‌شود به تشکیل حباب در سطح داخلی لوله گرمایی که مایعی از آن عبور می‌کند. رشد و جدایی حباب شدیداً تحت تاثیر سرعت جریان قرار دارد و اثر هیدرولیکی در این حالت با اثر متناظر در جوشش استخری کاملاً متفاوت است. وجود نقش‌های متفاوت در جریان دوفازی باعث پیچیدگی فرآیند و مانع استنتاج نظریه‌های کلی می‌شود.

جریان در لوله گرم عمودی را در نظر بگیرید. انتقال گرما به مایع فرسردی که وارد لوله می‌شود ابتدا با جابه جایی اجباری است و آن را می‌توان از رابطه‌های جریان داخلی پیش‌بینی کرد. ولی با شروع جوشش حباب‌هایی که در سطح ظاهر می‌شوند رشد کرده و به داخل جریان مایع منتقل می‌شوند. در این جریان حبابی، ضریب انتقال گرمای جابه جایی شدیداً افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی بخار حباب‌ها به هم می‌پیوندند و جریان بی شکلی را به وجود می‌آورند. پس از جریان بی شکل، جریان حلقوی می‌آید که در آن لایه‌ای از مایع تشکیل می‌شود. این لایه در امتداد سطح داخلی لوله و بخار با سرعت بیشتر در مرکز لوله حرکت می‌کند. افزایش ضریب انتقال گرما در جریان حبابی و در قسمت بیشتر جریان حلقوی ادامه می‌یابد. ولی سرانجام نقاط خشک روی سطح داخلی ظاهر می‌شوند و ضریب جابه جایی شروع به کاهش می‌کند. مرحله گذار با پیدایش نقاط خشک شروع و تا جایی ادامه می‌یابد که سطح کاملاً خشک شود و تمام مایع باقیمانده به صورت قطره‌هایی در مغزه بخار ظاهر شود. کاهش ضریب جابه جایی در این مرحله ادامه می‌یابد. این ضریب در جریان مه تغییر اندکی می‌کند (جریان مه تا وقتی که تمام قطره‌های مایع به بخار تبدیل شوند وجود دارد). سپس بخار توسط جابه جایی اجباری در سطح فوق گرم می‌شود [۲۳].

۳-۶-۱ معادلات حاکم و مدل‌سازی

مدلسازی CFD شامل حل‌های عددی بر پایه‌ی معادلات بقاء می‌باشد. در اکثر تحقیقات، حل

شبیه‌سازی عددی از معادلات پیوستگی و ناویراستوکس با رینولدز متوسط توسط کدهای CFD استخراج می‌گردد. در موارد توربولانسی، طبیعت تصادفی بودن محاسبات انسداد جریان، بر طبق یک تشریح کامل از حرکت تمام ذرات سیال بنا شده است. خصوصیات زمان متوسط برای جریان (سرعت‌های متوسط، فشارهای متوسط، تنش‌های متوسط) با معادلات ناویر استوکس وابسته به زمان که به معادلات ناویر استوکس زمان متوسط ملغب هستند، معرفی می‌شوند. در زیر معادلات ناویر استوکس نشان داده شده است [۲۳]:

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (13-3)$$

معادلات ممنتوم

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] \quad (14-3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] \quad (15-3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] \quad (16-3)$$

که به صورت کلی خواهیم داشت :

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \tau_{ij} = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (17-3)$$

۳-۷ مدل‌های آشفتگی

هنگامی که یک نیروی خارجی مثل یک گرادیان فشار به سیالی که با سرعت متوسط v در حرکت است وارد می‌شود، باعث افزایش سرعت و در نتیجه تغییر اندازه حرکت ذرات سیال می‌شود، در اثر این افزایش مومنتوم، ذرات سیال، که به صورت موازی در جهت جریان متوسط حرکت می‌کنند، مسیر حرکت خود را در جهت عمود بر این جهت تغییر می‌دهند و از لایه‌ای به لایه‌ای دیگر می‌روند. البته فاصله‌ای که این ذرات در این جهت طی می‌کنند محدود می‌باشد و براساس نظریه پرانتل حداکثر آن برابر با حاصل ضرب یک ضریب بنام ثابت فون-کارمن ($k=0.41$) در عمق جریان (Y) می‌باشد.

این حرکت تصادفی ذرات سیال باعث تغییر شکل‌های برشی و چرخشی و تشکیل چرخابه‌ها در جریان می‌شود. با افزایش عدد رینولدز جریان همزمان با افزایش سرعت‌های نوسانی ذرات سیال، اندازه این چرخابه‌های جریان نیز افزایش می‌یابد. در واقع تنش‌های رینولدز تابعی از سرعت و اندازه همین چرخابه‌های جریان می‌باشد که باعث خارج نمودن انرژی از جریان متوسط و ورود آن در حرکات آشفتگی (ادی‌ها) و سپس استهلاك آن می‌شود. این انرژی که انرژی جنبشی آشفتگی^۱ (k) نامیده می‌شود، برابر با میانگین مجذور سرعت‌های نوسانی ذرات می‌باشد و با تشکیل ادی‌ها از جریان متوسط خارج می‌شود و با ورود به چرخابه‌ها با نرخ استهلاك انرژی جنبشی^۲ (ε) مستهلک می‌شود. مجموعه معادلاتی که به منظور تعیین این کمیت‌ها در جریان‌های آشفته مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدل‌های آشفتگی نامیده می‌شوند [۲۳].

یک مدل اغتشاش معادله‌ای نیمه تجربی است که عبارت‌های نوسانی را با ثابت‌هایی که از طریق آزمون به دست می‌آیند به پارامترهای متوسط مرتبط می‌کند.

^۱. Turbulent Kinetic Energy

^۲. Turbulent Dissipation Rate

۳-۷-۱ تقسیم بندی مدل های آشفتگی

شکل (۳-۱۵) یک تقسیم بندی کلی از مهم ترین مدل های آشفتگی را ارائه می دهد. در گروه اول این تقسیم بندی که به مدل های متوسط گیری شده زمانی معروف می باشند، اساس کار بر مبنای متوسط گیری معادلات ناویر- استوکس^۱ در زمان و محاسبه تنش های رینولدز می باشد. این مدل ها دو دسته مل های لزجت ادی^۲ و مدل های انتقال تنش رینولدز تقسیم بندی می شوند [۲۳].

در دسته اول تانسور تنش رینولدز^۳ براساس گرادیان سرعت متوسط جریان بیان می شود. فرض اساسی در این مدل ها، تئوری لزجت ادی بوزینسک^۴ می باشد.

در سال ۱۸۷۷ بوزینسک فرض کرد که تنش های آشفتگی (رینولدز) متناسب با گرادیان سرعت متوسط جریان است.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (۳-۱۸)$$

ν_t : لزجت گردابه ای یا لزجت آشفتگی است که برخلاف لزجت مولکولی از نوع خاصیت سیال نبوده بلکه تابع خصوصیات جریان و آشفتگی آن است و مقدار آن از سیالی به سیال دیگر و از نقطه ای به نقطه دیگر متفاوت می باشد. δ_{ij} : دلتای کرونکر است. K: انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم، که باعث حرکت مولکول های سیال شده و ضمن برخورد با سایر مولکول های تغییراتی در مومنوم آنها ایجاد می کند.

از آنجا که لزجت مولکولی متناسب با سرعت میانگین و متوسط سیر آزاد حرکت مولکول ها می باشد، لزجت گردابه ای نیز متناسب با سرعت حرکت نوسانی و طول نمونه از حرکت آشفته در نظر گرفته می شود که پراتل این طول نمونه را به عنوان طول اختلاط معرفی نموده است.

^۱. Navier - Stoks

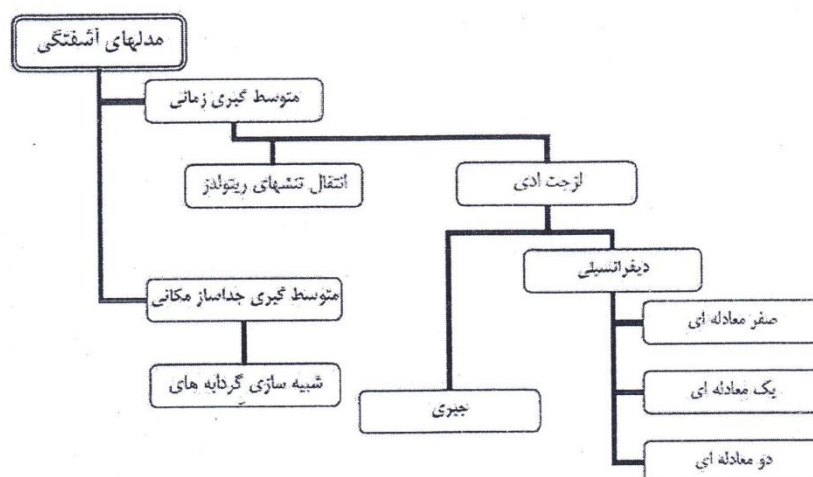
^۲. Eddy Viscosity Models

^۳. Reynolds Stress Models

^۴. Boussinseq

ν_t بسته به مدل آشفتگی مورد نظر با روابط معین و با استفاده از کمیت‌های مرتبط با آشفتگی مشخص می‌شود. در مدل‌های انتقال تنش‌های رینولدز به جای استفاده از مفهوم لزجت ادی، معادلات کامل انتقال تنش‌های رینولدز بسط داده و تحلیل می‌گردند.

یک روش کلی دیگر در مدل کردن آشفتگی، استفاده از یک جداساز مکانی و جدا کردن نوسانات آشفتگی بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس از یکدیگر می‌باشد. این روش تحت عنوان شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ (LES) معروف می‌باشد. در این روش نوسانات آشفتگی در دو بخش نوسانات بزرگ مقیاس و نوسانات کوچک مقیاس تقسیم بندی می‌شوند، که بخش بزرگ مقیاس به طور مستقیم شبیه سازی می‌شود و در مورد بخش کوچک مقیاس اثرات آن در نظر گرفته می‌شود [۲۳].



شکل (۳-۱۳): تقسیم بندی کلی مدل‌های آشفتگی [۲۳]

۲-۷-۳ مقدمه‌ای بر انواع مدل‌های آشفتگی

تمام جریان‌هایی که در مهندسی، عملی به حساب می‌آیند، اعم از موارد ساده نظیر جریان‌های لایه مرزی لوله و صفحه تخت و یا موارد خیلی پیچیده سه بعدی از یک عدد رینولدز معین $\left(\frac{UL}{\nu}\right)$ که U و L به ترتیب، مشخصه‌های سرعت و مقیاس طول جریان متوسط و ν لزجت سینماتیکی است،

^۱ Large Eddy Simulation

استفاده می‌کنند که هر چه این عدد بیشتر باشد ناپایدار می‌باشد.

در اعداد رینولدز پایین، جریان آرام است. در اعداد رینولدز بالا، مشاهد می‌شود که جریان آشفته می‌شود، به طوریکه یک حالت تصادفی از حرکت درجائیکه سرعت و فشار به طور پیوسته درون بخش‌های مهمی از جریان نسبت به زمان تغییر می‌کند گسترش می‌یابد.

در موارد ساده معادلات پیوستگی و ناویر – استوکس را می‌توان به صورت تحلیلی حل کرد. جریان‌های پیچیده‌تر را می‌توان از طریق عددی با روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) نظیر روش حجم محدود و بدون استفاده از تقریب‌های اضافی حل کرد.

اغلب جریان‌های با اهمیت مهندسی، آشفته هستند، لذا منطقه جریان آشفته فقط از نظر تئوری مهم نیست. مهندس احتیاج به ابزار قابلی دارد که بیانگر اثرات آشفتگی باشد [۲۴].

۳-۷-۳ معادلات جریان

قوانین حاکم بر جریان سیال لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنتوم در جهات محورهای سه گانه مختصات بیان می‌شوند، که این معادلات به معادلات ناویر – استوکس^۲ معروف هستند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و مومنتوم به بیان ریاضی می‌باشند. معادلات حاکم می‌توانند بر دو دیدگاه استوار باشند:

- دیدگاه لاگرانژی

- دیدگاه اولری

در دیدگاه لاگرانژی حرکت یک ذره کوچک در میدان محاسباتی مورد توجه قرار می‌گیرد و کاربرد خاص خود را دارد، اما در اینجا معادلات حاکم براساس دیدگاه اولری توضیح داده شده‌اند.

چنانچه عضو کوچک سیال به عنوان حجم کنترل^۳ ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود،

^۱. Computational Fluid Dynamics

^۲. Navier – Stokes equation

^۳. Control volume

در این صورت نیروهای وارده بر آن و اصل بقای جرم در این سلول به صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می‌شوند [۲۴].

در جریان تراکم ناپذیر معادلات فوق به صورت زیر بیان می‌شوند:

- بقای جرم (معادله پیوستگی)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱۹-۳)$$

- بقای مومنتوم (معادلات ناویر – استوکس)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_{xi} + \nu \Delta^2 u_i \quad (۲۰-۳)$$

در روابط فوق u_i : مؤلفه سرعت لحظه‌ای در جهت x_i ، V : لزجت مولکولی، ρ : چگالی سیال، g_{xi} : مؤلفه شتاب ثقل در جهت i ، p : ترم فشار در هر نقطه از سیال می‌باشند. برای در نظر گرفتن اثر اغتشاش در میدان جریان، معادله‌های حرکت سیال را باید تغییر داد. (نوسانات برای در نظر گرفتن اثر اغتشاش در میدان جریان در هر لحظه و هر نقطه مدل گردند). مرسوم است که این تغییرات را با نشان دادن مقادیر لحظه‌ای به صورت مجموع مقدار متوسط و مقدار نوساناتی تابع زمان اعمال می‌کنیم.

چنانچه بتوان مقادیر لحظه‌ای سرعت و فشار و یا هر کمیت دیگری مانند Φ را به مقادیر متوسط و زمانی تفکیک کرده، در این صورت روابط زیر برقرار هستند.

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i + \acute{u}_i \\ p_i &= \bar{p}_i + \acute{p}_i \\ \Phi_i &= \bar{\Phi}_i + \acute{\Phi}_i \end{aligned} \quad (۲۱-۳)$$

با جایگزین کردن روابط فوق در معادلات پیوستگی و مومنتوم، در معادله پیوستگی تغییری ایجاد نمی‌شود اما در معادلات مومنتوم، پارامتر اضافه می‌گردد.

• معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (22-3)$$

• معادله مومنوم

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_{xi} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (23-3)$$

پارامتر $\overline{u'_i u'_j}$ همان تنش رینولدز است که بر سیال عمل کرده و اثر گردابه‌های آشفتگی را در سیال اعمال می‌کند. در اکثر جریان‌های آشفته، مقدار تنش رینولدز بسیار از تنش ناشی از لزجت مولکولی $(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j})$ می‌باشد. برای تعیین پارامتر تنش رینولدز از مدل‌های آشفتگی متفاوتی استفاده می‌گردد. $\overline{u'_i u'_j}$ پارامتری که به علت متوسط‌گیری از معادلات لحظه‌ای ناویر - استوکس ظاهر شده است و به تانسور تنش رینولدز معروف است.

با به وجود آمدن این ترم در معادلات ناویر - استوکس، تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات می‌شود، بنابراین برای تکمیل دستگاه باید روابط اضافی معرفی شود. به این علت محققین، معادلات نیمه تجربی جریان‌های آشفته را برای امکان حل این معادلات ارائه کرده‌اند و ترم تنش رینولدز را براساس یک سری از خواص خود جریان آشفته بیان کرده‌اند. این امر باعث به وجود آمدن مدل‌های مختلف جبری برای مشخص کردن این ترم شده است. این رابطه‌ها را مدل‌های اغتشاش می‌نامند که در حالت کلی مقادیر نوسانی را با استفاده از ثابت‌های تجربی به مقادیر متوسط مرتبط می‌کنند، مدل‌های اغتشاش بسته به میزان پیچیدگی آن‌ها از رابطه‌های جبری ساده تا دستگاه‌های معادله دیفرانسیل پاره‌ای تغییر می‌کنند. معروف‌ترین مدل‌های جبری، تنش رینولدز $k - \varepsilon$ ، $k - \omega$ و RSM هستند که براساس انرژی جنبشی جریان آشفته و نرخ هدر رفت آن، ویسکوزیته آشفتگی (لزجت گردابه‌ای) را مدل می‌کنند.

۴-۷-۳ مدل‌های آشفتگی

در این بخش مدل‌های آشفتگی متوسط گیری زمانی مورد استفاده در این تحقیق، توضیح داده شده است. قابل ذکر است؛ دو مدل آشفتگی صفر معادله‌ای و یک معادله‌ای به علت استفاده از داده‌های تجربی و ضعف‌هایی که در استفاده از آنها در مراحل مختلف حل، به چشم می‌خورد، از لحاظ کار عددی کاربرد چندانی ندارند [۲۴]. مدل‌های آشفتگی شامل موارد زیر می‌باشد :

- مدل $k - \varepsilon$ استاندارد^۱

- مدل $k - \varepsilon$ RNG

- مدل $k - \omega$ استاندارد

- مدل انتقال تنش برشی^۲ $k - \omega$

- مدل تنش رینولدز (RSM)

در این تحقیق جریان با عدد رینولدز بالا مورد بررسی قرار گرفته شده است، و از آنجایی که هندسه مورد بحث ساده می‌باشد و تعداد شبکه‌ها بسیار زیاد می‌باشد، از مدل $k - \varepsilon$ استاندارد استفاده شده است.

۱-۴-۷-۳ مدل $k - \varepsilon$ استاندارد

مدل $k - \varepsilon$ معروف‌ترین مدل دو معادله‌ای می‌باشد، چراکه فهم آن آسان و استفاده از آن در برنامه‌نویسی ساده می‌باشد. این مدل برای عدد رینولدز بالا جواب‌های بسیار نزدیکی به واقعیت می‌دهد. در مدل $k - \varepsilon$ میدان آشفته برحسب دو متغیر بیان می‌شود:

۱. انرژی جنبشی جریان آشفته (k)

۲. نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته^۳ (ε)

^۱. Standard $k - \varepsilon$ Model

^۲. Sherar Stress Transport (SST) k -w Model

^۳. Viscous dissipation rate of Turbulent kinetic energy

معادلات انتقال در مدل $k - \varepsilon$ استاندارد

مدل $k - \varepsilon$ استاندارد معادلات انتقال (۲۴-۳) و (۲۵-۳) را برای ε و k استفاده می‌کند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_K \quad (24-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_K - C_{\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (25-3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (26-3)$$

G_K : ترم تولید انرژی جنبشی آشفته به دلیل گرادیان سرعت متوسط است. روابط صریح برای G_K

به صورت (۸-۲) می‌باشد:

$$G_K = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (27-3)$$

معادلات شامل پنج ثابت قابل تنظیم $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_K, \sigma_\varepsilon$ هستند که مقادیر آنها مطابق ذیل

می‌باشد:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_K = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

مدل $k - \varepsilon$ استاندارد برای طیف وسیعی از مسائل نسبتاً مشکل به خوبی کار می‌کند، اما برای

مسائلی که شامل غیرایزوتروپ های نسبتاً شدید جریان هستند، این مدل در نهایت به جواب‌هایی

خواهد رسید که تا حدی فوق دیفیوژ^۱ است، یعنی مقادیری که توسط این مدل پیش بینی می‌شود، تا

حدی بزرگ خواهند بود. [۲۴].

^۱. Over diffusive

۳-۸ حل عددی تنش حرارتی

در این حل از روش المان محدود استفاده می‌شود. در اکثر مدلسازی CFD که برای محاسبه‌ی تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد از این روش استفاده می‌شود زیرا محیط مورد نظر جامد می‌باشد. معادلات تنش حرارتی الاستیکی^۱ شامل موازنه معادلات^۲، معادلات ترکیب کننده^۳ و معادلات کرنش سازگار^۴ می‌باشد [۲۵].

موازنه معادلات

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (28-3)$$

معادلات ترکیب کننده

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{1-\mu}{1+\mu} \varepsilon_x + \frac{\mu}{1+\mu} (\varepsilon_y + \varepsilon_z) - \alpha \Delta T \right], \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xy} \\ \sigma_y &= \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{1-\mu}{1+\mu} \varepsilon_y + \frac{\mu}{1+\mu} (\varepsilon_x + \varepsilon_z) - \alpha \Delta T \right], \tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{yz} \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{1-\mu}{1+\mu} \varepsilon_z + \frac{\mu}{1+\mu} (\varepsilon_y + \varepsilon_x) - \alpha \Delta T \right], \tau_{zx} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (29-3)$$

معادلات کرنش سازگار

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}, \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}, \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x}, \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (30-3)$$

۱ Stress Equations of Thermo-Elasticity Mechanics

۲ Equilibrium Equations

۳ Constitutive Equations

۴ Strain Compatibility Equations

جایی که کرنش نرمال ε_x ، ε_y ، ε_z و کرنش برشی γ_{xy} ، γ_{yz} ، γ_{zx} به صورت زیر مشخص شده‌اند:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (3-31)$$

قبل از حل معادلات تنش توزیع دما در تیوب و رفتار سیال از نتایج مدل‌سازی در فلوئنت با کویل کردن تحلیل‌های سیال و مناطق تیوب به دست می‌آید. تمام تنش حرارتی و تحلیل‌های تغییر شکل تحت جریان نامی و انتقال حرارت هدایتی می‌باشد. ترکیب شرایط مرزی ساختار با بارهای فشار، جابه جایی u ، v ، w و تنش فون مایز σ با حل معادلات بالا در محیط نرم‌افزار انسیس^۱ به دست می‌آید. تنش فون مایز σ از معادله زیر به دست می‌آید [۲۵]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]} \quad (3-32)$$

۳-۹ دیدگاه مدل‌سازی جریان‌های چندفازی

بخش زیادی از جریان‌های موجود در طبیعت و صنعت، جریان‌های مخلوطی از فازها می‌باشند. فازهای فیزیکی ماده شامل گاز، مایع و جامد هستند، اما در سیستم جریان چندفازی بسیار گسترده می‌باشند. در جریان چندفازی یک فاز می‌تواند در یک کلاس قابل شناسایی از ماده قرار گیرد که یک جنبش و واکنش مخصوص با جریان و همچنین زمینه پتانسیل برای غوطه‌وری را دارا می‌باشد. رژیم‌های جریان چندفازی در چهار گروه قرار می‌گیرند:

- جریان‌های گاز-مایع یا مایع-مایع
- جریان‌های گاز-جامد
- جریان‌های مایع-جامد
- جریان‌های چندفازی

^۱ ANSYS Workbench

برای مدلسازی جریان‌های ذکر شده مدل‌های متفاوتی ارائه شده است. در دینامیک سیالات محاسباتی این مدل‌ها به بررسی دقیق جریان‌های ذکر شده می‌پردازند. در تحلیل مسایل علم مکانیک دو دیدگاه "اویلری" و "لاگرانژی" وجود دارد. در تحلیل مسایل مربوط به علم مکانیک سیالات از دیدگاه اویلری بهره گرفته می‌شود و در تحلیل مسایل مربوط به علم مکانیک جامدات از دیدگاه لاگرانژی استفاده می‌شود.

دیدگاه اویلری: این دیدگاه میدان جریان را مورد بررسی قرار می‌دهد. دستگاه مختصات در این دیدگاه ثابت است.

دیدگاه لاگرانژی: در این دیدگاه حرکت ذرات ملاک واقع می‌شود. در واقع دستگاه مختصات بر روی ذراتی از سیال که بررسی می‌شود، قرار دارد.

برای تحلیل جریان سه روش داریم:

۱. حجم کنترل یا تحلیل انتگرالی

۲. سیستم‌های بی نهایت کوچک یا تحلیل دیفرانسیلی

۳. مطالعه آزمایشگاهی یا تحلیل ابعادی

برای هر کدام از این روش‌ها جریان باید از قانون بقا در جرم، قانون بقا در اندازه حرکت خطی، قانون بقا در اندازه حرکت زاویه‌ای، قانون بقا در انرژی و همچنین حالت ترمودینامیکی و شرایط مرزی مناسب پیروی کند [۲۵].

در این تحقیق روش اول یعنی حجم کنترل مورد بررسی قرار گرفته شده است. حجم کنترل در علم مکانیک سیالات همان نمودار جسم آزاد (F.B.D)^۱ برای اجسام صلب در علم مکانیک جامدات است. در واقع حجم کنترل ناحیه بسته‌ای است که در آن مرزها بخاطر ورود و خروج جرم و اندازه حرکت و انرژی بسیار اهمیت دارند. در این روش حجم کنترل می‌تواند ساکن یا متحرک با سرعت ثابت و یا متحرک با سرعت متغیر باشد که در این حالت معادلات پیچیده می‌شوند.

^۱ Free Body Diagram

در نرم افزار انسیس فلونت سه مدل اویلری-اویلری مختلف موجود می باشد:

۱. مدل حجم سیال (VOF^1)

۲. مدل مخلوط^۲

۳. مدل اولرین

با توجه به مدل های ذکر شده و هندسه مورد استفاده در این تحقیق، به مدلسازی با مدل مخلوط پرداخته شده است. مدل مخلوط مدلی است که در جاهای زیادی کاربرد دارد. در جایی که فازها سرعت های متفاوت دارند مورد استفاده قرار می گیرد. حتی در جایی که فازها بسیار قوی با هم آمیخته شده اند و سرعت یکسان دارند. این مدل برای سیالاتی با ویسکوزیته غیرنیوتنی نیز مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین در قسمت ورودی گازهای داغ از کوره به دیگ بازیافت حرارتی نیز مدل $k - \varepsilon$ استاندارد مورد استفاده قرار گرفته شده است.

۳-۹-۱ مدل مخلوط

مدل مخلوطی برای دو یا چند فاز (سیال یا ذره ای) طراحی شده است. مثل مدل اولرین فازها به صورت پیوسته و درهم نفوذ کرده رفتار می کنند. مدل مخلوط برای معادله مخلوط ممنتوم حل می شود و سرعت نسبی را برای تعریف فازهای پراکنده تعیین می کند. کاربرد این مدل شامل بررسی جریان های ذرات مملو با واکنش کم، جریان های حبابی، ته نشینی و جداسازی گردابه ای می باشد. همچنین مدل مخلوط می تواند بدون استفاده از سرعت نسبی، فازهای پراکنده در جریان چندفازی همگن را بررسی کند [۲۵].

^۱ Volume Of Fluid

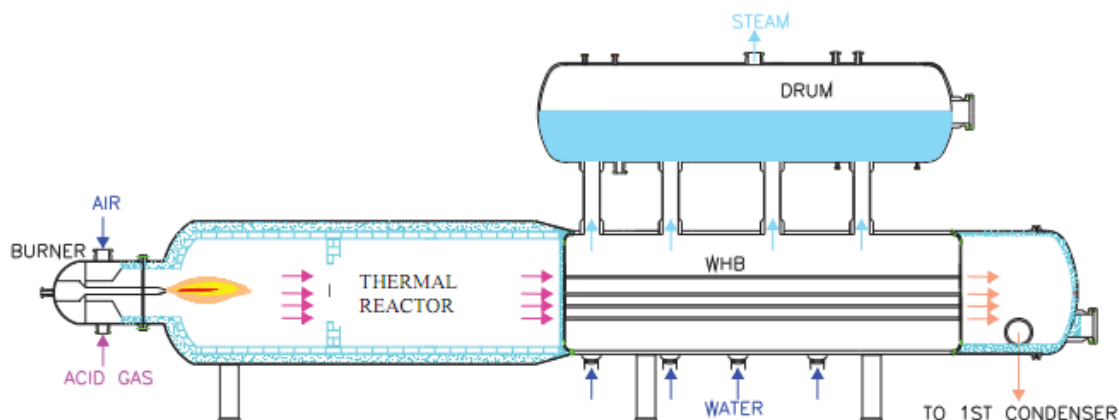
^۲ Mixture

فصل چهارم

روش تحقیق و نتایج

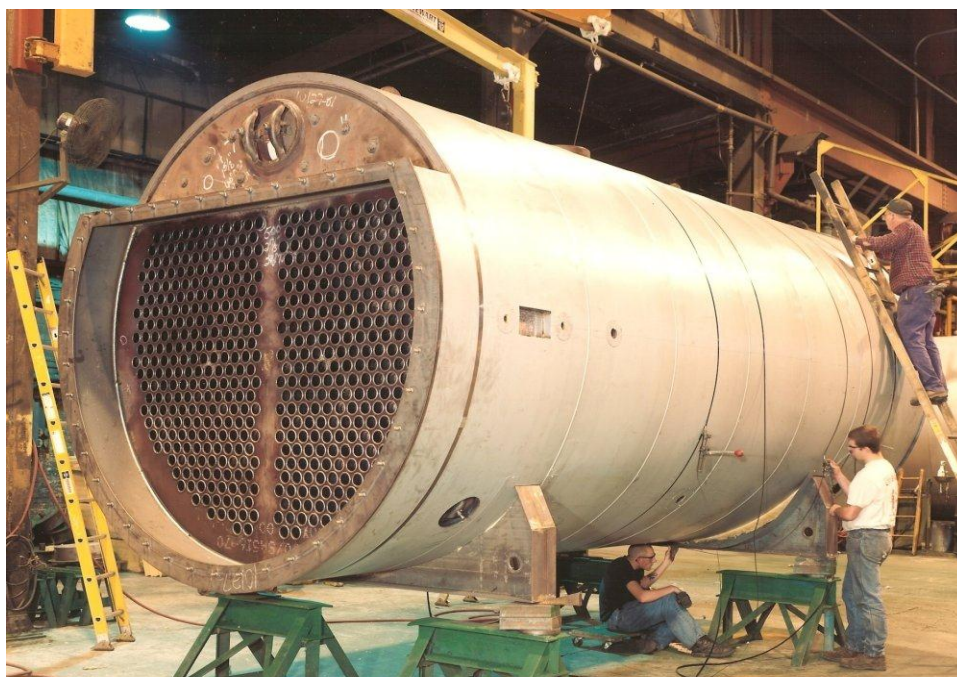
۱-۴ مقدمه

این تحقیق مبتنی بر مدلسازی CFD شامل حل عددی معادلات بقاء در حالت سه بعدی می‌باشد. در ابتدا به مدلسازی تیوب دیگ حرارتی موجود به صورت دو بعدی در دو حالت تحلیل حرارتی و دوفازی مجزا و توأم پرداخته شده است و سپس تحلیل‌ها در حالت سه بعدی بررسی گردیده است. دیگ حرارتی نوعی مبدل حرارتی پوسته و لوله می‌باشد که یکی از اجزای اصلی فرآیند گوگردزدایی کلوس در پالایشگاه است. در شکل (۱-۴) شماتیک کامل پروسه بازیافت گوگرد نشان داده شده است. قسمت کوپل شدن کوره و دیگ بازیافت حرارتی بخش مورد بحث است. در حقیقت پدیده تخریب تیوب در این قسمت دیده می‌شود زیرا دمای گازهای حاصل احتراق دمای بسیار زیادی دارند که این دما عامل به وجود آمدن تنش‌های حرارتی شدیدی در این قسمت می‌گردد.



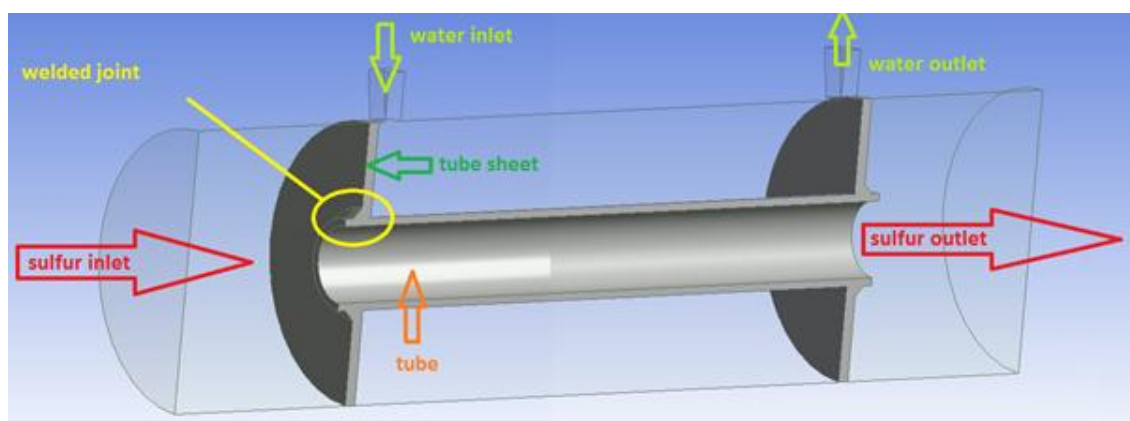
شکل (۱-۴) : شماتیکی از کوره واکنشی SUR و مبدل بازیافت حرارت (WHB) [۶]

در شکل (۲-۴) یک دیگ حرارتی واحد صنعتی بازیافت گوگرد نشان داده شده است.



شکل (۲-۴) : دیگ حرارتی

در اینجا با توجه به موارد ذکر شده در فصل دوم، جهت تعیین دقیق علت تخریب تیوب‌ها و تیوب شیت، محل اتصال تیوب‌شیت و یکی از تیوب‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است. در شکل (۳-۴) جهت تعیین دقیق شرح پدیده مورد بحث، شماتیک سه بعدی تیوب و تیوب‌شیت که هندسه آن در نرم‌افزار انسیس طراحی شده، نشان داده شده است. شرح کامل فرآیند در شکل نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) : شماتیک سه بعدی مدلسازی مورد بحث

۴-۲ تشریح مسئله

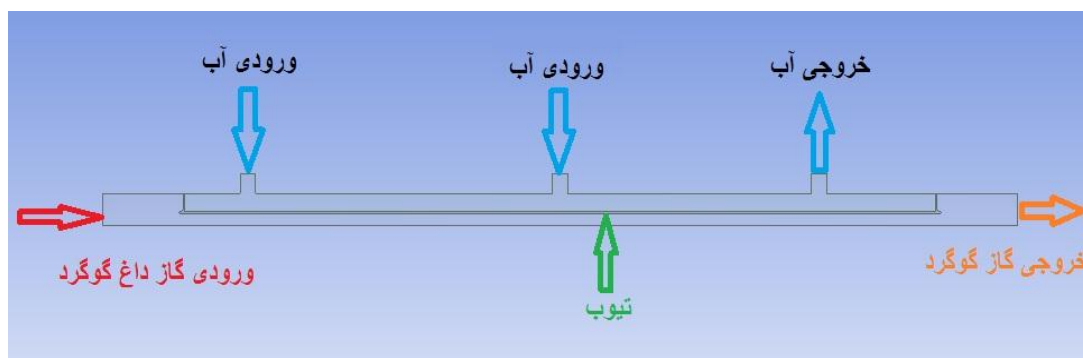
در ابتدا به صورت ساده و دو بعدی پدیده‌های مرتبط مدلسازی گردیده و پروفیل حرارتی و پروفیل تنش‌ها و کرنش‌های موجود مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی پدیده جوشش آب درون پوسته و در قسمت بیرونی تیوب به صورت سه بعدی مستلزم صرف زمان زیاد محاسباتی با وجود کامپیوتر بسیار قوی است. به همین دلیل پدیده جوشش به صورت دوبعدی مدلسازی شده و سپس ضریب انتقال حرارت به دست آمده در مدل سه بعدی اعمال شده است تا پروفیل حرارتی و تنش حرارتی دقیقتری به دست آید. در ابتدا مدل سه بعدی بدون در نظر گرفتن پدیده جوشش حل شده است تا درجه حرارت روی تیوب به دست آید. سپس با نوشتن کد UDF در نرم‌افزار انسیس فلوئنت پروفیل به دست آمده در دیواره تیوب اعمال شده و پدیده جوشش مدلسازی شده است. در ابتدا به صورت دو بعدی کل هندسه تیوب و تیوب‌شیت مدلسازی شده و پروفیل حرارتی و همچنین تنش حرارتی به دست آمده محاسبه شده است.

۴-۲-۱ استقلال از شبکه

در کل مدلسازی‌های انجام شده در این پروژه برای اینکه بهترین شبکه‌بندی را بدست آوریم از روش استقلال از شبکه استفاده شده است. این روش با توجه به همگرایی جواب شبیه‌سازی انجام شده صورت می‌گیرد، به این صورت که با تعداد سلول‌های مختلف از کم به زیاد برای هندسه مورد نظر شبیه‌سازی را انجام می‌دهند، زمانی که با زیاده‌تر شدن سلول‌ها (در حقیقت کوچکتر شدن سلول‌ها برای یک هندسه مشخص) جواب شبیه‌سازی تغییری نکند یا تغییر آن قابل چشم‌پوشی باشد دیگر مدلسازی از شبکه استقلال یافته است و نیازی به ریزتر کردن سلول‌ها نیست. با ریز کردن بیش از حد سلول‌ها برای مدلسازی باید زمان بسیار بیشتری صرف شود که بهینه نمی‌باشد.

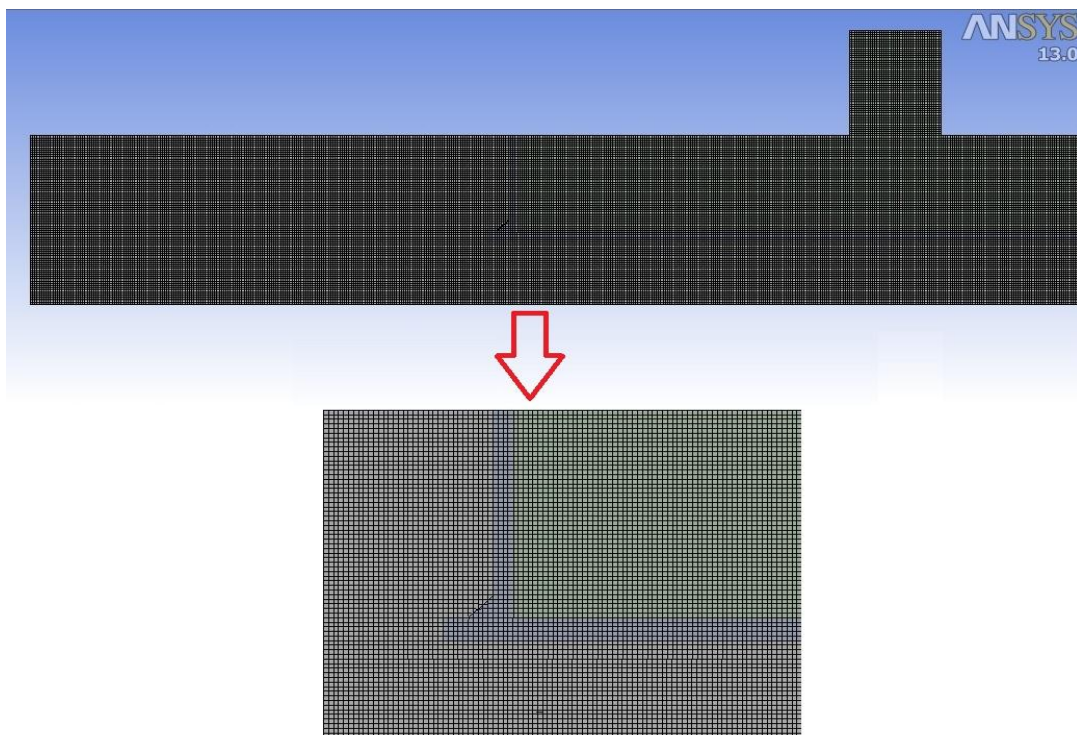
۲-۲-۴ مدل سازی دو بعدی

در این قسمت به صورت دو بعدی انتقال حرارت و پروفیل حرارتی تیوب دیگ حرارتی و همچنین تنش ها و کرنش های پدید آمده مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل دو بعدی از روش متقارنی محوری^۱ استفاده شده است، محور تقارن در محور تیوب قرار داده شده است. این مدل سازی جهت آماده سازی برای مدل سازی سه بعدی صورت گرفته است. شکل (۴-۴) هندسه دو بعدی و شرح شماتیک فرآیند را نشان می دهد. در این مدل سازی دوبعدی شرایط ساده در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۵) شبکه بندی مدل سازی را نشان می دهد. برای بالا بردن دقت جواب های مدل سازی از شبکه بندی ریزتری استفاده شده است. در این پایان نامه برای استقلال یافتن شبیه سازی از شبکه با توجه به کوچکترین شعاع حباب های بوجود آمده مش بندی انجام گرفته است. با توجه به روش ذکر شده با ریزتر شدن شبکه و افزایش تعداد سلول ها بعد از دو میلیون سلول تغییری بسیار ناچیزی در جواب های حاصل شده دیده می شود که قابل چشم پوشی می باشد و با دو میلیون سلول شبیه سازی انجام شده است.



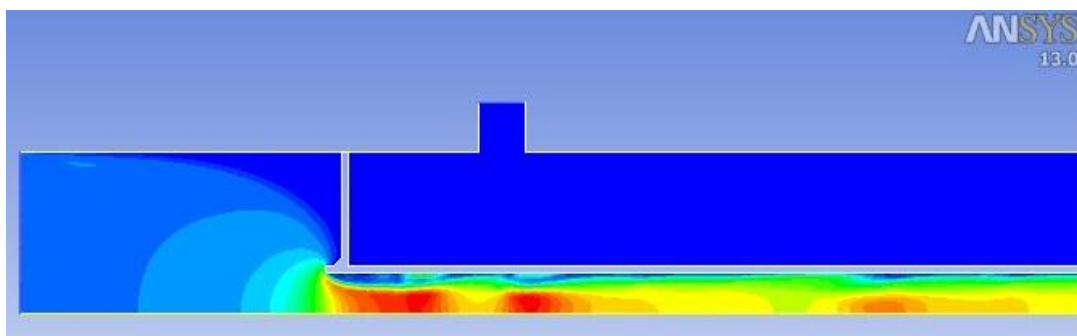
شکل (۴-۴): شرح شماتیک فرآیند در مدل سازی دوبعدی

^۱ Axis of Symmetry



شکل (۴-۵): شبکه‌بندی مدلسازی دوبعدی با شبکه‌های ریز و دقیق

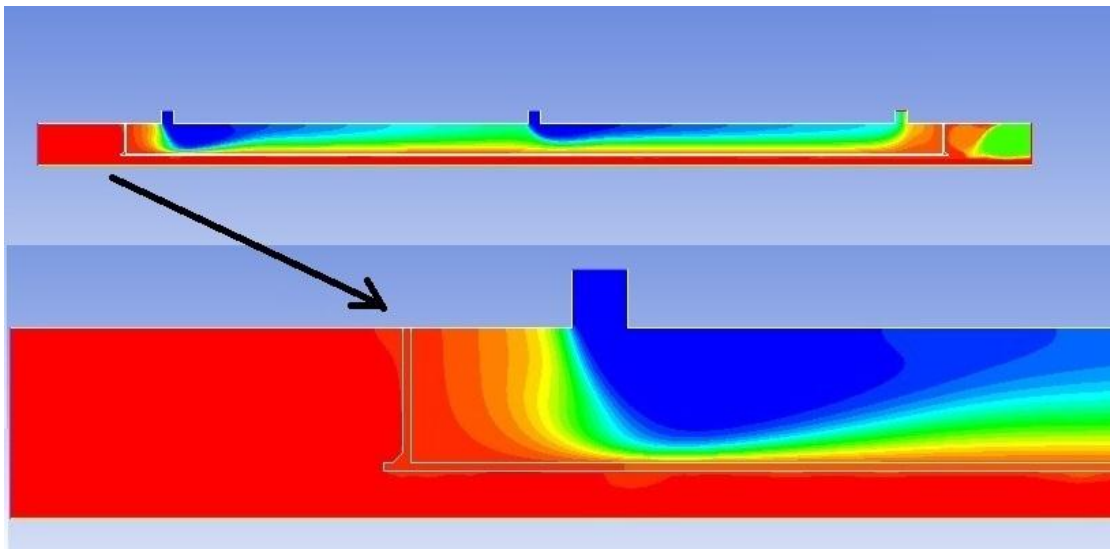
گازهای خروجی از کوره همان گازهای ورودی به تیوب‌های دیگ بازیافت حرارتی می‌باشند و دمای این گازها 1000°C می‌باشد. آب ورودی درون پوسته و روی دیواره بیرونی تیوب دمایی برابر با 25°C دارد. جنس تیوب طبق جنس عملیاتی فولاد در نظر گرفته شده است. در شکل (۴-۶) پروفیل سرعت گازهای گوگرد و آب ورودی نشان داده شده است.



شکل (۴-۶): پروفیل سرعت گازهای داغ ورودی به تیوب

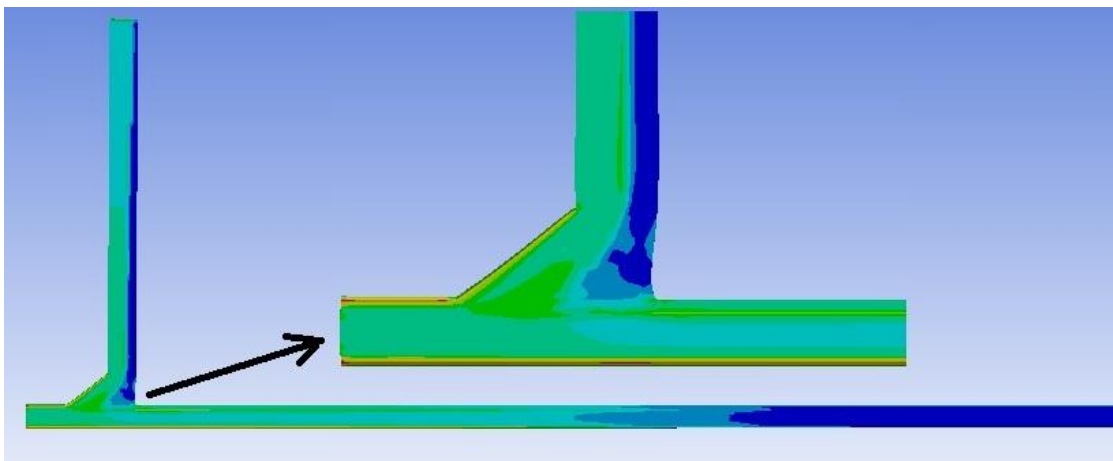
همانطور که در شکل نشان داده شده است در ابتدای تیوب لایه مرزی بسیار کمی دیده می‌شود.

انتقال حرارت در قسمت لایه مرزی با ضخامت این لایه رابطه عکس دارد. در شکل (۷-۴) پروفیل حرارتی در قسمت ابتدای تیوب نشان داده شده است که شاهد این پدیده می‌باشد. ملاحظه می‌شود که بخاطر ضخامت کم لایه مرزی حرارتی در ابتدای تیوب، فلاکسی انتقال حرارت افزایش می‌یابد، در نتیجه شاهد اختلاف دمایی شدید در ابتدای لوله بوده که منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی می‌گردد.



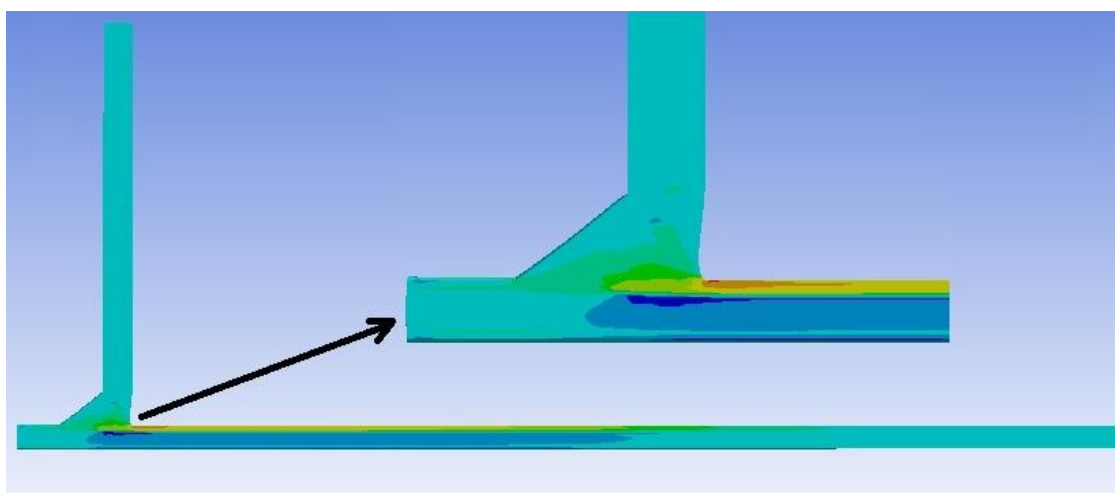
شکل (۷-۴) : پروفیل حرارتی مدل‌سازی شامل گازهای داغ، تیوب و آب ورودی

بیشترین حرارت انتقال یافته در قسمت ابتدای تیوب دیده می‌شود. برای بررسی میزان تنش‌ها و کرنش‌ها حل عددی معادلات مربوطه بر اساس روش اجزاء محدود انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به شرح زیر می‌باشد. در شکل (۸-۴) تنش معادل فون مایز نشان داده شده است.



شکل (۸-۴): پروفیل تنش معادل فون مایز

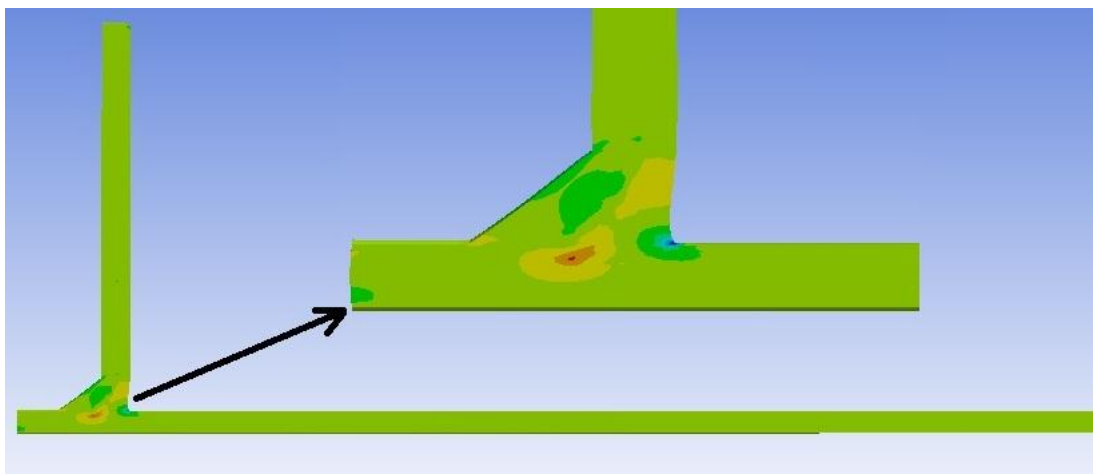
همانطور که در شکل (۸-۴) نشان داده شده است بیشترین تنش در قسمت اتصال جوش می باشد. در حقیقت اختلاف دمایی بالا و تمرکز حرارت در ابتدای تیوب تنش حرارتی بسیار شدیدی را به این قسمت از تیوب تحمیل می کند. از آنجایی که نقاط تیز تمایل بسیار زیادی برای جمع آوری حرارت را دارند و جوشکاری انجام شده بدون این نقاط مقدور نمی باشد، تنش شدیدی به قسمت جوشکاری شده اعمال می گردد. در شکل (۹-۴) تنش نرمال در راستای محور X نشان داده شده است که بیشترین مقدار آن در قسمت اتصال داخلی تیوب و تیوب شیت می باشد.



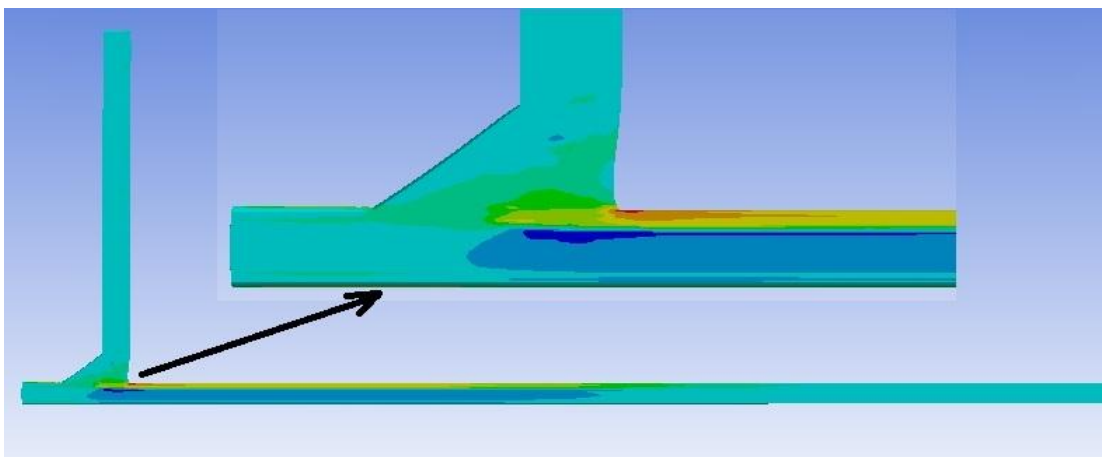
شکل (۹-۴): پروفیل تنش نرمال در راستای محور X در قسمت اتصال تیوب و تیوب شیت

شکل (۱۰-۴) پروفیل تنش برشی اتصال بین تیوب و تیوب شیت نشان داده شده است که در

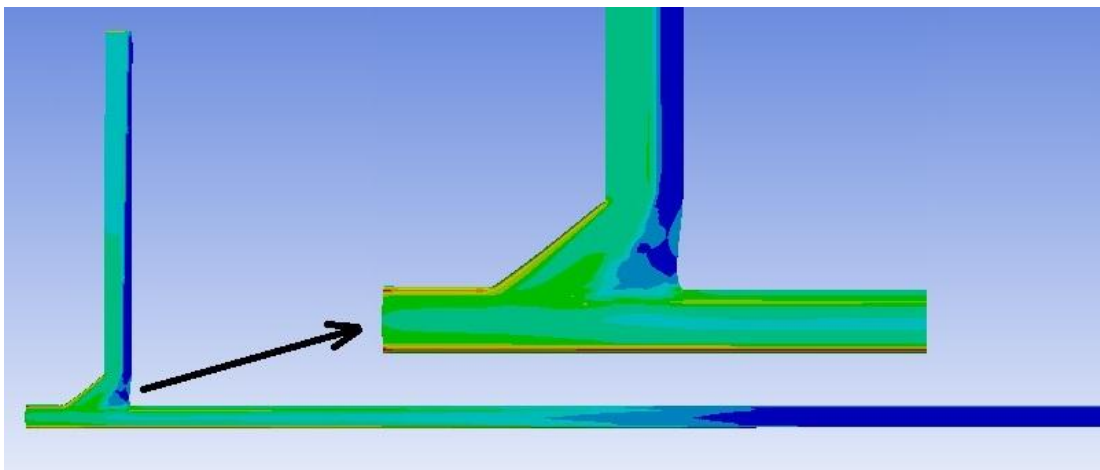
قسمت دیگری که جوش به تیوب متصل است بیشترین تمرکز تنش را دارد. این تنش نیز از دمای بالای حاصل از گازهای داغ ورودی به دیگ ناشی می‌گردد. تنش برشی حاصل شده در محل اتصال تیوب و تیوب شیت قرار دارد و دلیل اصلی آن یکی نبودن جنس تیوب و تیوب شیت می‌باشد. در حقیقت طی بررسی‌های انجام شده جنس آنها کاملاً با هم تطابق ندارد و در نتیجه ضریب انبساط آنها یکی نمی‌باشد و در برابر اختلاف دمایی یکسان واکنش متفاوت از خود نشان می‌دهند. شکل (۴-۱۱) بیشترین تنش محوری و شکل (۴-۱۲) بیشترین تنش برشی را نشان می‌دهند.



شکل (۴-۱۰) : پروفیل تنش برشی بین تیوب و تیوب‌شیت در صفحه XY

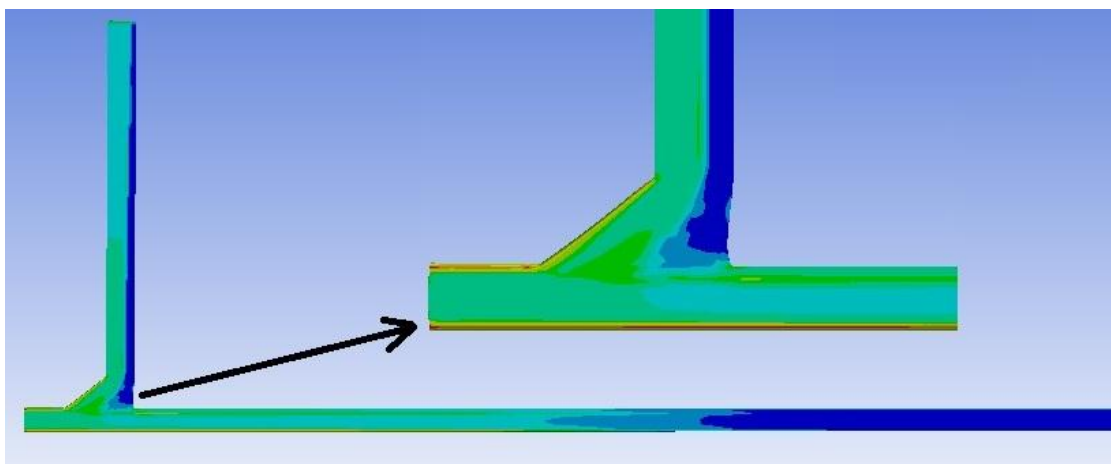


شکل (۴-۱۱) : پروفیل بیشترین تنش محوری بین تیوب و تیوب‌شیت



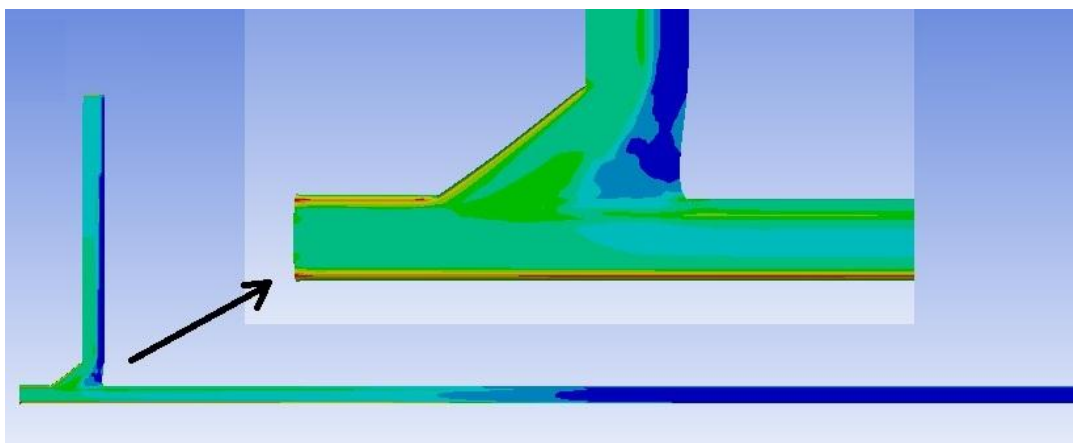
شکل (۴-۱۲): پروفیل بیشترین تنش برشی بین تیوب و تیوبشیت

در این قسمت به بررسی کرنش‌های به دست آمده از نتایج مدلسازی پرداخته شده است. در شکل (۴-۱۳) کرنش معادل کل نشان داده شده است که با مقایسه با نتایج حاصل برای تنش‌ها، مشاهده می‌شود که مناطق تحت تاثیر یکی می‌باشند. کرنش‌ها از تنش‌های حرارتی که در ابتدای تیوب دیده شده‌اند حاصل می‌شوند که این نشان دهنده اهمیت بالای تنش‌های حرارتی در این قسمت می‌باشد.



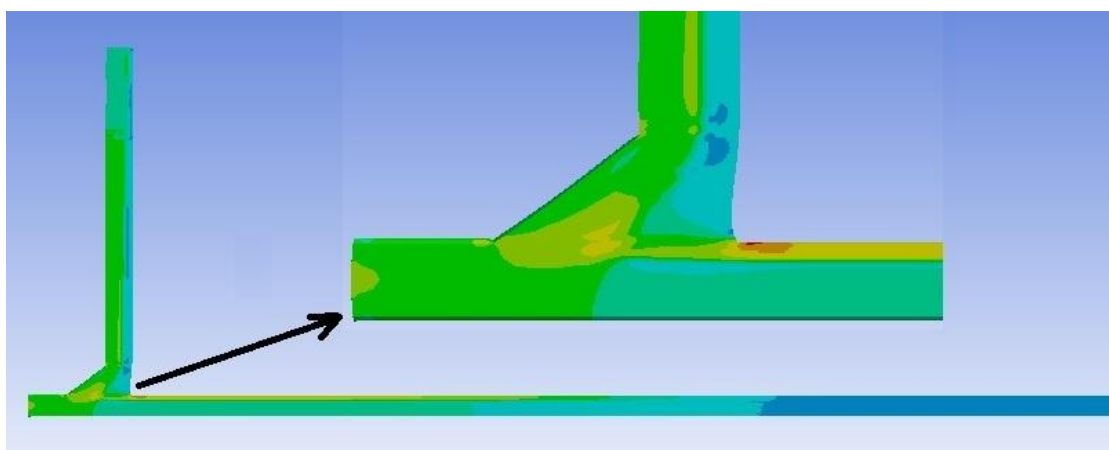
شکل (۴-۱۳): پروفیل کرنش معادل کل در قسمت اتصال بین تیوب و تیوبشیت

کرنش فون مایز از نتایج بسیار مهمی می‌باشد که در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است، که تمرکز کرنش مشابه تنش فون مایز می‌باشد. این کرنش الاستیک معادل نیز نامیده می‌شود. این کرنش نشان دهنده دقیق نقاطی است که از مرز الاستیک عبور می‌کنند و تغییر شکل می‌دهند یا به عبارتی تخریب می‌شوند. در شکل نشان داده شده این نقاط محل اتصال جوش‌ها می‌باشد.

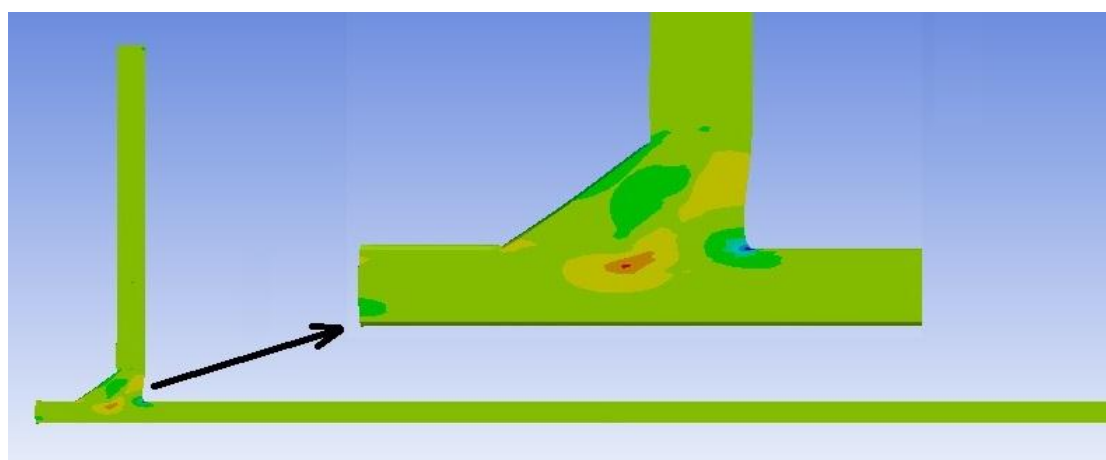


شکل (۴-۱۴) : پروفیل کرنش معادل الاستیک (فون مایزرز) در قسمت جوش بین تیوب و تیوبشیت

شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) به ترتیب کرنش نرمال الاستیک در راستای محور X و کرنش برشی الاستیک در صفحه نشان داده شده است.

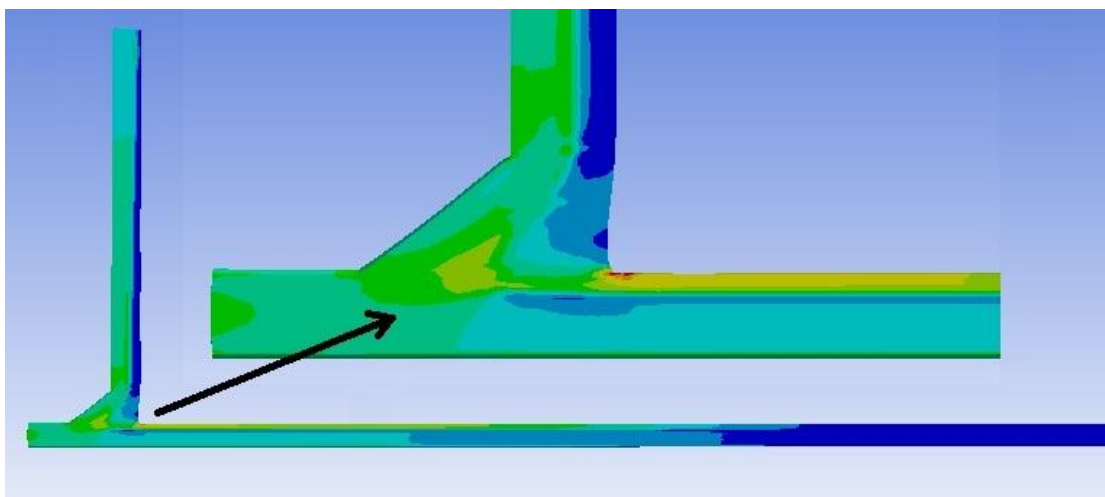


شکل (۴-۱۵) : پروفیل کرنش نرمال الاستیک بین تیوب و تیوبشیت در راستای محور X

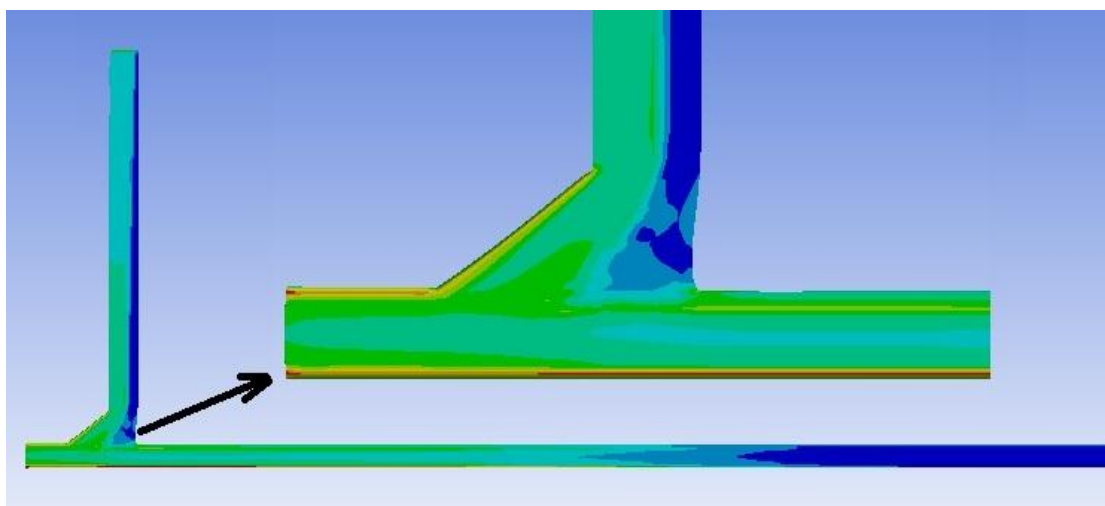


شکل (۴-۱۶) : پروفیل کرنش برشی الاستیک بین تیوب و تیوبشیت در صفحه XY

با توجه به نتایج به دست آمده نقاط بحرانی در قسمت اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت کاملاً معلوم می‌باشد. شکل‌های (۱۷-۴) و (۱۸-۴) به ترتیب بیشترین کرنش محوری الاستیک و بیشترین کرنش برشی الاستیک را نشان می‌دهند. در این اشکال کرنش‌ها در دو قسمت متفاوت تمرکز دارند که با هم یک کوپل گشتاوری ایجاد می‌کنند و باعث تخریب جوش اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت می‌شوند.



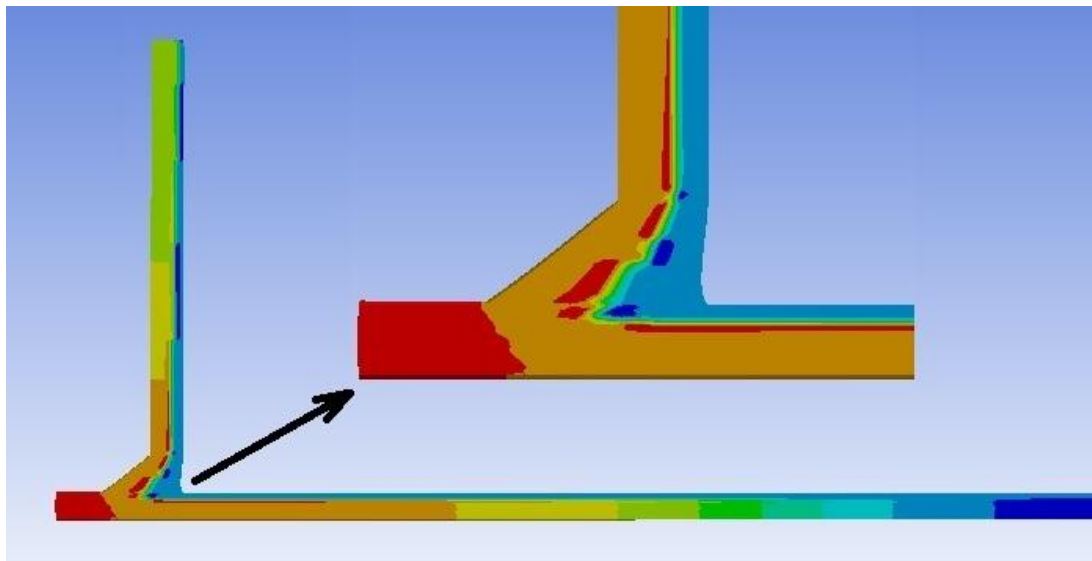
شکل (۱۷-۴) : پروفیل بیشترین کرنش محوری الاستیک بین تیوب و تیوب‌شیت



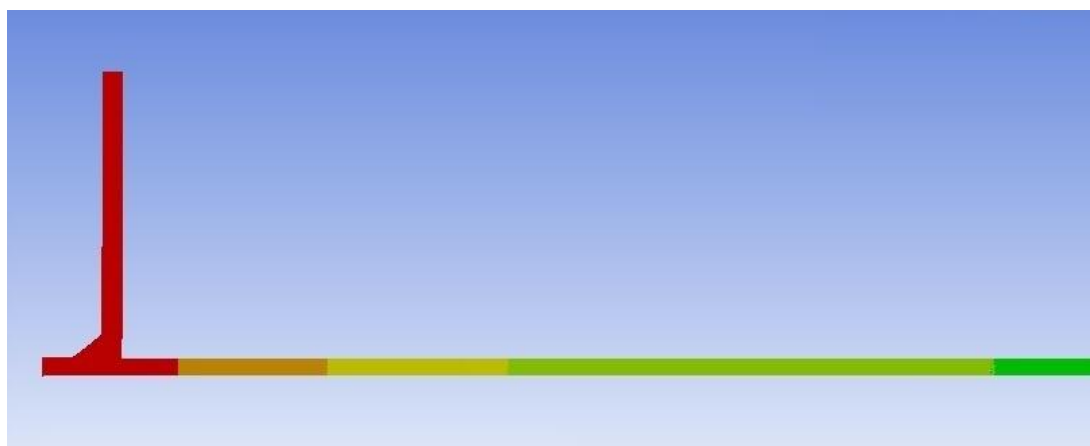
شکل (۱۸-۴) : بیشترین کرنش برشی الاستیک بین تیوب و تیوب‌شیت

کرنش حرارتی یکی از انواع کرنش می‌باشد که با توجه به عملکرد دیگ بازیافت حرارتی اهمیت خاصی دارد. در شکل (۱۹-۴) کرنش حرارتی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه

می‌شود در مرکز جوش اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت بیشترین کرنش پدید می‌آید و باعث تخریب این قسمت از دیگ بازیافت حرارتی می‌شود. در شکل (۴-۲۰) انبساط کلی تیوب بواسطه گرم شدن و اعمال تنش حرارتی نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که تغییر طول تیوب تقریباً $1/25$ سانتی‌متر می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به اینکه اندازه تیوب در نظر گرفته شده در این تحقیق ربع اندازه واقعی می‌باشد، تغییر شکل کلی واقعی حدوداً برابر ۵ سانتی‌متر می‌باشد.



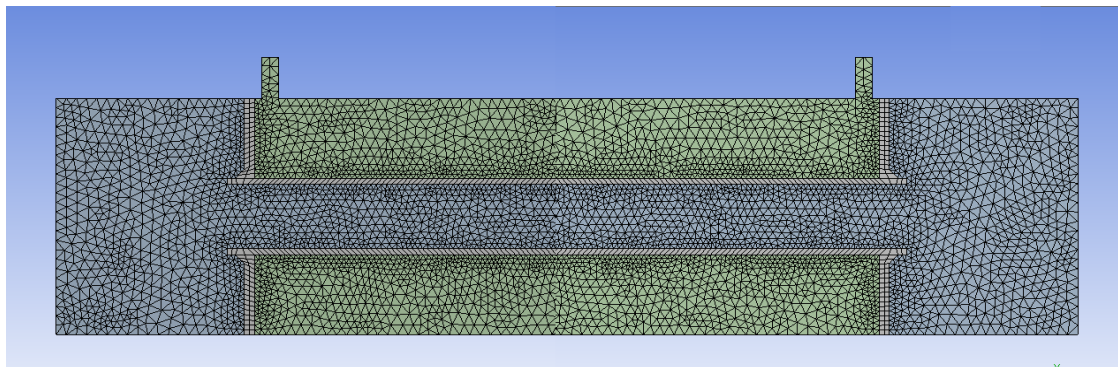
شکل (۴-۱۹): پروفیل کرنش حرارتی در قسمت جوش اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت



شکل (۴-۲۰): پروفیل تغییر شکل تیوب در کل طول دیگ بازیافت حرارت

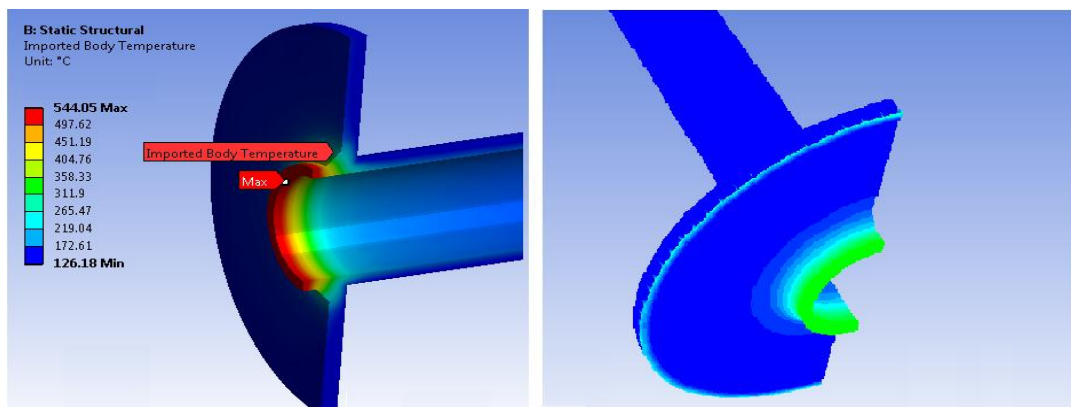
۳-۲-۴ مدلسازی سه بعدی پروفیل دمای دیواره

در این قسمت پدیده‌های هیدرودینامیک انتقال حرارت و پروفیل حرارتی تیوب دیگ حرارتی در حالت سه‌بعدی مدلسازی شده است. هندسه سه بعدی در نرم‌افزار انسیس طراحی شده است. شکل (۳-۴) هندسه مدل را نشان می‌دهد. تعداد شبکه‌های سه‌وجهی ایجاد شده در این مدل سه میلیون می‌باشد. با ریزتر شدن شبکه و بیشتر شدن تعداد سلول‌ها از سه میلیون سلول تغییری بسیار ناچیزی در جواب‌های حاصل شده دیده می‌شود که قابل چشم‌پوشی می‌باشد. طول تیوب یک متر و ضخامت آن ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۴-۲۱) شبکه مدل نشان داده شده است.



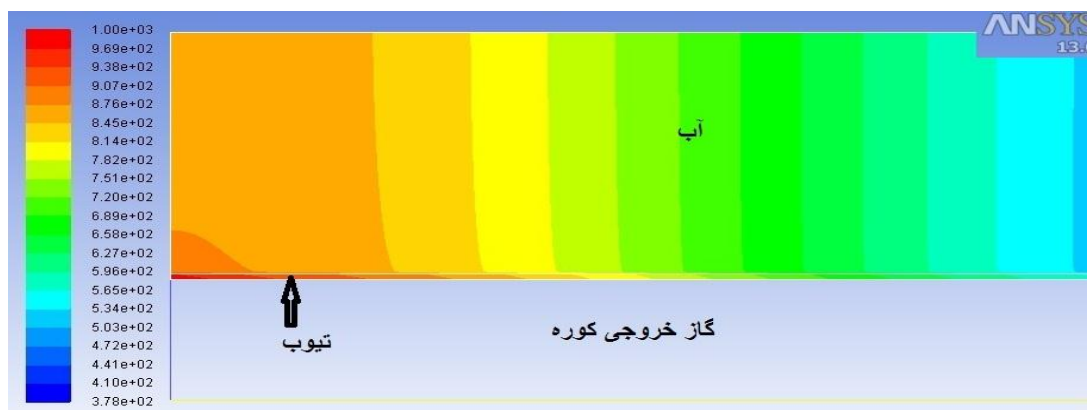
شکل (۴-۲۱): شبکه مدل جهت مدلسازی

گازهای حاصل از احتراق درون کوره با دمای 1000°C و سرعت یک متر بر ثانیه وارد تیوب می‌شود، دمای آب درون پوسته 25°C می‌باشد. مدلسازی انجام شده و پروفیل حرارتی تیوب و تیوب شیت در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۲): پروفیل حرارتی تیوب و تیوب شیت

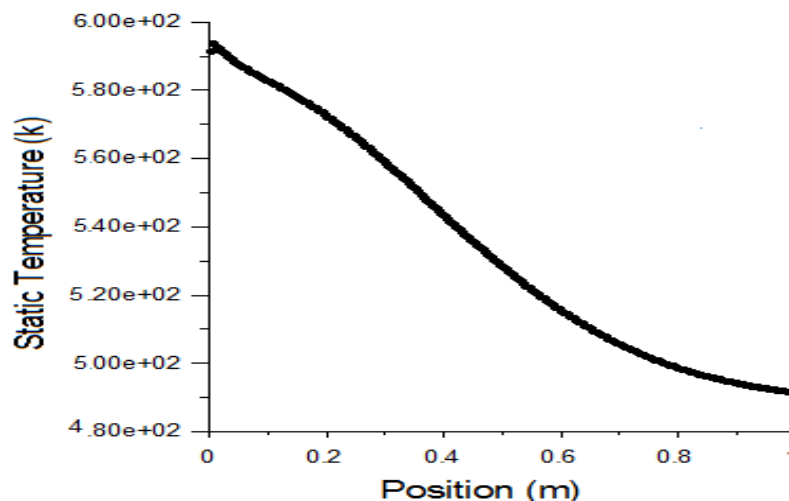
همانطور که انتظار می‌رفت، بر اساس نتایج مدل‌سازی دوبعدی بیشترین دما در ابتدای تیوب مشاهده می‌شود. با حرکت به سمت جلو دمای سطح بیرونی تیوب به علت انتقال حرارت توسط آب کاهش می‌یابد. در شکل (۴-۲۳) روند توزیع دما در آب، تیوب و گازهای خروجی کوره به صورت واضح نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۳): روند توزیع دما در آب، تیوب و گازهای خروجی کوره

۴-۲-۴ مدل‌سازی دوبعدی جوشش

از دمای سطح خارجی تیوب در قسمت قبل استفاده شده است. در شکل (۴-۲۴) نمودار این تغییرات دما نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۴) : نمودار پروفیل تغییرات دما روی تیوب در طول یک متر

پدیده جوشش و کیفیت تولید بخار یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر عملکرد دیگ بازیافت حرارتی می‌باشد. به منظور درک بهتر مدلسازی پدیده جوشش و تغییر فاز مایع به بخار در شرایط کار کردی دیگ بازیافت حرارتی با استفاده از تکنیک CFD مدلسازی صورت گرفته است. بدین منظور داده‌های حاصل شده از پروفیل تغییرات دما روی تیوب به صورت کد UDF و با استفاده از برازش به صورت تابع درجه سوم در مدلسازی جوشش دو بعدی مورد استفاده قرار گرفته شده است. در زیر کد نوشته شده نشان داده شده است، که دمای سطح بیرونی تیوب که با آب در تماس است را تعیین می‌کند:

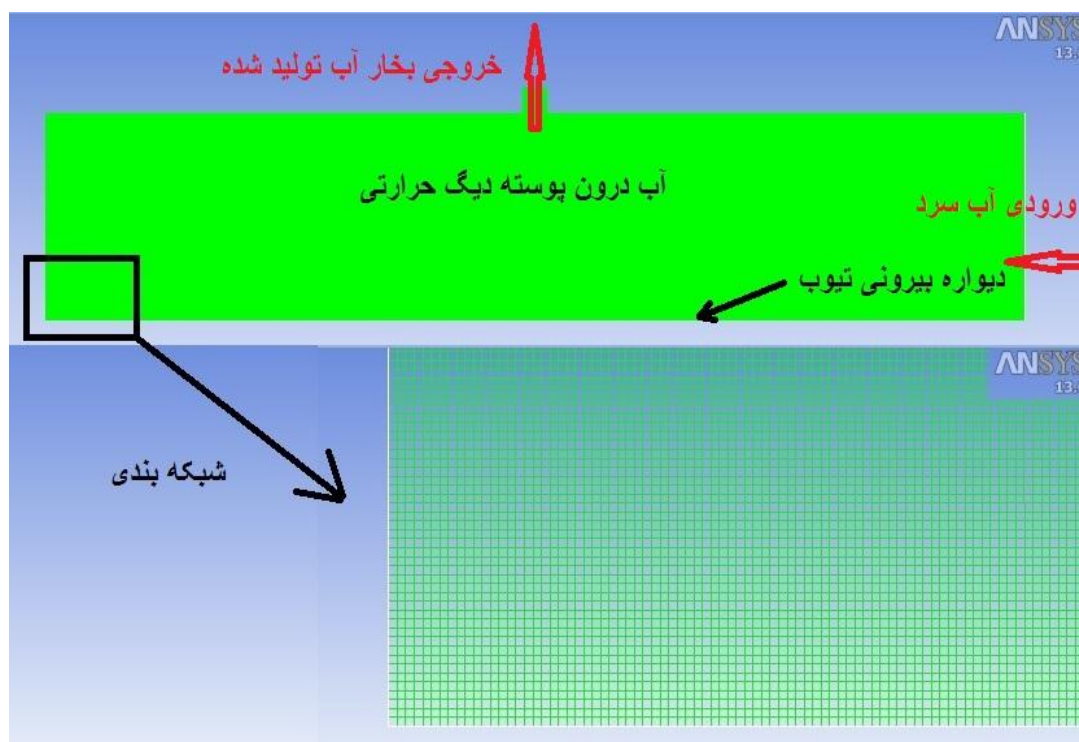
```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(temperature_profile, thread, position)
{
    real x[ND_ND];
    real y;
    face_t f;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        y = x[0];
```

```

F_PROFILE(f, thread, position) = (-۲۱.۸۱۵*y^۳)+(۵۲.۴۱۳*y^۲)-(۳۷.۲۲*y)+۴۷۰.;
}
end_f_loop(f, thread)
}

```

در نرم افزار انسیس شبکه های مربعی با اندازه های ریز ایجاد گردیده تا نتایج حاصل از مدل سازی عددی دقیق باشند، به طوریکه با انتخاب شبکه محاسباتی ریز خطاهای عددی همانند نفوذ کاذب^۱ کاهش می یابند. در شکل (۴-۲۵) شماتیک دو بعدی و ساده ای از پوسته بیرونی تیوب و شبکه این مدل سازی نشان داده شده است. همانطور که در بالا ذکر شد، با کدنویسی UDF دمای دیواره تعیین گشته و مدل سازی در حالت ناپایا^۲ انجام شده است. همانطور که در فصل ۳ ذکر شده است، برای مدل سازی جوشش از مدل ترکیبی استفاده شده است.

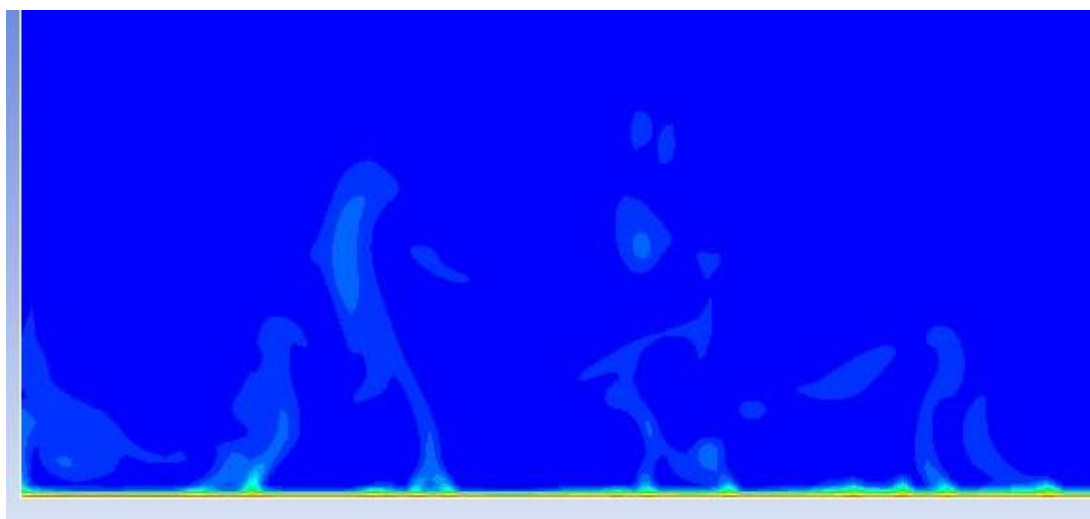


شکل (۴-۲۵) : شماتیک دو بعدی پوسته بیرونی تیوب و شبکه آن

^۱ False Diffusion

^۲ Unsteady State

شکل (۴-۲۶) گرم شدن آب را در فرآیند جوشش، در ثانیه ۰/۰۰۵ نشان داده است. همانطور که دیده می‌شود، سیال آب شروع به گرم شدن می‌کند و این شکل فرآیند حرکت سیال گرم به سمت بالا را در ثانیه ۰/۰۰۵ نشان داده است.

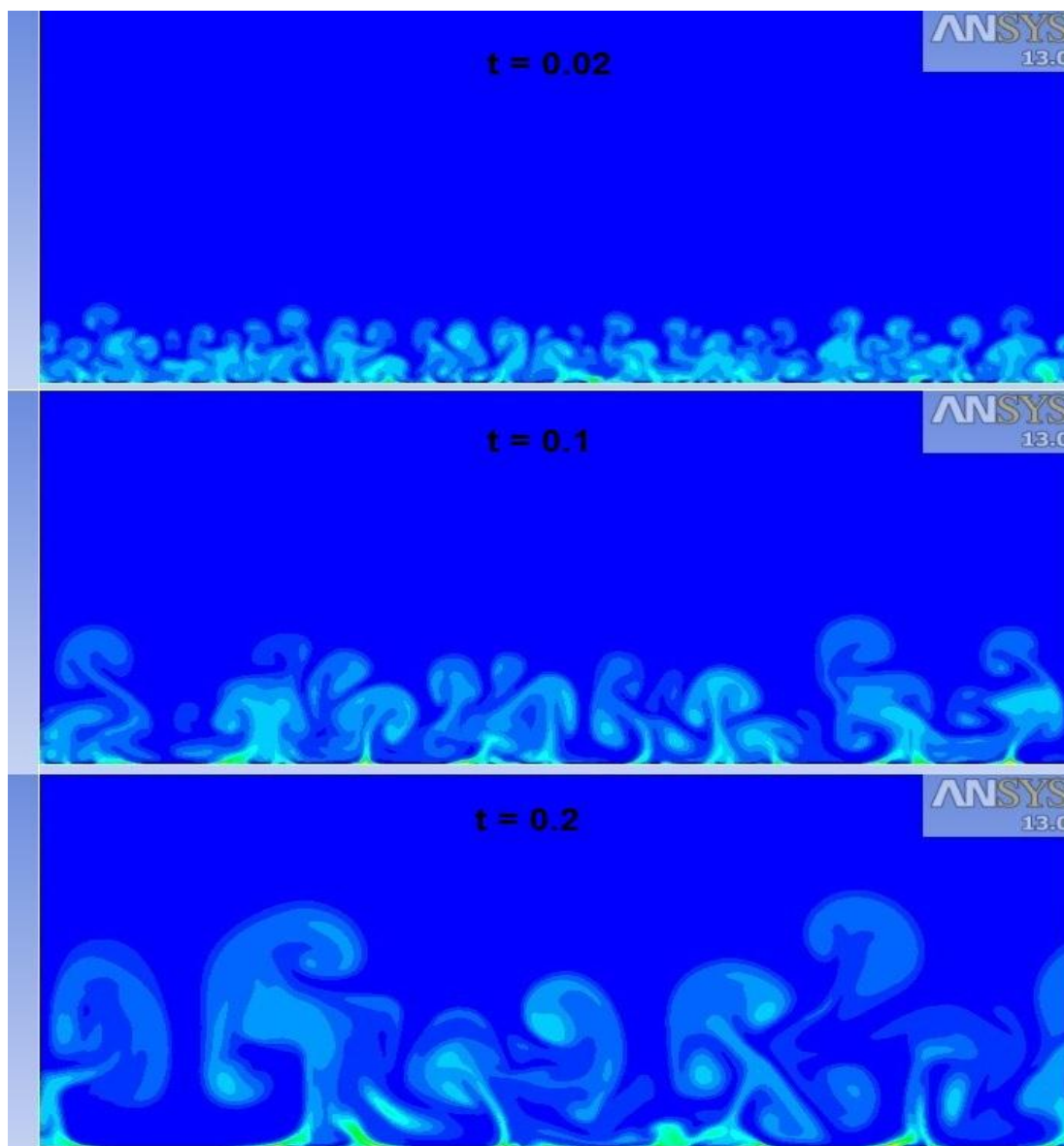


شکل (۴-۲۶) : پروفیل دمایی آب را در فرآیند جوشش در ثانیه ۰/۰۰۵

با گذشت زمان کم کم حباب‌های ریز بر روی دیواره بیرونی تیوب دیده شده است. شکل (۴-۲۷) نشان دهنده‌ی این پدیده می‌باشد. سیر تشکیل حباب با افزایش زمان محاسبات توسعه یافته است و به بیشترین حد خود رسیده است، تا جایی که تقریباً یک فیلم از بخار آب اشباع روی سطح تیوب را گرفت. ضریب انتقال حرارت در بیشترین مقدار جوشش تعیین شد. این سیر در شکل (۴-۲۸) و شکل (۴-۲۹) نشان داده شده است.

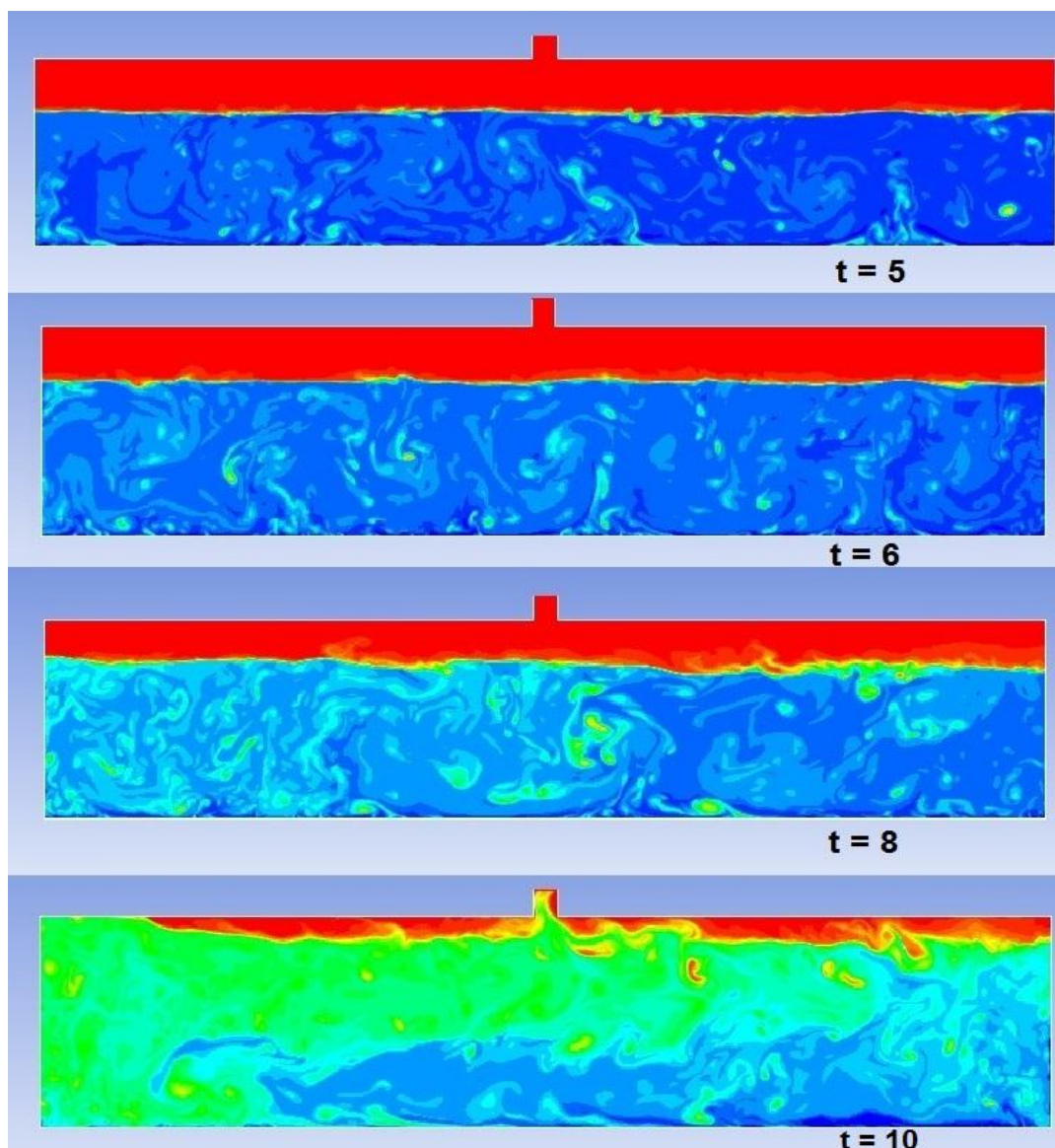


شکل (۴-۲۷) : حباب‌های بخار آب ایجاد شده روی دیواره بیرونی تیوب در ثانیه ۰/۰۱

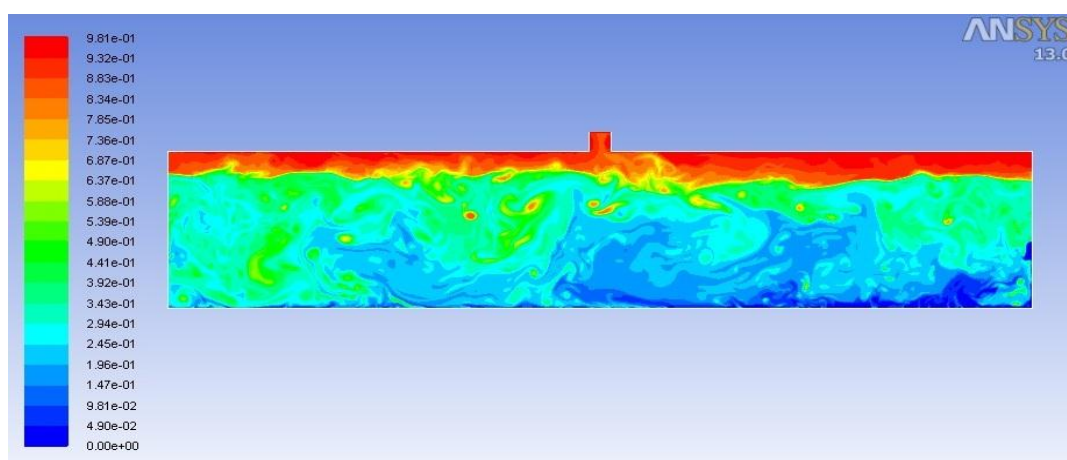


شکل (۲۸-۴) : سیر تشکیل و رشد حباب‌های بخار آب روی دیواره بیرونی تیوب

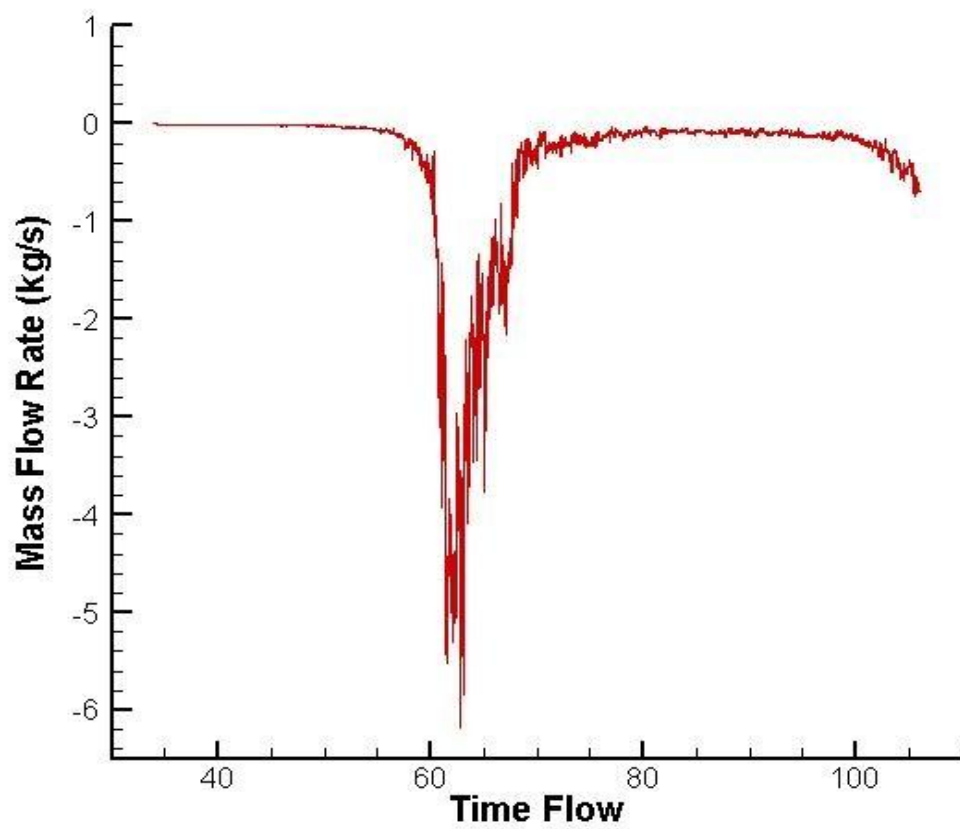
در پایان محاسبات نرخ جوشش به بالاترین مقدار خود رسیده است. همانطور که دیده می‌شود در قسمت ورودی گازهای داغ نرخ جوشش بیشتری پدید می‌آید در نتیجه گرمای بیشتری در این قسمت وجود دارد که عامل اصلی تخریب جوش اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت می‌باشد. در شکل (۳۰-۴) کسر حجمی بخار آب در حالت پایا نشان داده است، که نشان می‌دهد که آب در این حالت به صورت یکنواخت تبخیر می‌شود. شکل (۳۱-۴) و (۳۲-۴) نمودار نرخ خروج بخار آب که همان نرخ جوشش نیز می‌باشد و شکل (۳۳-۴) و (۳۴-۴) نمودار دمای متوسط بخار آب خروجی را نشان داده است.



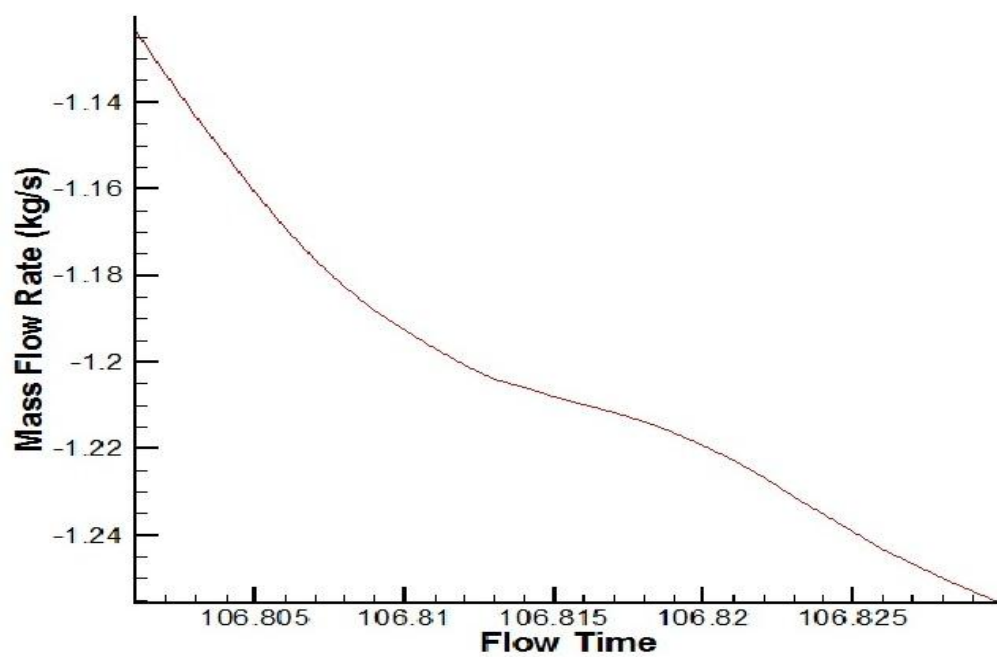
شکل (۴-۲۹): سیر تشکیل و رشد حباب‌های بخار آب روی دیواره بیرونی تیوب



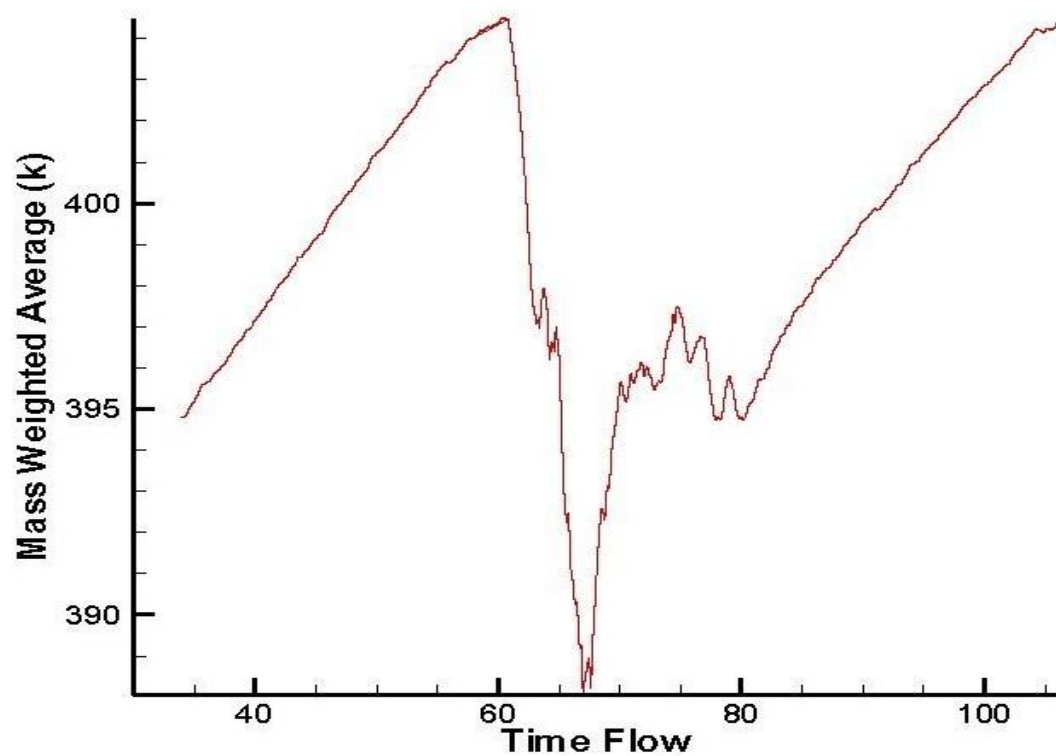
شکل (۴-۳۰): کسر حجمی بخار آب در حالت پایا



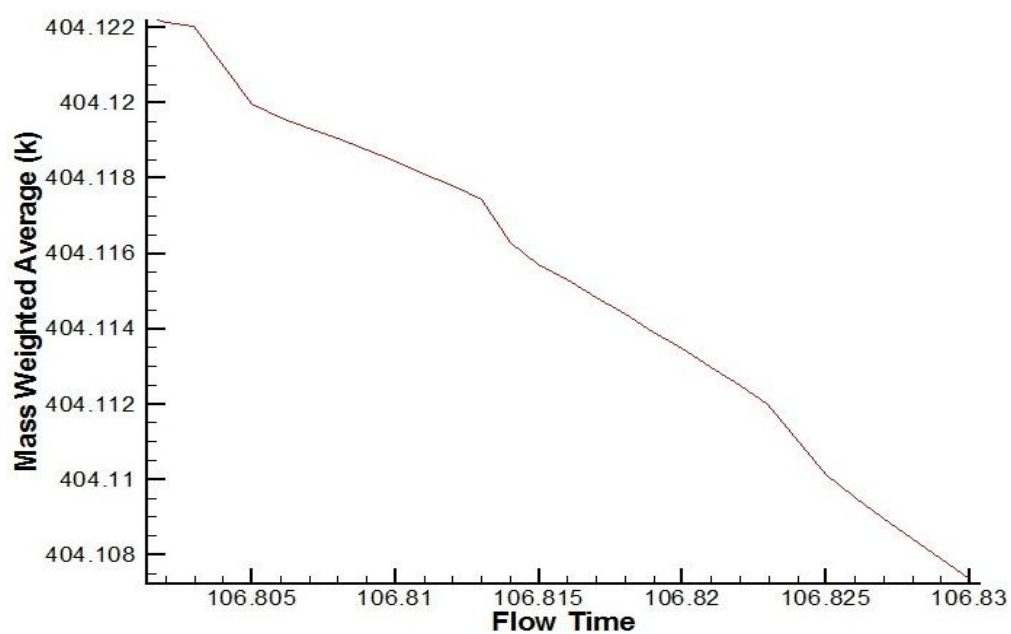
شکل (۳۱-۴) : نمودار نرخ جوشش آب و تولید بخار آب در کل مدلسازی



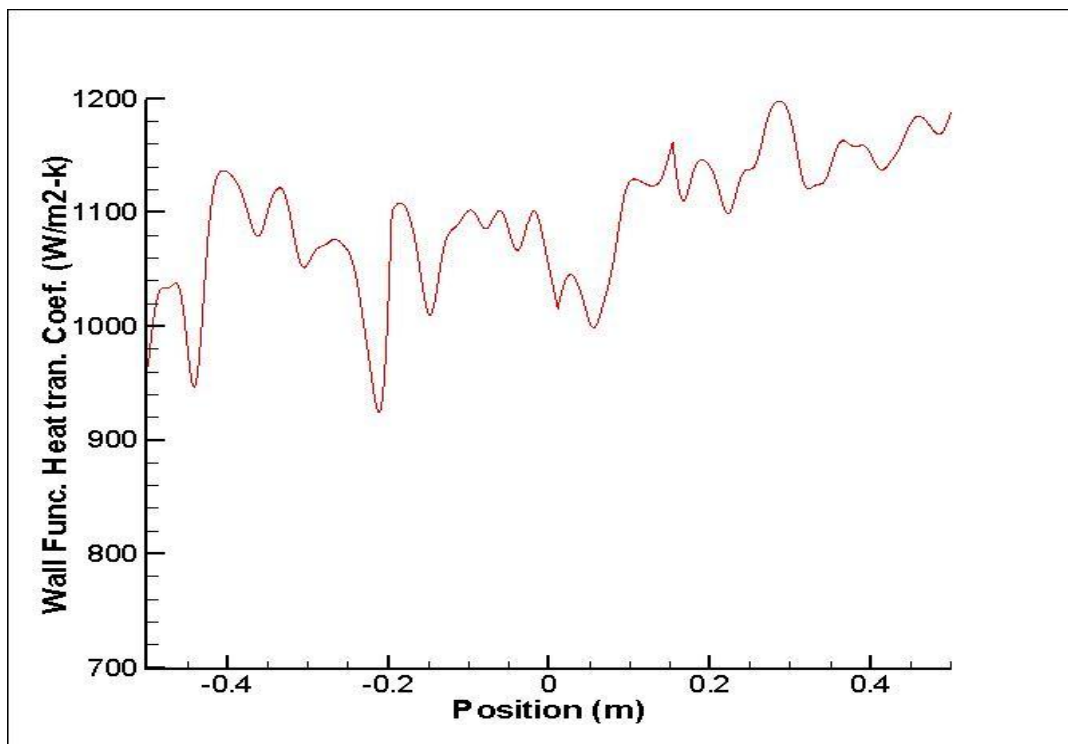
شکل (۳۲-۴) : نمودار نرخ جوشش آب و تولید بخار آب در انتهای مدلسازی



شکل (۳۳-۴) : نمودار دمای متوسط بخار آب خروجی در کل مدلسازی



شکل (۳۴-۴) : نمودار دمای متوسط بخار آب خروجی در انتهای مدلسازی



شکل (۴-۳۶): پروفیل تابع ضریب انتقال حرارت در قسمت پوسته بیرونی تیوب

عدد ناسلت^۱ یک عدد بدون بعد می‌باشد که در انتقال حرارت مبین نسبت گرمای انتقال یافته از طریق همرفت به گرمای انتقال یافته از طریق رسانش در مرز سیستم می‌باشد. این عدد که با نماد (Nu) نشان داده می‌شود به افتخار مهندس آلمانی ویلهلم ناسلت^۲ نامگذاری شده است. در این قسمت این عدد بررسی گشته و در شکل (۴-۳۷) نشان داده شده است.

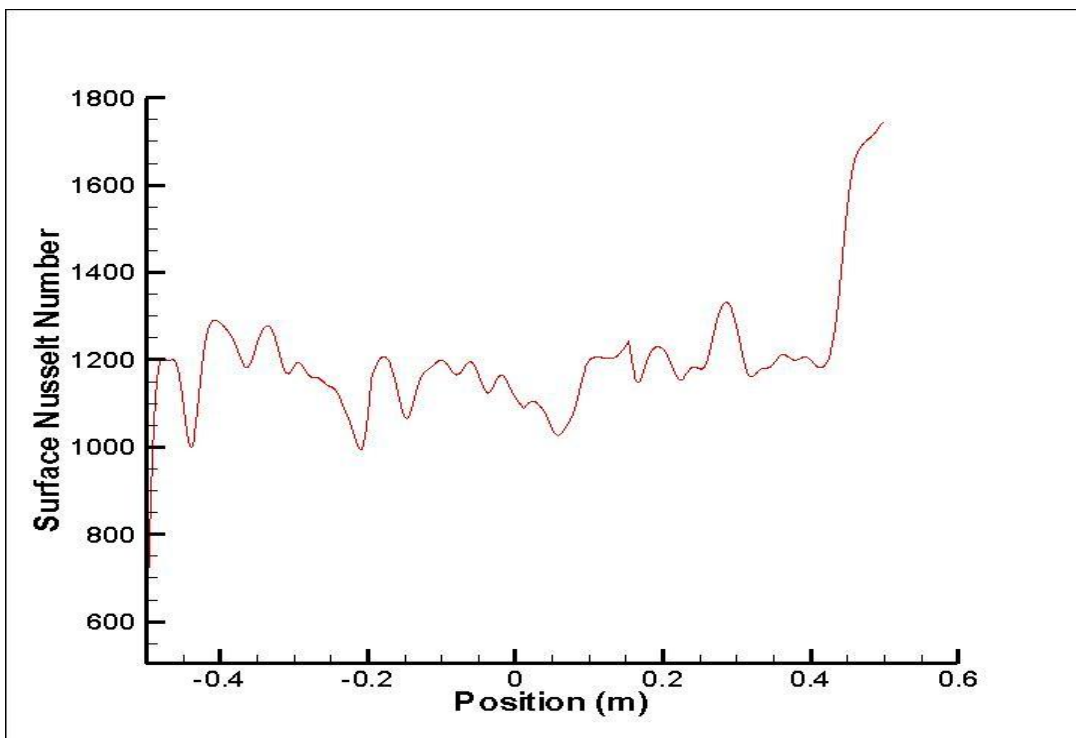
عدد استانتون^۳ یک عدد بدون بعد بوده که نشان دهنده‌ی نسبت شار گرمایی جابه جایی سیال به ظرفیت گرمایی آن است. این عدد که با نماد St یا CH نشان داده می‌شود به افتخار مهندس بریتانیایی توماس ادوارد استانتون^۴ نامگذاری شده است. در شکل (۴-۳۸) پروفیل این عدد در طول تیوب نشان داده شده است.

^۱ Nusselt Number

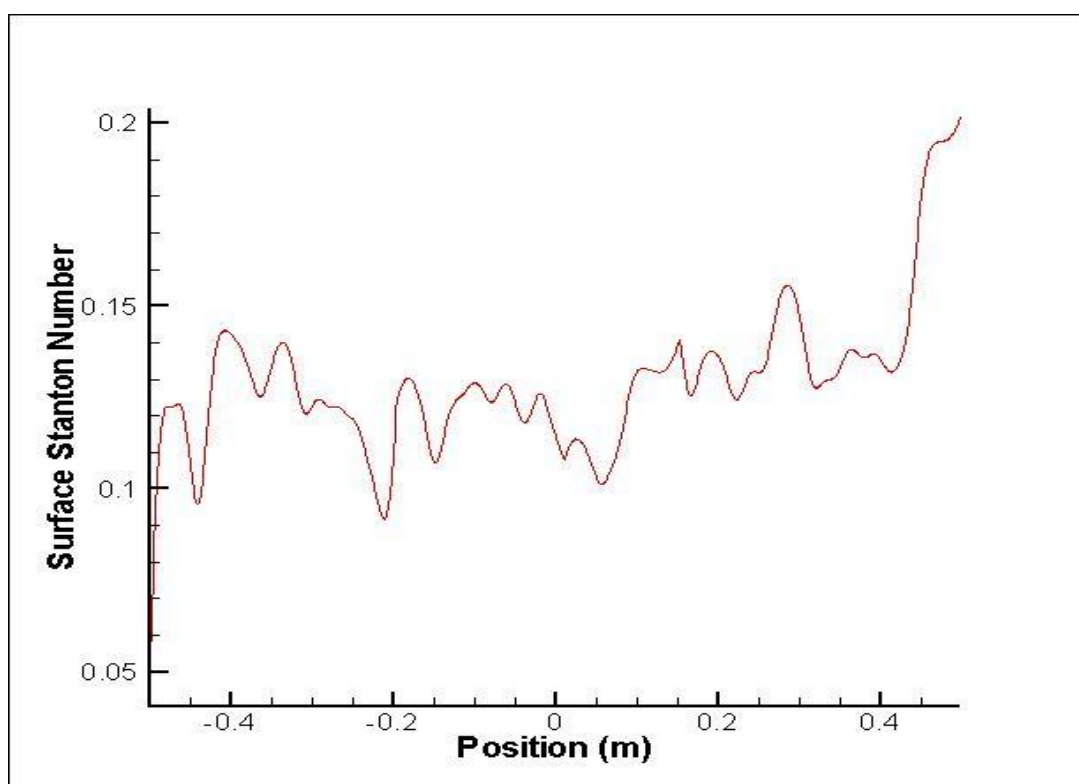
^۲ Wilhelm Nußelt

^۳ Stanton Number

^۴ Thomas Edward Stanton

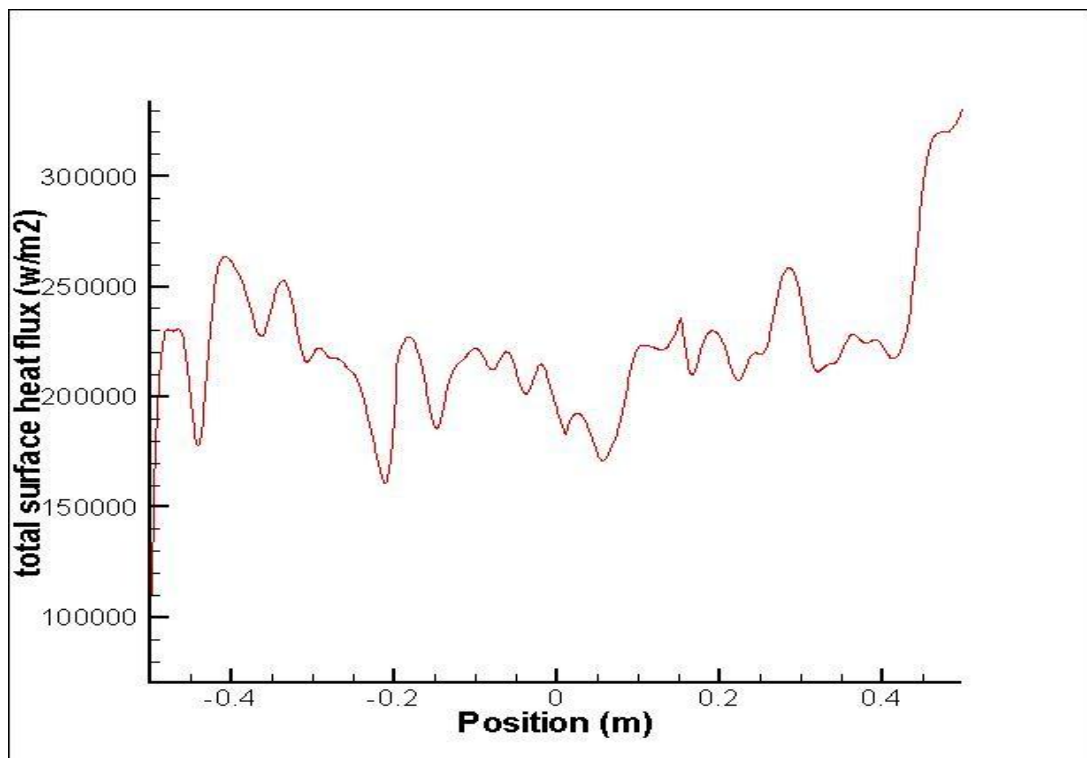


شکل (۴-۳۷) : پروفیل عدد بی بعد ناسلت در طول تیوب



شکل (۴-۳۸) : پروفیل عدد بی بعد استانتون در طول دیواره خارجی تیوب

در قسمت ابتدای تیوب مقدار شار حرارتی در شبیه‌سازی پدیده جوشش مورد بررسی قرار گرفته است. این مقدار به صورت میانگین در مدلسازی حالت پایا در شبیه‌سازی سه‌بعدی استفاده می‌شود. در شکل (۴-۳۹) پروفیل مقدار شار حرارتی مربوط به قسمت دیواره خارجی تیوب نشان داده شده است.

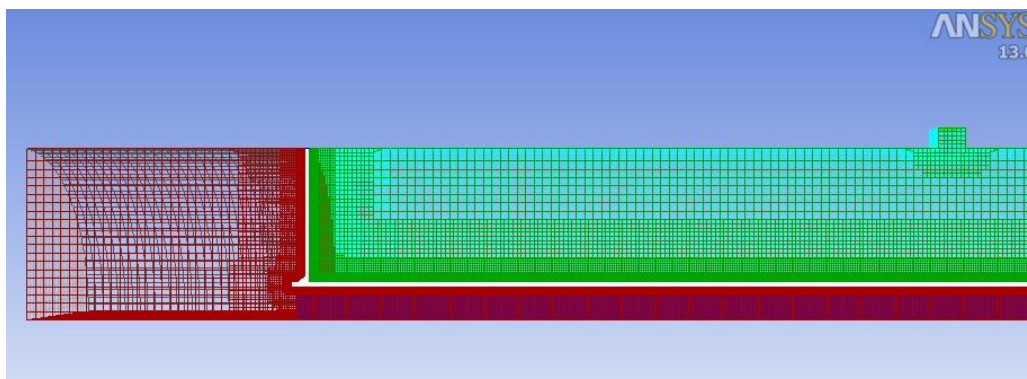


شکل (۴-۳۹): پروفیل شار حرارتی کلی در طول دیواره بیرونی تیوب

۴-۲-۵ مدلسازی سه بعدی تنش

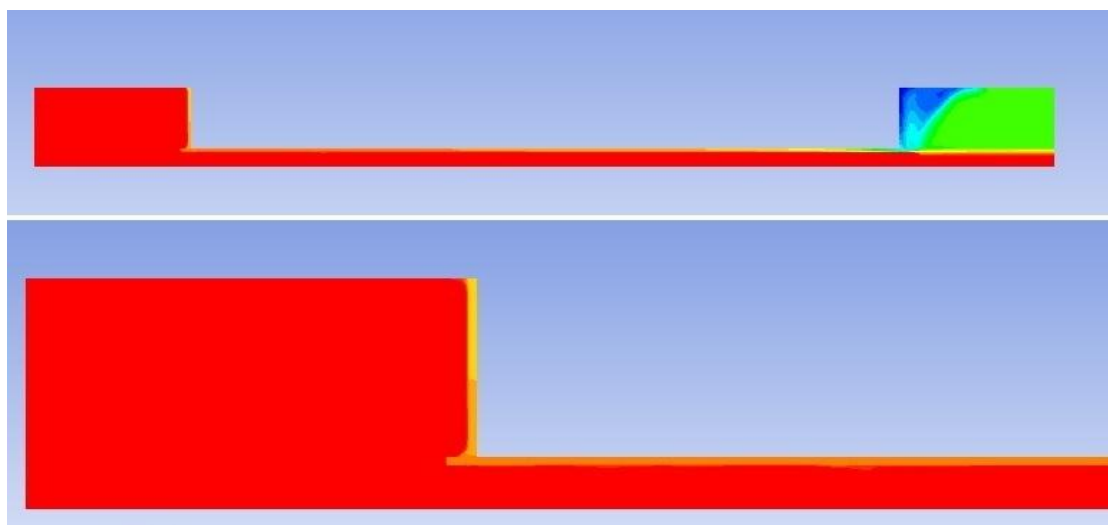
در این قسمت به صورت سه بعدی انتقال حرارت و پروفیل حرارتی تیوب دیگ حرارتی با توجه به نتایج به دست آمده در مدلسازی جوشش بررسی شده است و پروفیل حرارتی و تنش حرارتی تیوب به دست آمده است. هندسه سه بعدی در نرم‌افزار انسیس طراحی شده است. هندسه و شبکه محاسباتی ایجاد شده برای تحلیل پدیده‌های هیدرودینامیک، انتقال حرارت و تنش در شکل (۴-۴۰) نشان داده شده است. تعداد شبکه‌های مربعی بسیار ریز در این مدل دو و نیم میلیون می‌باشد. با ریزتر شدن

شبکه و بیشتر شدن تعداد سلول‌ها از دو و نیم میلیون سلول تغییری بسیار ناچیزی در جواب‌های حاصل شده دیده می‌شود که قابل چشم پوشی می‌باشد. با توجه به حجم بالای شبکه محاسباتی زمان محاسبات بسیار بالا می‌باشد. طول تیوب یک متر و ضخامت آن ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

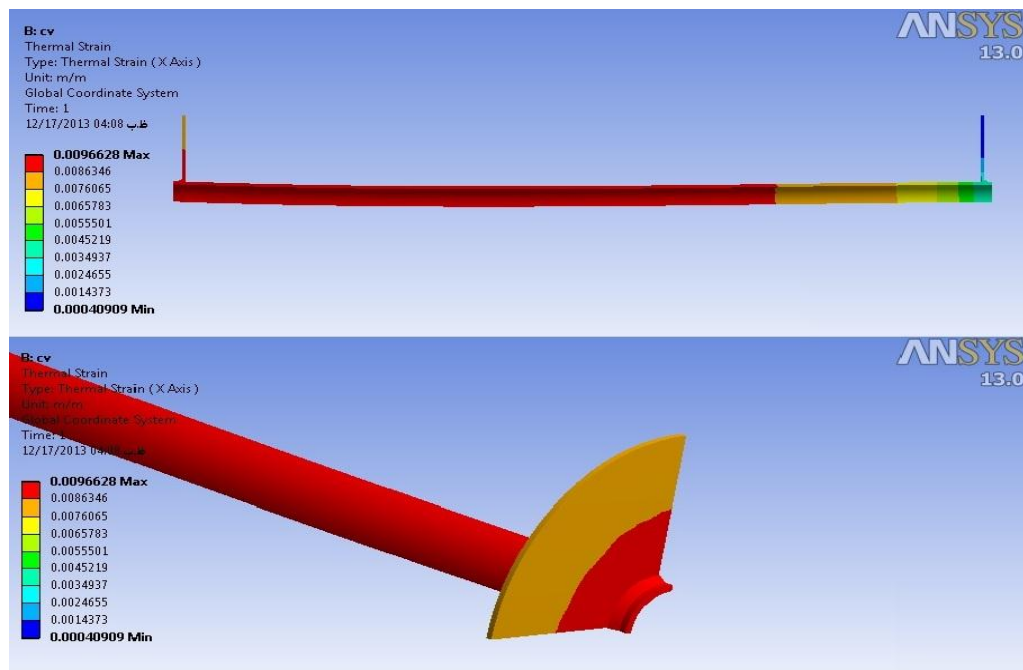


شکل (۴-۴۰) : شبکه سه بعدی تیوب و تیوب شیت

در این مرحله در شرایط مرزی دیواره بیرونی تیوب دیگ بازیافت حرارتی شار حرارتی به دست آمده از مدلسازی جوشش قرار داده شده است. با این کار حجم محاسبات کاهش یافته است. بعد از مدلسازی انجام شده پروفیل حرارتی و همچنین تنش حرارتی تیوب در تمام نقاط تیوب و تیوب شیت به دست آمده است. شکل (۴-۴۱) پروفیل حرارتی تیوب و تیوب شیت را نشان داده است. شکل (۴-۴۲) کرنش حرارتی تیوب و تیوب شیت را نشان داده است.

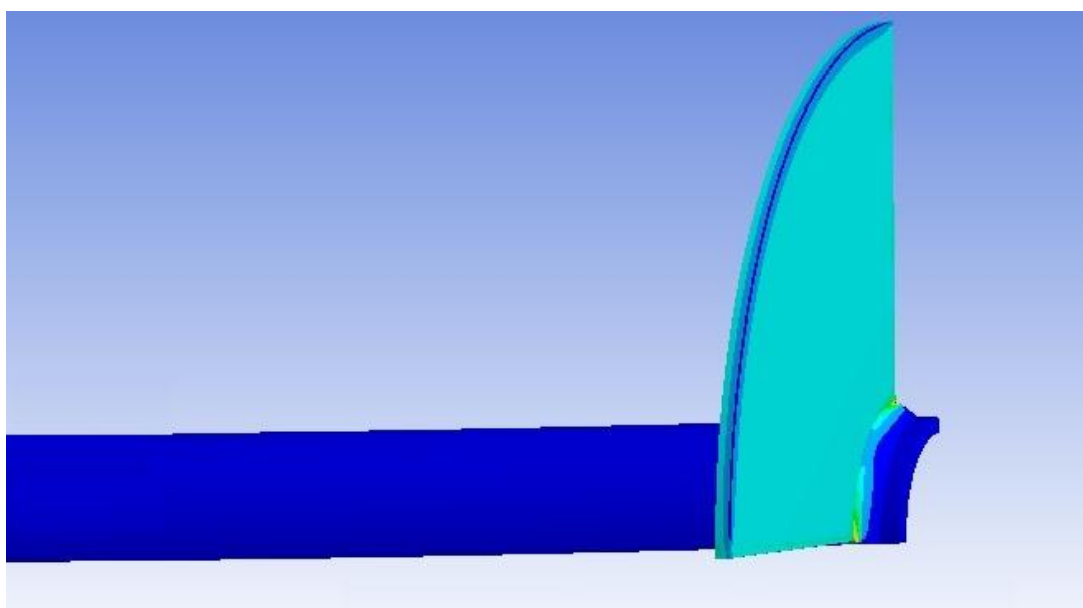


شکل (۴-۴۱) : پروفیل حرارتی تیوب و تیوب شیت



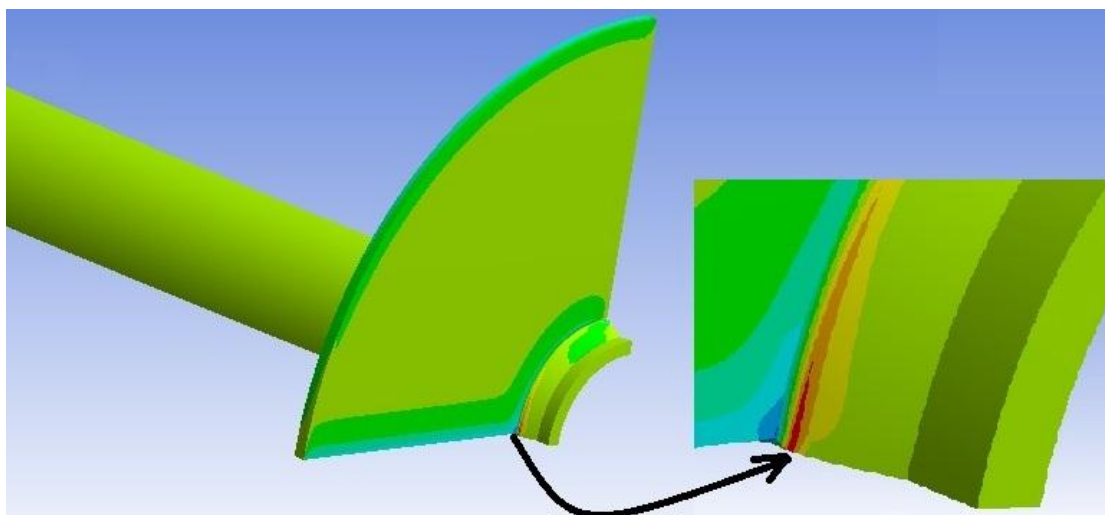
شکل (۴-۴۲) : پروفیل کرنش حرارتی تیوب و تیوب شیت

همانطور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، بیشترین مقدار دما و تنش حرارتی در قسمت اتصال یا جوش بین تیوب و تیوب شیت مشاهده شده است. در حقیقت مکانی که بیشترین نیرو را باید تحمل کند، اتصال بین تیوب و تیوب شیت است. نتایج به دست آمده از این مدلسازی در اشکال زیر نشان داده شده است. در شکل (۴-۴۳) تنش معادل فون مایز نشان داده شده است.

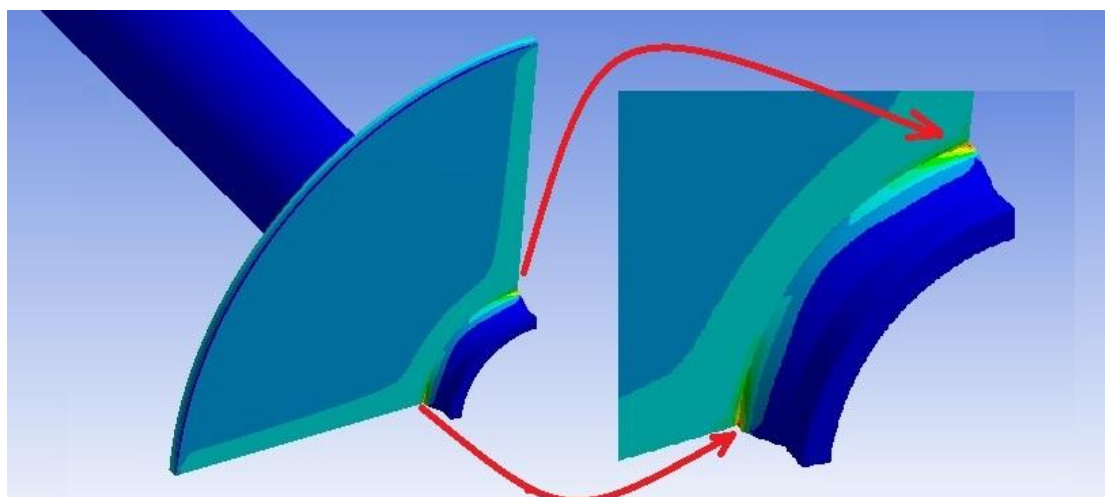


شکل (۴-۴۳) : پروفیل تنش معادل فون مایز

همانطور که جواب مدلسازی نشان داده است بیشترین تنش در محل اتصال تیوب و تیوب شیت دیده شده است. در شکل (۴۴-۴) و (۴۵-۴) به ترتیب تنش برشی و تنش برشی ماکزیمم نشان داده شده است.

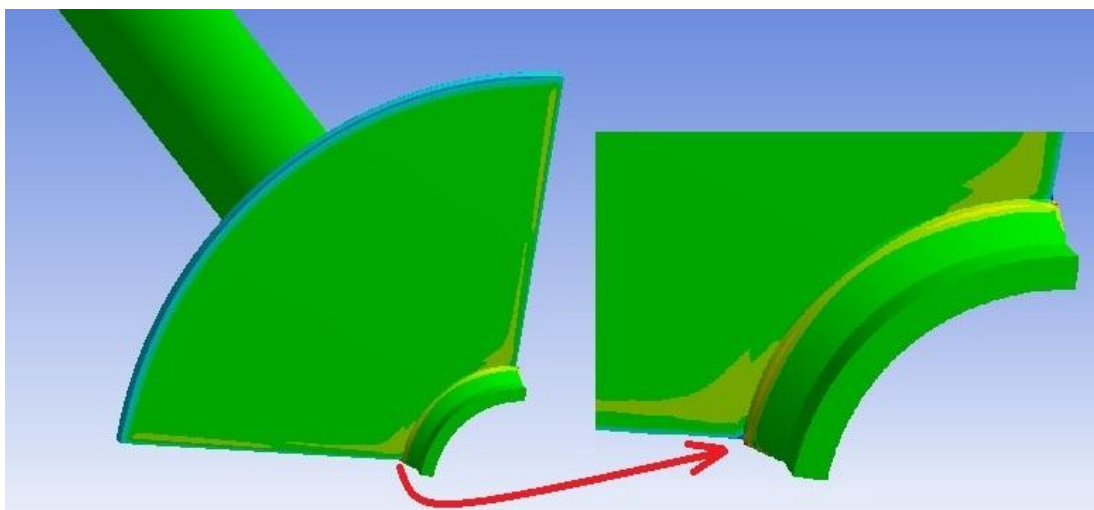


شکل (۴۴-۴): پروفیل تنش برشی

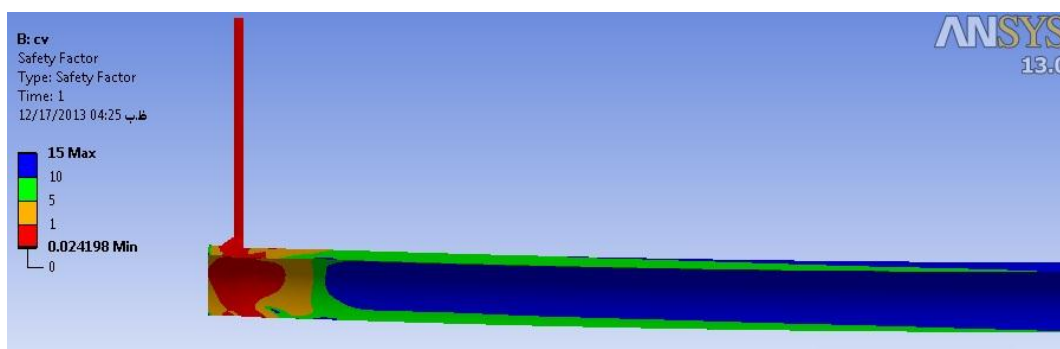


شکل (۴۵-۴): پروفیل تنش برشی ماکزیمم

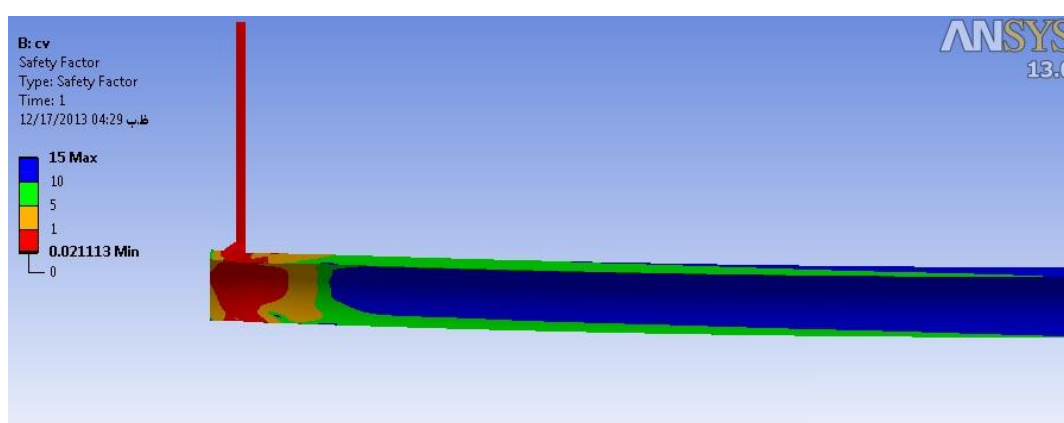
همانطور که مشاهده شده است بیشترین تنش برشی در قسمت جوش بین تیوب و تیوب شیت بوده است. شکل (۴۶-۴) بیشترین تنش محوری را نشان داده است که در محل اتصال می باشد. در اینجا به بررسی ضریب های اطمینان بیشترین تنش های برشی، معادل و کششی پرداخته شده است. شکل های (۴۷-۴) تا (۴۹-۴) نشان دهنده این پارامترها می باشد.



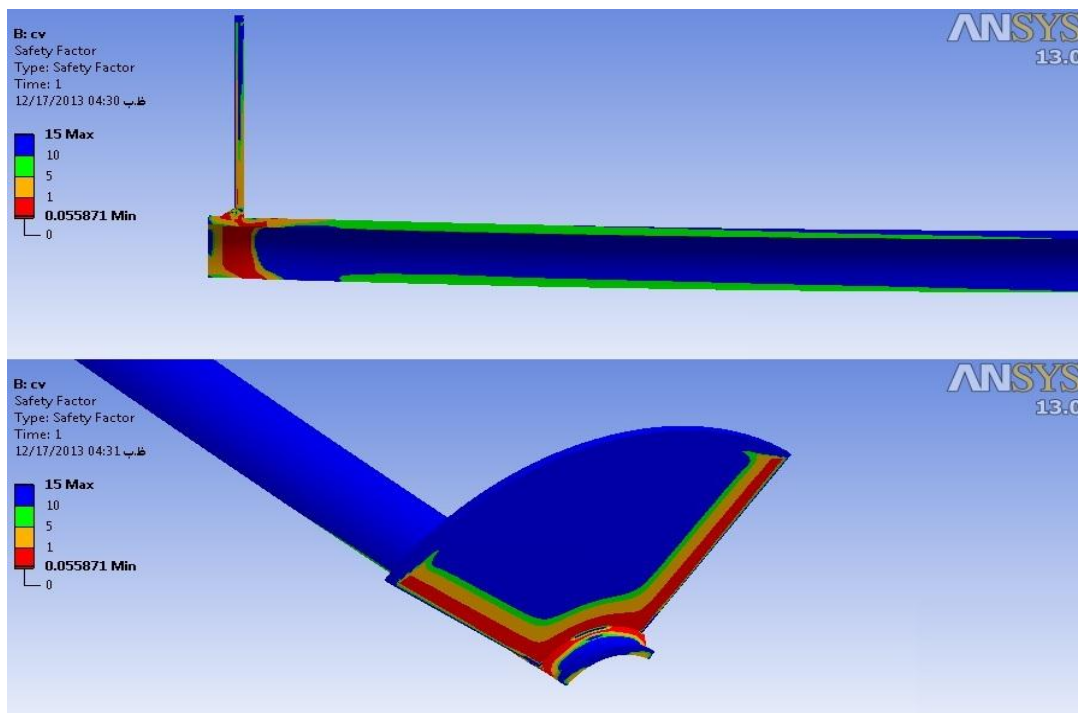
شکل (۴۶-۴) : پروفیل بیشترین تنش محوری



شکل (۴۷-۴) : پروفیل ضریب اطمینان بیشترین تنش معادل

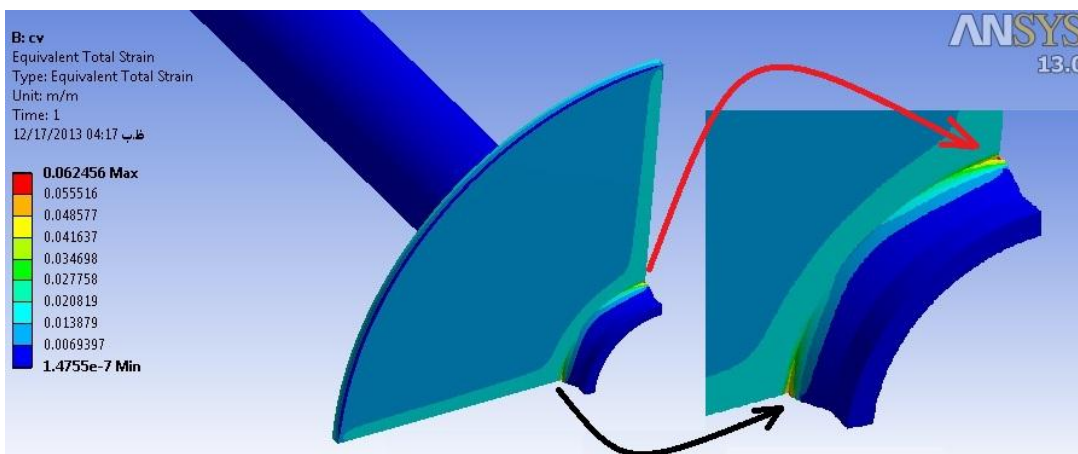


شکل (۴۸-۴) : پروفیل ضریب اطمینان بیشترین تنش برشی



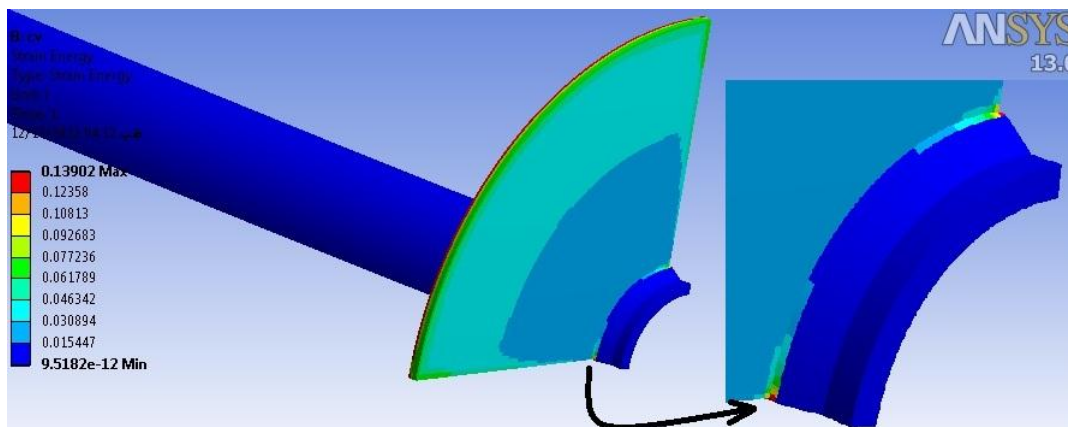
شکل (۴-۴۹): پروفیل ضریب اطمینان بیشترین تنش کششی

تمام نتایج به دست آمده در این تحقیق مکان اتصال بین تیوب و تیوب شیت را محل بحرانی و تحت تنش نشان داده است. نتایج مدلسازی شامل بررسی کرنش نیز بوده است. شکل (۴-۵۰) کرنش معادل کلی را نشان داده است.

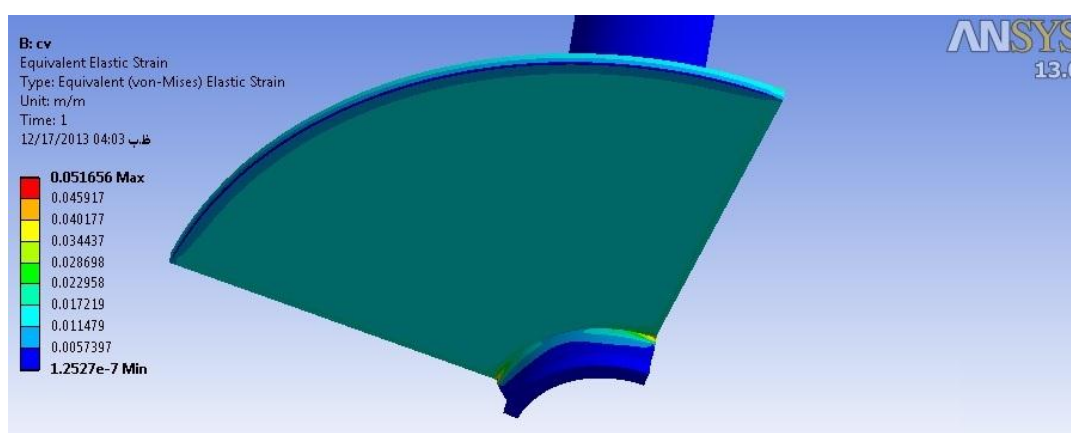


شکل (۴-۵۰): پروفیل کرنش معادل کلی

نقاط بحرانی در این شکل متوجه محل جوش بین تیوب و تیوب شیت می‌باشد. همچنین شکل (۴-۵۱) انرژی کرنش و شکل (۴-۵۲) کرنش الاستیک معادل را نشان داده است.



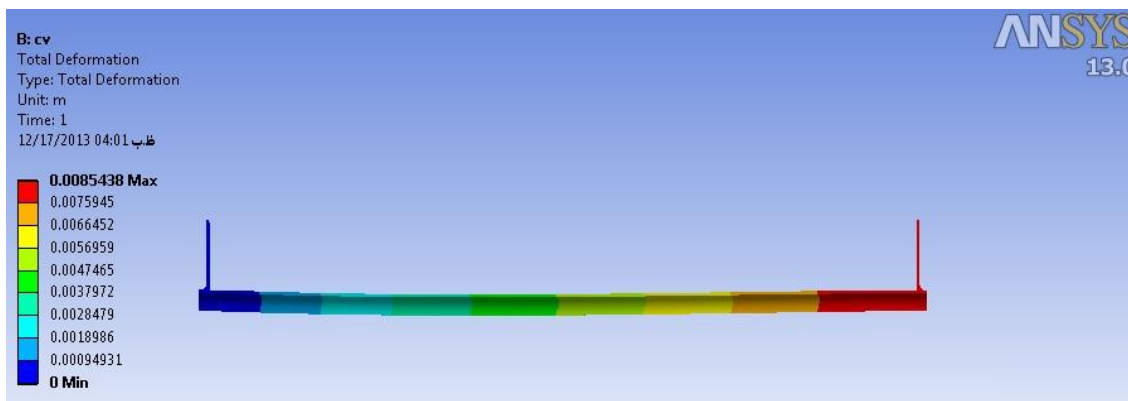
شکل (۴-۵۱) : پروفیل انرژی کرنش



شکل (۴-۵۲) : پروفیل کرنش الاستیک معادل

بیشترین تغییر شکل در یک متر در شکل (۴-۵۳) نشان داده شده است که به صورت محوری می‌باشد، که معادل 0.0076 متر در یک متر می‌باشد. برای طول کل دیگ حرارتی حدود 5 سانتیمتر تخمین زده شده است که با توجه به نتایج به دست آمده در مدلسازی باعث تخریب جوش بین تیوب و تیوب شیت شده است و ضرر و زیان‌های فراوانی را متحمل گشته است.

با توجه به افزایش طول تیوب در کوره عملیات دیگ بازیافت حرارتی، تیوب‌شیت باید قابلیت نوسانی داشته باشد. با توجه به مدارک اخذ شده از پالایشگاه‌های صنعتی محل اتصال تیوب‌شیت به بدنه دیگ بازیافت حرارتی ثابت می‌باشد که این امر منجر به افزایش تنش وارده به تیوب شده و در نهایت باعث تخریب و جدا شدن تیوب از تیوب‌شیت می‌شود.



شکل (۴-۵۳) : پروفیل تغییر شکل کلی تیوب و تیوبشیت

با توجه به طول دیگ حرارتی که ۸ متر می‌باشد، تغییر طول تیوب برابر 0.068 متر مشاهده شده است. تمام نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان دهنده تمرکز تنش در نقطه اتصال جوش بین تیوب و تیوبشیت می‌باشد.

۴-۳ ارزیابی صحت نتایج

در این قسمت به مقایسه نتایج بدست آمده از این پایان‌نامه با نتایج مطالعات دیگر و همچنین گزارش پالایشگاه ایلام پرداخته شده است. تنش‌ها و کرنش‌هایی که از مدلسازی نتیجه شده است کاملاً با تخریب‌های مشاهده شده در پالایشگاه مطابقت دارد، دقیقاً نقاطی که در گزارش پالایشگاه تخریب شده است نقاطی هستند که در نتایج مدلسازی این پایان‌نامه دارای بیشترین تنش و کرنش می‌باشند و نقاط بحرانی بین تیوب و تیوبشیت محل اتصال جوش بین آنها می‌باشد.

شکل‌های (۴-۵۴) و (۴-۵۵) نشان دهنده آسیب‌هایی است که در پالایشگاه دیده شده است که با پدیده با نتایج مدلسازی کاملاً مطابقت دارد.

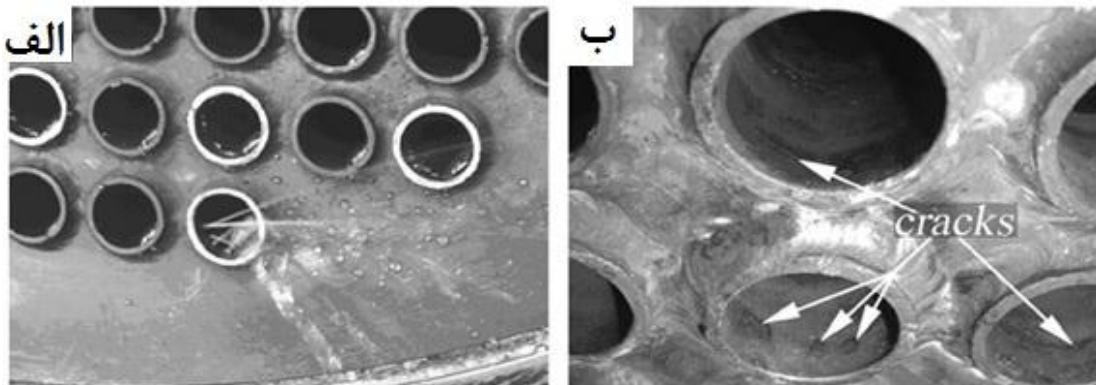


شکل (۴-۵۴): ترک و نشتی‌های پدید آمده بین تیوب و تیوب شیت [۹]



شکل (۴-۵۵): نمونه‌هایی از تعمیر و جوشکاری مجدد [۹]

نتایج کارهای محقق گو و همکارانش که به صورت آزمایشگاهی انجام شده است نیز با نتایج مدلسازی انجام شده در این پایان‌نامه مطابقت دارد، دقیقاً نقاطی که در تحقیق این محققان تخریب شده است نقاطی هستند که در نتایج مدلسازی این پایان‌نامه دارای بیشترین تنش و کرنش می‌باشند و نقاط بحرانی بین تیوب و تیوب‌شیت محل اتصال جوش بین آنها می‌باشد. در شکل (۴-۵۶) نقاط بحرانی مدلسازی تخریب شده‌اند. این شکل‌ها نشان دهنده نتایج این محققان می‌باشد.



شکل (۴-۵۶): الف) ترک ایجاد شده در هنگام تست آب ب) ترک ایجاد شده پس از تست آب [۱۴]

این مقایسه نشان می‌دهد کارهای انجام گرفته در این پایان‌نامه که شامل تحقیق و بررسی و مدلسازی پدیده تخریب جوش بین تیوب و تیوب‌شیت می‌باشد از صحت برخوردار است. نتیجه مدلسازی انجام شده در این پایان‌نامه در پالایشگاه ایلام مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۴-۴ جمع‌بندی

در نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی دوبعدی، در ابتدای تیوب لایه مرزی بسیار کمی دیده می‌شود. انتقال حرارت در قسمت لایه مرزی با ضخامت این لایه رابطه عکس دارد. بخاطر ضخامت کم لایه مرزی حرارتی در ابتدای تیوب، فلاکسی انتقال حرارت افزایش می‌یابد، در نتیجه شاهد اختلاف دمایی شدید در ابتدای لوله بوده که منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی می‌گردد.

بیشترین تنش در قسمت اتصال جوش دیده شده است. در حقیقت اختلاف دمایی بالا و تمرکز حرارت در ابتدای تیوب تنش حرارتی بسیار شدیدی را به این قسمت از تیوب تحمیل می‌کند. از آنجایی که نقاط تیز تمایل بسیار زیادی برای جمع‌آوری حرارت را دارند و جوشکاری انجام شده بدون این نقاط مقدور نمی‌باشد، تنش شدیدی به قسمت جوشکاری شده اعمال می‌گردد.

تنش برشی حاصل شده در محل اتصال تیوب و تیوب‌شیت قرار دارد و دلیل اصلی آن یکی نبودن جنس تیوب و تیوب‌شیت می‌باشد. در حقیقت طی بررسی‌های انجام شده جنس آنها کاملاً با هم تطابق ندارد و در نتیجه ضریب انبساط آنها یکی نمی‌باشد و در برابر اختلاف دمایی یکسان واکنش

متفاوت از خود نشان می‌دهند.

کرنش‌ها از تنش‌های حرارتی که در ابتدای تیوب دیده شده‌اند حاصل می‌شوند که این نشان دهنده‌ی اهمیت بالای تنش‌های حرارتی در این قسمت می‌باشد. در مرکز جوش اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت بیشترین کرنش پدید می‌آید و باعث تخریب این قسمت از دیگ بازیافت حرارتی می‌شود. با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود که تغییر طول تیوب تقریباً $1/25$ سانتی‌متر می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به اینکه اندازه تیوب در نظر گرفته شده در این تحقیق ربع اندازه واقعی می‌باشد تغییر شکل کلی واقعی حدوداً برابر ۵ سانتی‌متر می‌باشد.

با بررسی پدیده جوشش به صورت دوبعدی، در پایان محاسبات نرخ جوشش به بالاترین مقدار خود رسیده بود. در قسمت ورودی گازهای داغ نرخ جوشش بیشتری پدید می‌آید در نتیجه گرمای بیشتری در این قسمت وجود دارد که عامل اصلی تخریب جوش اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت می‌باشد. آب در این حالت به صورت یکنواخت تبخیر می‌شد.

بیشترین مقدار دما و تنش حرارتی در قسمت اتصال یا جوش بین تیوب و تیوب‌شیت مشاهده شده است. در حقیقت مکانی که بیشترین نیرو را باید تحمل کند، اتصال بین تیوب و تیوب‌شیت است. بیشترین تنش برشی در قسمت جوش بین تیوب و تیوب‌شیت بوده است.

با توجه به افزایش طول تیوب در کوره عملیات دیگ بازیافت حرارتی، تیوب‌شیت باید قابلیت نوسانی داشته باشد. با توجه به مدارک اخذ شده از پالایشگاه‌های صنعتی محل اتصال تیوب‌شیت به بدنه دیگ بازیافت حرارتی ثابت می‌باشد که این امر منجر به افزایش تنش وارده به تیوب شده و در نهایت باعث تخریب و جدا شدن تیوب از تیوب‌شیت می‌شود. با توجه به طول دیگ حرارتی که ۸ متر می‌باشد، تغییر طول تیوب برابر $0/068$ متر مشاهده شده است. تمام نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان دهنده تمرکز تنش در نقطه اتصال جوش بین تیوب و تیوب‌شیت می‌باشد.

۴-۵ پیشنهادات

- تطبیق جنس الکتروود جوشکاری با تیوب و تیوب‌شیت از تخریب اولیه جلوگیری می‌شود.
 - هندسه جوشکاری قابل تغییر بوده و تبدیل به هندسه‌ای با زاویه تیز کمتر گردد تا از تمرکز حرارت و در نتیجه تمرکز تنش حرارتی جلوگیری گردد.
 - تزریق گوگرد با دمای پایین‌تر در ابتدای ورودی تیوب‌های دیگ حرارتی لایه مرزی حرارتی ایجاد می‌گردد که از گرم شدن بیش از اندازه محل جوشکاری جلوگیری می‌کند.
 - محل اتصال تیوب‌شیت به پوسته دیگ WHB باید به صورتی باشد که با انبساط در اثر دمای زیاد گازهای خروجی از کوره واحد بازیافت گوگرد قابلیت حرکت بر روی یک ریل را داشته باشد.
- در تحقیقات بعدی مطلوب است که مدلسازی سه بعدی برای دسته‌ای از تیوب‌ها انجام پذیرد و مدل‌های پیشنهاد شده مورد بررسی قرار گیرد.

- [۱] Sames J. and Pasca H., (۱۹۹۸) "Sulphur recovery".
- [۲] Fenderson S., (۱۹۹۸), "Improving Clous Sulfur Recovery Unit Reliability Through Engineering Design", Brimstone Engineering Sulfur Recovery Symposium, texas, pp.۲۷۰.
- [۳] مبانی پالایش نفت، دکتر گیتی ابوالحمید، انتشارات دانشگاه تهران
- [۴] عملیات انتقال جرم Robert E. Treybal، ترجمه دکتر مرتضی سهرابی و دکتر طاهره کاغذچی
- [۵] Katz D.L., (۱۹۵۹) "Handbook Of Natural Gas Engineering", McGraw-Hill, P۸۰۲, Mishawaka, U.S.A.
- [۶] Dorchak, T.P., S.K. Gangwal, and W.J. McMichael, (۱۹۹۱) "The Direct Sulfur Recovery Process" Environmental Progress ۱۹(۲), ۶۸
- [۷] Rajani J.B., (۲۰۰۴) "Treating Technologies of Shell Global Solutions for Natural Gas and Refinery Gas Streams", Shell Global Solutions International B.V., Amsterdam
- [۸] Manenti G., Papasidero, D., Manenti, F., Bozzano, G., and Pierucci, S. (۲۰۱۲) "Design of Sru Thermal Reactor and Waste Heat Boiler Considering Recombination Reactions", Procedia Engineering, ۴۲, ۳۷۶-۳۸۳.
- [۹] گزارش تخریب و نشتی‌های پدید آمده بین تیوب و تیوب شیت کوره واکنش واحد بازیافت گوگرد
پالایشگاه ایلام، گزارش سال ۱۳۸۹.
- [۱۰] Xu S., and Wang W. (۲۰۱۳) "Numerical Investigation on Weld Residual Stresses in Tube to Tube Sheet Joint of a Heat Exchanger", International Journal of Pressure Vessels and Piping, ۱۰۱, ۳۷-۴۴.
- [۱۱] Otegui J. L., and Fazzini P. G. (۲۰۰۴) "Failure Analysis of Tube–Tubesheet Welds in Cracked Gas Heat Exchangers", Engineering Failure Analysis, ۱۱, ۹۰۳-۹۱۳.
- [۱۲] Azevedo C. R. F., Beneduce Neto F., Brandi S. D., and Tschitschin A. P. (۲۰۰۸) "Cracking of ۲.۲۵cr–۱.۰mo Steel Tube/Stationary Tube-Sheet Weldment of a Heat-Exchanger", Engineering Failure Analysis, ۱۵, ۶۹۵-۷۱۰.
- [۱۳] Othman H., Purbolaksono J., and Ahmad B. (۲۰۰۹) "Failure Investigation on Deformed Superheater Tubes", Engineering Failure Analysis, ۱۶, ۳۲۹-۳۳۹.

- [۱۴] Guo C., Han C. J., Tang Y. M., Zuo Y., and Lin S. Z. (۲۰۱۱) "Failure Analysis of Welded Vertical Tube Bundle in a Heat Exchanger", Engineering Failure Analysis, ۱۸, ۸۹۰-۸۹۴.
- [۱۵] Ma T., Chen Y., Zeng M., and Wang Q. (۲۰۱۲) "Stress Analysis of Internally Finned Bayonet Tube in a High Temperature Heat Exchanger", Applied Thermal Engineering, ۴۳, ۱۰۱-۱۰۸.
- [۱۶] Yang Y.-T. And Hwang M.-L. (۲۰۰۹) "Numerical Simulation of Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Heat Exchangers Fitted with Porous Media", International Journal of Heat and Mass Transfer, ۵۲, ۲۹۵۶-۲۹۶۵.
- [۱۷] Khoshhal A., Rahimi M., and Alsairafi A. A. (۲۰۰۹) "Cfd Investigation on the Effect of Air Temperature on Air Blowing Cooling System for Preventing Tube Rupture", International Communications in Heat and Mass Transfer, ۳۶, ۷۵۰-۷۵۶.
- [۱۸] Akbari D., and Sattari-Far I. (۲۰۰۹) "Effect of the Welding Heat Input on Residual Stresses in Butt-Welds of Dissimilar Pipe Joints", International Journal of Pressure Vessels and Piping, ۸۶, ۷۶۹-۷۷۶.
- [۱۹] Yin S., Zhang J., Tong L., Yao Y., and Wang L. (۲۰۱۳) "Experimental Study on Flow Patterns for Water Boiling in Horizontal Heated Tubes", Chemical Engineering Science, ۱۰۲, ۵۷۷-۵۸۴.
- [۲۰] Esmaeeli A. and Tryggvason G. (۲۰۰۴) Computations of Film Boiling Part I: Numerical Method", International Journal of Heat and Mass Transfer, ۴۷, ۵۴۵۱-۵۴۶۱.
- [۲۱] Son G., and Dhir V. K. (۲۰۰۸) "Numerical Simulation of Nucleate Boiling on a Horizontal Surface at High Heat Fluxes", International Journal of Heat and Mass Transfer, ۵۱, ۲۵۶۶-۲۵۸۲.
- [۲۲] Fletcher C.A.J. (۱۹۹۰), "Computational Techniques For Fluid Dynamics", Vol. ۱, Second Edition, University Sydney, Australia, pp.۴۰۱.
- [۲۳] سلطانی م، وح الله رحیمی ر، (۱۳۸۹) " دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم افزار "FLUENT" چاپ اول، تهران، ص ۴۴۶
- [۲۴] Fletcher C.A.J. (۱۹۸۷), "Computational Techniques For Fluid Dynamics", Vol. ۲, University Sydney, Australia, pp.۴۴۸.
- [۲۵] ANSYS Inc., ANSYS ۱۳.۰ User 's Guide (۲۰۱۰).

Abstract

The junction between the tube and tube sheet Elam refinery heat recovery boilers, sulfur recovery unit was destroyed due to unknown and then again, this phenomenon has been repaired four times. This thesis is based on this problem definition and the resulting thermal stresses and strains will locate the exact location of the solution is given.

Segregation of impurity gases from the standpoint of safety, corrosion control, setting the standard combination of gas and liquid products to prevent catalyst poisoning plants receiving gas or liquid products, and finally limit the release of pollutants to the environment are required.

Claus main reaction of hydrogen sulfide oxidation by air oxygen in the presence of a catalyst was a single stage reactor. The products of the reaction of elemental are sulfur and water. This reaction is assumed there are no impurities and interfering substances. Note that the percent conversion of sulfur temperature, usually 70% of the total reaction is completed at this stage. So other than a stage or multi-stage catalytic combustion is also required. Sulfur after combustion and catalytic processes in order to progress condensation reactions and the flow is separated.

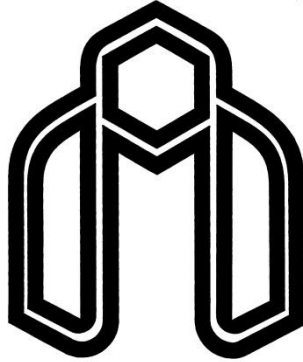
To absorb the heat generated by the furnace and liquid sulfur reaction, also enhance the efficiency, emissions resulted, after the reaction furnace enter waste heat boiler. Usually most of the new units with the Claus sulfur recovery, heat recovery exchanger, furnace reactions are combined in a tank. Exhaust gases from the furnace with the reaction temperature of about 840 °C, the internal tube heat recovery exchanger is a shell and tube type heat through and produce only water vapor are At this stage 15% of the total sulfur is obtained.

The heat exchanger that acted with medium pressure steam as a boiler significant and provides the unit Air blower propulsion has shell that made of carbon steel and has been operating temperature and pressure as 210.2 psia and 210°C. Two-inch carbon steel pipe placed inside the shell that holds the operating pressure and temperature 840°C and 210 psia. Tube exchanger outlet temperature is 240°C in operational condition.

Due to the temperatures, the distribution of sulfur in the reaction furnace chamber of the form S₂ (1-2) to S₂ (3-4) will become. Isolated sulfur in end of WHB driven as

liquid in sulfur tank. To prevent excessive warming WHB tubes due to its low thickness, ½ -inch inlet pipe using ceramic rings are protected against heat. Generally, when you start to increase and decrease the temperature of the furnace, cracked rings and thereby causing the temperature of the hot gases over the mouth of the tube and its sulfide, which eventually led to the destruction of damaged and leaking pipes Power inner tubes, so you should install this as well as throat and cover the whole screen by refractory cement pipe is very accurate.

This thesis examines the stresses and strains obtained from the high temperature of the inlet gas heat recovery boiler on the tube sheet, tube, between the tube and tube sheet welding has been. The refinery reported that Elam is getting accurate information modeling is done entirely based on reality. Change the length of the tube and tube sheet is one of the most important results of this thesis because the main cause of degradation during the expansion of the high temperature gas-inlet tube and tube sheet of a heat recovery boiler. The modeling is done in two-dimensional phenomenon of boiling water on the outer wall of the tube, and three - dimensional to obtain thermal stresses and strains and also the length change is. Two-dimensional modeling of previous research and the results are less accurate. Three-dimensional modeling of two-dimensional model is much more accurate response. Given the current situation, these results correspond well with the experimental results. Maximum force in the connection between tube and tube sheet welding seen between them is destroyed.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

CFD analysis of WHB tubes failures in sulfur recovery unit reactor furnace

Mehrdad Pourmoghaddam

Supervisors:

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

Dr. Yaghoub Behjat

February ۲۰۱۴