

بررسی عددی و بهینه‌سازی رفتار مکانیکی تقویت‌کننده‌های داکت بخار کندانسور هوا خنک

عالیه میری^۱، سامان جعفری^۲، سعید حدیدی مود^۳، سعید رهنما^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۳ استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

*مسئول مکاتبات: srahnama@birjand.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

بهینه‌سازی فرآیندکاری
رینگ‌های تقویت‌کننده
داکت بخار هوا خنک
کمانش
المان محدود

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۱۴
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۱۹

امروزه بهینه‌سازی هندسه، وزن و مشخصات مکانیکی، در فرآیند طراحی و ساخت سازه‌ها، به‌منظور بهبود کارایی و افزایش بازده اقتصادی به‌عنوان یک مرحله مهم در فرآیند طراحی مطرح است. پوسته‌های استوانه‌ای از چنین سازه‌هایی هستند. این پوسته‌ها در شرایط کاری تحت اثر نیروهای مختلفی قرار می‌گیرند که به علت داشتن ضخامت کم نسبت به شعاع و طول، مستعد کمانش هستند. از این‌رو مهم‌ترین پارامتر در طراحی و ساخت این پوسته‌ها، فشار کمانشی بحرانی است و بهترین روش برای بالا بردن مقاومت کمانشی آن‌ها، استفاده از تقویت‌کننده است. در این پژوهش تعداد، فاصله و ضخامت رینگ‌های تقویت بر اساس استاندارد ASME محاسبه شده سپس، تحلیل در نرم‌افزار اجزاء محدود انسیس انجام شده است. در نهایت بهینه‌سازی با استفاده از یکی از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در ترکیب با روش اجزاء محدود، با تغییر ضخامت و عرض ۹ رینگ تقویتی، به‌عنوان متغیرهای طراحی مسئله بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت بخار کندانسور هوا خنک انجام گرفته است. نتیجه بهینه‌سازی، با کاهش ۵ درصدی جرم کل داکت بخار همراه بوده است. این در حالی است که افزایش تنش فون میز ۵، غشایی ۱۴ و خمشی ۳ مگاپاسگال در مدل بهینه نهایی نسبت به مدل ورودی به فرآیند بهینه‌سازی بوده است.

۱ مقدمه

رینگ و استرینگر جهت طراحی وزن کمینه پوسته را بررسی کرد. در این تحقیق، بهینه‌سازی با افزودن رینگ‌های تقویتی T-شکل و با استفاده از برنامه کامپیوتری پاندا دو^۷، مختص طراحی وزن کمینه، انجام گرفت [۴]. علی‌نیا، بهینه‌سازی تقویت‌کننده‌ها در صفحات متصل به بارهای برشی با تقویت‌کننده‌های عرضی را برای رسیدن به حداقل وزن و هزینه، بررسی کرد. او افزایش ظرفیت کمانشی صفحات بدون افزایش ضخامت آن‌ها را هدف اصلی به‌کارگیری تقویت‌کننده‌ها دانست [۵]. جارمای^۸ و همکاران، طراحی بهینه پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده یک عضو قائم از یک سکوی (پلتفرم) خرپایی شکل ثابت، تحت بار محوری فشاری و فشار خارجی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق رینگ‌های تقویت و استرینگرها با مقاطع قوطی شکل و I-شکل استفاده شده‌اند [۶]. صادقی‌فر و همکاران، به بهینه‌سازی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با هدف وزن کمینه و بیشترین ظرفیت بار کمانشی محلی را با استفاده از برنامه‌نویسی الگوریتم ژنتیک، پرداختند. در این پژوهش قیود طراحی، توابع وزن و بار کمانشی بحرانی هستند [۷]. باقری و همکاران، بهینه‌سازی پوسته‌های تقویت‌شده تحت فشار خارجی و بار فشاری محوری با تابع چندهدفه کمترین وزن سازه و بیشترین فرکانس اصلی و قیود بار کمانشی را انجام دادند. در این فرآیند بهینه‌سازی متغیرهای طراحی شامل پارامترهای ضخامت پوسته، تعداد، عرض و ترتیب توزیع تقویت‌کننده‌ها هستند [۸].

با گذشت زمان و پیشرفت‌های علمی و به بازار آمدن اولین ژنراتورهای بخار نیاز به یک استاندارد جهت طراحی مخازن تحت فشار بیشتر احساس شد. در گذشته، راوت و ردی^۱، طراحی بهینه پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با هدف وزن کمینه و ترکیب قیود فرکانس طبیعی و مقاومت کمانشی کلی را بررسی کردند. آن‌ها بهترین راه دستیابی به بیشترین استحکام نسبت به وزن یک پوسته استوانه‌ای را تقویت دیواره پوسته با تقویت‌کننده‌های طولی (استرینگر^۲) و محیطی (رینگ تقویت^۳) دانستند [۱]. پاتل^۴، بهینه‌سازی وزن پوسته استوانه‌ای آلومینیومی تقویت‌شده دماغه هواپیما که تحت بار خمشی خالص قرار گرفته است را به‌عنوان یک مسئله مقید غیرخطی و با استفاده از دو نوع تقویت‌کننده طولی و عرضی دارای هندسه یکنواخت و جنس یکسان را بررسی کردند [۲]. کیو^۵، بهینه‌سازی پوسته‌های تقویت‌شده تحت فشار محوری با اشکالی مختلف را جهت به دست آوردن حداقل وزن سازه انجام داد. وی اثر کمانش پوسته روی بارهای کمانشی کلی و پایداری پنل اصلی را از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در بهینه‌سازی پوسته‌ها دانست و آن‌ها را از قیود اساسی جهت رسیدن به هدف وزن کمینه عنوان نمود [۳]. باشنل^۶، بهینه‌سازی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده تحت فشار خارجی با

¹Raot and Reddy

²Stringer

³Stiffening ring

⁴Patel

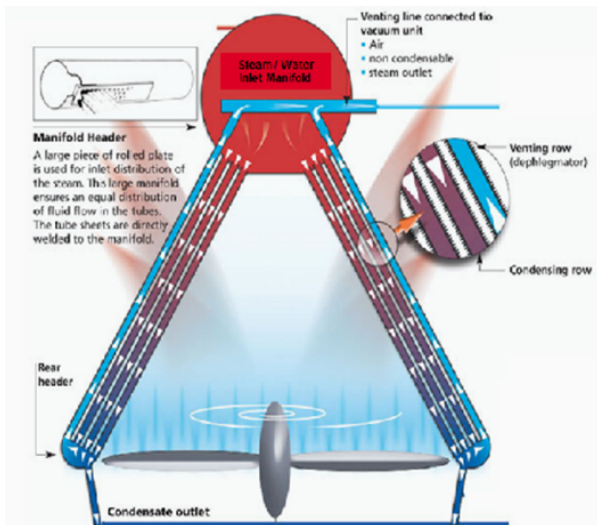
⁵Qui

⁶Bushnell

⁷Panda 2

⁸Jarmai

هوا خنک ایستگاه برق ۶ × ۶۶۵ مگاواتی در آفریقای جنوبی نشان داده شده است.



شکل ۱: نمای کلی از یک کندانسور هوا خنک [۱۲].



شکل ۲: قسمتی از داکت بخار ۶ کندانسور هوا خنک ایستگاه برق ۶ × ۶۶۵ مگاواتی Eskom Medupi در آفریقای جنوبی [۱۲].

مهم‌ترین پارامتر در طراحی و ساخت داکت بخار، فشار کمانش بحرانی است و یکی از مناسب‌ترین روش‌های افزایش مقاومت کمانشی آن‌ها بدون افزایش قابل توجهی در وزن سازه، استفاده از تقویت‌کننده مناسب است. معمولاً برای تقویت پوسته‌های استوانه‌ای تحت نیروهای محوری از تقویت‌کننده طولی و پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار جانبی از تقویت‌کننده محیطی یا رینگ تقویت استفاده می‌شود [۱۳].

۳ تحلیل و بهینه‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود انسیس

بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود انسیس یک فرآیند تکرارشونده است که به کاربر در اصلاح طرح‌ها کمک می‌کند. در نرم‌افزار اجزای محدود انسیس پس از مدل‌سازی و تحلیل اولیه، بایستی هر یک از پارامترهایی که به‌عنوان متغیرهای طراحی و حالت مدنظر است، به‌صورت جداگانه تعریف شود. تعریف این متغیرها در محیط APDL انسیس توسط ماکرونویسی و در

انصاری و همکاران، به‌منظور طراحی بهینه مخازن مخروطی شکل فولادی تقویت‌شده که با مایع پر شده بودند، از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل ضخامت صفحات، هندسه مخزن، ابعاد و تعداد تقویت‌کننده بود [۹]. فرویز^۹، به بهینه‌سازی یک پوسته استوانه‌ای تحت فشار خارجی به همراه رینگ‌های تقویت داخلی، پرداخت. در این تحقیق بهینه‌سازی بار کمانشی بحرانی به‌عنوان تابع هدف و حجم مواد و شیب مسیر پس از کمانش به‌عنوان قید طراحی و مقادیر ثابت در نظر گرفته شده‌اند [۱۰].

۲ کندانسورهای بخار هوا خنک

نیروگاه سیکل ترکیبی کهنوج با اهداف تأمین بخشی از نیازهای برق کشور، تثبیت ولتاژ، تقویت شبکه توزیع و انتقال، دارای ظرفیت ۹۶۸ مگاوات، است. نیروگاه دارای ۲ فاز اجرایی و در هر فاز یک بلوک سیکل ترکیبی است که ظرفیت هر فاز ۴۸۴ مگاوات برای یک بلوک سیکل ترکیبی است. این نیروگاه شامل ۲ واحد توربین گازی به ظرفیت ۳۲۴ مگاوات و یک واحد بخار به ظرفیت ۱۶۰ مگاوات در هر بلوک است. در این نیروگاه از کندانسورهای هوا خنک بجای برج خنک کننده استفاده شده است. کندانسورهای هوا خنک، قسمتی از واحدهای تهویه هوا هستند که گاهی با نام کندانسورهای لوله و پره^{۱۰} شناخته می‌شوند. کاربرد اصلی آن‌ها در توربین‌های بخار مورد استفاده در نیروگاه‌های تولید انرژی، نیروگاه‌های تولید برق، ایستگاه‌های فرآیند صنعتی و تأسیسات تجاری است. استفاده از کندانسورهای بخار هوا خنک^{۱۱} از سال ۱۹۳۰ مورد توجه کشورهای پیشرفته قرار گرفت [۱۱].

همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، در این کندانسورها از گردش هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده برای خنک کردن سیال داغ استفاده می‌شود. به این علت که هوا ظرفیت حرارتی بسیار کمتری نسبت به آب دارد، نمی‌توان هوا را مانند آب از داخل لوله‌ها عبور داد تا عمل خنک کردن صورت گیرد، در نتیجه در این روش بخار فوق اشباع پس از خروج از توربین، از داخل یک سری لوله پره‌دار عبور داده می‌شود و با عبور جریان هوا از روی لوله‌ها، خنک‌سازی صورت می‌گیرد. از آنجایی که در این سیستم‌ها از هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود، برخلاف سیستم‌های خنک‌کننده آبی، احتیاجی به دسترسی به منابع آبی نیست، در نتیجه در مناطقی که با کمبود منابع آبی روبرو هستند و یا هزینه مصرف آب بالاست، استفاده از کندانسورهای هوا خنک مقرون به‌صرفه‌ترین روش است [۱۱].

مجموعه لوله‌هایی که بخار از داخل آن‌ها عبور داده شده و درون یک ساپورت فلزی قرار دارند، داکت بخار نامیده می‌شود که مانیفولد ورود بخار کندانسور را به فلنج خروجی توربین متصل می‌نماید و بخار خروجی از توربین به داخل این مجموعه که شامل اتصالات، نقاط لنگر، زانویی‌ها، پره‌های تبدیل و تکیه‌گاه‌های داکت است، هدایت شده و هوا توسط فن‌ها نیز بر روی آن‌ها دمیده می‌شود. با عبور هوا عملیات خنک‌سازی انجام و در نتیجه بخار متراکم و به مایع تبدیل می‌شود سپس، این میعانات جمع‌آوری شده و به سیکل تولید بخار فرستاده می‌شود [۱۱]. در شکل ۲ قسمتی از داکت بخار ۶ کندانسور

⁹Froys ¹⁰Fin and Tube ¹¹Air Cooled Steam Condenser

محیط Workbench با تعریف اولیه و تعریف پارامتر انجام می‌شود. محیط Workbench دارای قابلیت‌های گرافیکی و کاربردی بسیار خوبی در محیط بهینه‌سازی است و همین امر سبب استفاده گسترده کاربران از این محیط شده است. پس از طراحی و تحلیل اولیه یک سیستم لازم است تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف طراحی بر نتایج، بررسی شده و مقادیر بهینه پارامترها تعیین گردند. طبیعتاً روش سعی و خطا برای بررسی تأثیر پارامترها به‌صرفه نبوده و در مدل‌های پیچیده مانند داکت بخار با پارامترهای متعدد، قابل انجام نخواهد بود. محیط Ansys Design Xplorer شامل دو روش بهینه‌سازی مستقیم^{۱۲} و بهینه‌سازی رویه پاسخ^{۱۳} جهت دستیابی به طرح بهینه است. در روش بهینه‌سازی مستقیم یک سیستم تک جزئی با بهره‌گیری از حل‌های واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد و همین امر استفاده از این روش بهینه‌سازی را کمتر کرده است. این در حالی است که روش رویه پاسخ با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مناسب، اطلاعات خود را از اجزا سطوح پاسخ دریافت نموده و با استفاده از معادلات و الگوریتم‌های سطوح پاسخ بهترین جواب ممکن را ارائه می‌دهد [۱۴، ۱۵].

$$I > I_s \quad (1)$$

$$I_s = \frac{1}{14} \left[D_o^4 L_s \left(t + \frac{A_s}{L_s} \right) A \right] \quad (2)$$

$$B = 0.75 \left(\frac{PD_o}{t + \frac{A_s}{L_s}} \right) \quad (3)$$

$$A = \frac{2B}{E} \quad (4)$$

۲.۱.۳ تحلیل تنش و خواص مواد

در پوسته‌های تحت فشار ممکن است شکل‌های مختلف تخریب از قبیل کمناش و شکست ترد رخ دهد. شکل‌های تخریبی که در کد ذکر شده‌اند عبارت‌اند از:

- تغییر شکل زیاد پلاستیک یا از هم پاشیدن
 - ناپایداری پلاستیکی یا متلاشی شدن تدریجی ناشی از تکرار بارگذاری در محدوده پلاستیک
 - خستگی همراه با تناوب کم و کرنش بالا
- هرکدام از این شکل‌های تخریب می‌تواند ناشی از نوع خاصی از تنش و بارگذاری باشد، لذا لازم است تنش‌های موجود به گروه‌های مختلف سه‌گانه تقسیم شده و حد مجاز هرکدام معین شود. کد ASME انواع تنش‌ها و شکل‌های تخریب ناشی از هرکدام را به دسته‌های زیر تقسیم می‌کند:

- تنش اولیه^{۱۷}: تغییر شکل پلاستیک و از هم پاشیدن
 - تنش ثانویه^{۱۸}: عدم تعادل پلاستیک منجر به متلاشی شدن تدریجی
 - تنش پیک^{۱۹}: بیشترین مقدار تنش [۱۷].
- در جدول ۲ بیشینه تنش‌های مجاز محاسبه‌شده جهت طراحی داکت بخار مطابق استاندارد ASME نشان داده شده است.
- جدول ۲:** بیشینه تنش‌های محاسبه شده مجاز جهت طراحی داکت بخار مطابق استاندارد ASME [۱۷].

تنش	مقادیر طراحی شده (MPa)
بیشینه تنش‌های اولیه	$P_m < 114/5$
	$P_b < 343$
	$P_l < 172$
بیشینه تنش‌های ثانویه	$P_b + P_m + Q < 343$
	$P_b < 343$
	$P_l < 206$

در جدول ۳ مشخصات هندسی محاسبه شده داکت بخار بر اساس استاندارد طراحی داکت بخار ASTM نشان داده شده است.

محیط Workbench با تعریف اولیه و تعریف پارامتر انجام می‌شود. محیط Workbench دارای قابلیت‌های گرافیکی و کاربردی بسیار خوبی در محیط بهینه‌سازی است و همین امر سبب استفاده گسترده کاربران از این محیط شده است. پس از طراحی و تحلیل اولیه یک سیستم لازم است تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف طراحی بر نتایج، بررسی شده و مقادیر بهینه پارامترها تعیین گردند. طبیعتاً روش سعی و خطا برای بررسی تأثیر پارامترها به‌صرفه نبوده و در مدل‌های پیچیده مانند داکت بخار با پارامترهای متعدد، قابل انجام نخواهد بود. محیط Ansys Design Xplorer شامل دو روش بهینه‌سازی مستقیم^{۱۲} و بهینه‌سازی رویه پاسخ^{۱۳} جهت دستیابی به طرح بهینه است. در روش بهینه‌سازی مستقیم یک سیستم تک جزئی با بهره‌گیری از حل‌های واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد و همین امر استفاده از این روش بهینه‌سازی را کمتر کرده است. این در حالی است که روش رویه پاسخ با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مناسب، اطلاعات خود را از اجزا سطوح پاسخ دریافت نموده و با استفاده از معادلات و الگوریتم‌های سطوح پاسخ بهترین جواب ممکن را ارائه می‌دهد [۱۴، ۱۵].

۱.۳ بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت بخار کندانسور هوا خنک نیروگاه کهنوج بر اساس وزن

در مرحله اول فقط استانداردها برای طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج طراحی مرحله اول باید در مرحله دوم مورد تحلیل تنش قرار گیرد. ابعاد و اندازه‌های به دست آمده برای بارهای دیگری که به مخزن اعمال می‌شوند، نیز مورد بررسی قرار گیرند. در مرحله سوم با توجه به عمر مخزن و مدت زمان کاری آن، پارامترهای طراحی مورد بازبینی و بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. در جدول ۱ استانداردهای مورد نیاز جهت طراحی قسمت‌های مختلف یک کندانسور هوا خنک نشان داده شده است.

جدول ۱: استانداردهای مورد نیاز جهت طراحی قسمت‌های مختلف یک کندانسور هوا خنک

بخش	استاندارد طراحی
داکت بخار	ASME Boiler and Pressure Vessel
سازه‌های فولادی و ملزومات طراحی سکوها	۱۵ ACI 318، ۱۴ AISC
ملزومات طراحی بتن	۱۶ UBC

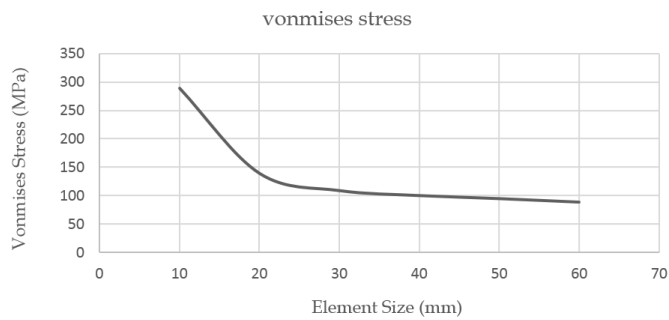
کلیه قسمت‌های داکت بخار کندانسور هوا خنک باید الزامات طراحی کد Vessel Pressure and Boiler ASME را ارضا نموده و بر اساس این کد طراحی شده باشند.

۱.۱.۳ رینگ‌های تقویتی برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار خارجی

در بعضی مواقع به دلیل نازک بودن پوسته و یا مباحث مربوط به کمناش در کل یا قسمتی از پوسته، لازم است استحکام مخزن بالا برده شود که آسان‌ترین راه، افزایش ضخامت پوسته است. این افزایش در ضخامت موجب افزایش وزن و ماده مورد استفاده جهت ساختن آن می‌شود که به لحاظ اقتصادی

¹²Direct Optimization ¹³Response Surface Optimization ¹⁴American Institute of Steel Construction ¹⁵American Concrete Institute ¹⁶Uniform Building Code ¹⁷Primary Stress ¹⁸Secondary Stress ¹⁹Peak Stress

تقلیل داد تا نتایج از دقت کافی برخوردار باشند. از طرف دیگر به علت بزرگ بودن مدل، با کوچکتر شدن اندازه المان‌ها و متعاقباً افزایش تعداد المان‌ها، مدت زمان تحلیل به شدت افزایش می‌یابد؛ لذا قبل از شبکه‌بندی مدل اصلی، داکت بخار با شش اندازه مختلف از المان شبکه‌بندی و مقدار تنش ماکزیمم به ازای هر کدام از تعداد المان‌ها بررسی گردید. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، پس از تحلیل مدل با این المان‌ها مقدار تنش با کاهش اندازه المان‌ها کاهش می‌یابد، اما با کاهش اندازه المان از مرز ۴۰ میلی‌متری تقریباً مقدار تنش ثابت بوده و تغییر چشمگیری در مقدار تنش دیده نمی‌شود.

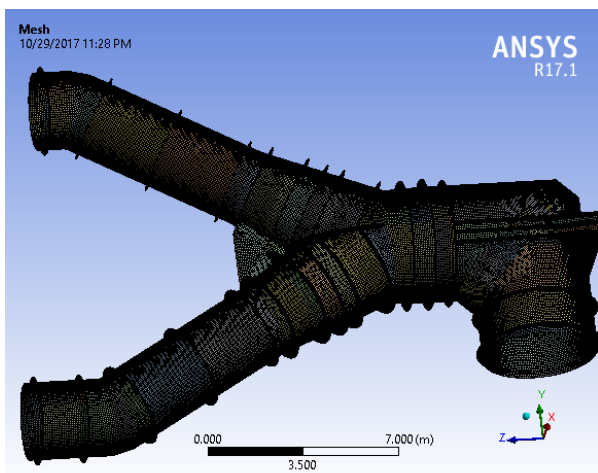


شکل ۴: مقادیر تنش فون میز به ازای ابعاد مختلف المان‌ها به منظور تحلیل حساسیت مش

جدول ۵ مشخصات شبکه‌بندی مدل تحلیل اجزاء محدود داکت بخار را نشان می‌دهد. شکل ۵ شبکه‌بندی داکت بخار را در نرم‌افزار انسیس نشان می‌دهد. داکت بخار نشان داده شده است.

جدول ۵: مشخصات شبکه‌بندی مدل اجزاء محدود داکت بخار

ویژگی‌ها	مشخصات المان
Shell	تعداد المان داکت بخار
۱۰۴۵۷۲	تعداد گره مدل اجزاء محدود داکت بخار
۱۱۹۷۵۱	



شکل ۵: شبکه‌بندی داکت بخار در نرم‌افزار انسیس

۱.۲.۳ صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود

به منظور حصول اطمینان از صحت مدل‌سازی و عملکرد نرم‌افزار اجزاء محدود و نتایج تحلیل داکت بخار با نتایج شرکت مهندسی مشاور مونتکو، مقایسه گردید. نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۳: ضخامت‌های محاسبه‌شده جهت طراحی داکت بخار به همراه رینگ‌های آن [۱۷].

ضخامت رینگ‌های متصل به پوسته (mm)	ضخامت واقعی دیواره داکت (mm)	حداقل ضخامت مورد نیاز (mm)	قطر داخلی (mm)
۲۰	۱۶	۷/۸	۵۵۰۰
۲۰	۱۶۴	۷/۴	۴۲۰۰
۲۰	۱۶	۷/۲	۳۸۰۰
۱۶	۱۲	۶/۹	۲۸۰۰
۱۶	۱۲	۶/۸	۲۴۰۰
۱۶	۱۲	۶/۶	۱۸۰۰

خواص فولاد کم‌کربن SA-36 برای داکت بخار در نرم‌افزار اجزاء محدود تعریف شده است. جزئیات مشخصات مواد در جدول ۴ نشان داده شده است [۱۳].

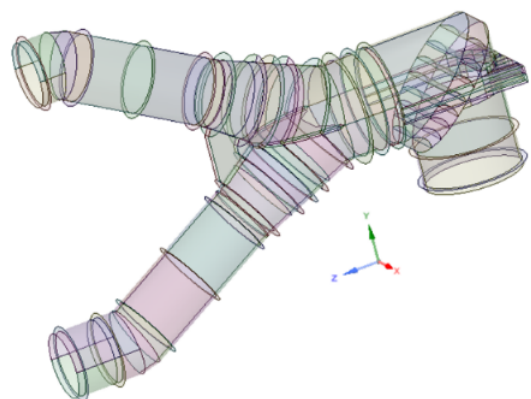
جدول ۴: خواص مکانیکی فولاد کم‌کربن SA-36 [۱۳].

مقادیر (MPa)	ویژگی‌ها
۱۹۶/۹	مدول الاستیسیته
۰/۳	ضریب پواسون
۲۴/۵	تنش تسلیم
۳۹۹/۹	تنش نهایی
۱۱۴/۵	بیشترین تنش مجاز ماده

۲.۳ الزامات هندسی و مدل‌سازی در نرم‌افزار سالدورک و انسیس

با توجه به استانداردهای مرتبط و الزامات دیگر اجزای کندانسورهای هوا خنک، ابعاد اولیه داکت بخار شامل ارتفاع، قطر و ضخامت پوسته و همچنین ابعاد اولیه رینگ‌های تقویت شامل ضخامت، عرض (عمق) و فاصله از یکدیگر، به عنوان قیدهای هندسی به داکت بخار اعمال می‌شوند.

با رعایت قیدهای هندسی ذکرشده مدل هندسی داکت بخار توسط نرم‌افزار سالدورک تهیه و در شکل ۳ نشان داده شده است که شامل ۳۹۳ قطعه است.



شکل ۳: مدل اولیه داکت بخار در نرم‌افزار سالدورک

جهت شبیه‌سازی، مدل تهیه‌شده در نرم‌افزار سالدورک به صورت فایل IGES وارد نرم‌افزار انسیس شده و شبکه‌بندی می‌شود.

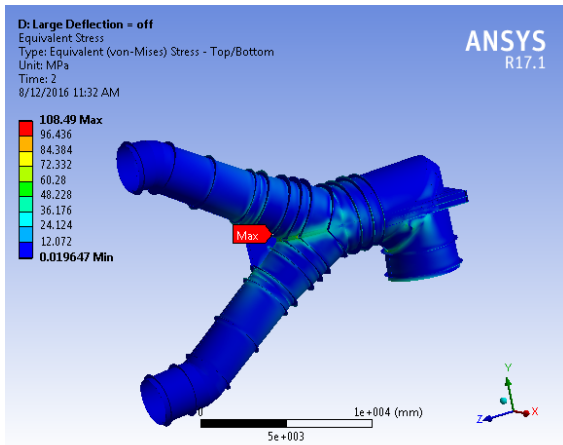
در تحلیل اجزاء محدود، اندازه المان‌ها در زمان تحلیل و نتایج آن از تأثیر به‌سزایی برخوردار هستند؛ بنابراین باید تا حد امکان اندازه المان‌ها را

جدول ۶: مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود و نتایج شرکت مونکو

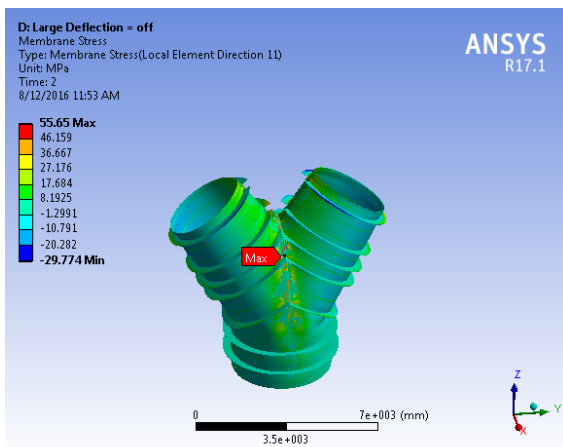
صحت‌سنجی	تنش فون میزز (MPa)	تنش غشایی بیشینه (MPa)	تنش خمشی بیشینه (MPa)
شرکت مونکو	۱۱۱/۸۰	۵۸/۱۰	۶۰/۳۹
اجزاء محدود (مقاله حاضر)	۱۰۸/۴۹	۵۵/۶۵	۶۰/۳۰
خطا (درصد)	۲/۹۰	۴/۲۱	۰/۱۴

۳.۳ متغیرهای طراحی برای مسئله بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت بخار

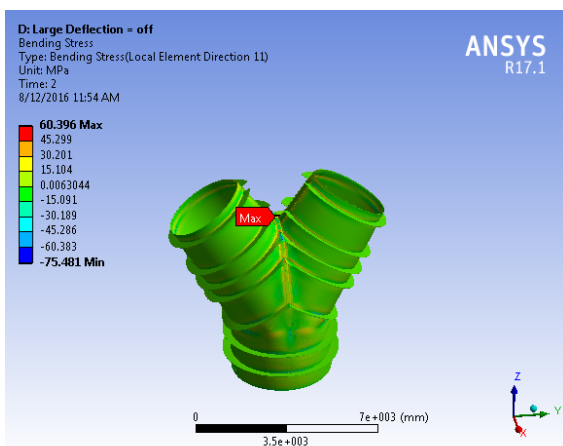
به منظور پایه‌ریزی مسئله بهینه‌سازی و با توجه به مدل اجزاء محدود، باید متغیرهای طراحی متناسب در جهت تابع هدف مسئله تعیین شوند. شرایط بارگذاری به صورت اعمال بارها به سطح اتصال وای اسپلیتر با داکت بخار افقی است و تمام درجات آزادی مطابق شکل ۶ در جهت Z در سطح متصل به فلنج ورودی به عنوان مرزی مقید شده است. نخست با در نظر گرفتن تغییر شکل و تحلیل تنش مدل اولیه داکت که در شکل ۷ تا ۱۰ مشخص شده است، ناحیه بحرانی فضای حل بهینه‌سازی با در نظر داشتن قیدهای هندسی داکت و نتایج تحلیل تنش مشخص می‌شود. با توجه به نتیجه تحلیل تنش، قیدهای هندسی در محل اتصال وای-اسپلیتر به رینگ‌های تقویت‌کننده اعمال شده و بدنه اصلی داکت در معرض تغییر قرار گرفته و وارد روند بهینه‌سازی می‌شود. این نواحی که مناطق بحرانی داکت بخار هستند، ناحیه بحرانی بهینه‌سازی بدنه داکت بخار هستند.



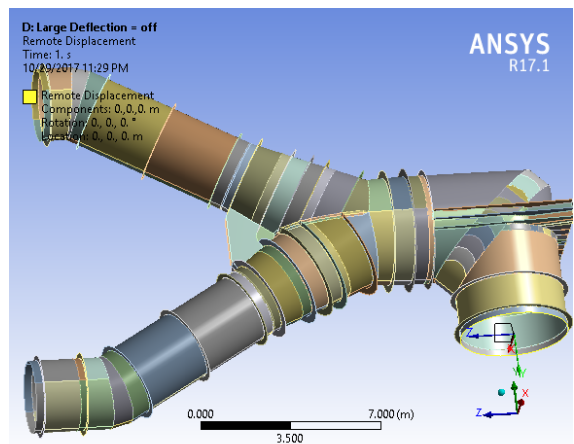
شکل ۸: تحلیل تنش فون میزز اولیه داکت بخار



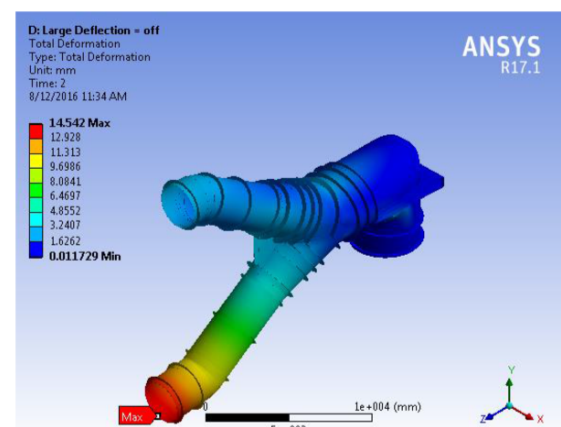
شکل ۹: تحلیل تنش غشایی اولیه داکت بخار



شکل ۱۰: تحلیل تنش خمشی اولیه داکت بخار



شکل ۶: شرایط مرزی داکت بخار در نرم‌افزار انسیس



شکل ۷: تغییر شکل اولیه داکت بخار

با توجه به اینکه تابع هدف مسئله، کمینه کردن وزن کل سازه است، تغییر ضخامت و عرض رینگ‌های تقویت ناحیه بحرانی به عنوان متغیر طراحی تعیین می‌شود. در حقیقت مدل با به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی مناسب، مدیریت خود را روی مدل اجزاء محدود با تغییر ضخامت و عرض رینگ‌های تقویت خاص، به عنوان متغیرهای طراحی مسئله بهینه‌سازی اعمال می‌کند. با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته برای ضخامت و عرض‌های متفاوت، ابعاد

بررسی نتایج حاصل از تحلیل تنش اولیه داکت فاکتورهای تنش‌های محوری، تنش‌های برشی، کرنش‌های محوری، کرنش‌های برشی و تغییرمکان نسبت به فاکتورهای تنش‌های فون‌میزز، غشایی و خمشی بحرانی نبوده و بنابراین مقادیر تنش‌های فون‌میزز، غشایی و خمشی به‌عنوان معیار تابع قید برای این مسئله تعیین شده است. بیشینه تنش فون‌میزز برای تابع قید، مقدار تنش مجاز فولاد SA-36 که برابر با $114/5 \text{ MPa}$ است، در نظر گرفته می‌شود.

۵.۳ ملاحظات مکانیکی مسئله

با توجه به مسئله داکت بخار و نقش بسیار با اهمیت تعیین درست و متناسب تابع قید در پیشبرد حل مسئله، علاوه بر تابع هدف و تابع قید، در این مسئله موارد خاص دیگری نیز باید بررسی گردد. در همین راستا برای رسیدن به نتایجی دقیق‌تر و در زمانی کمتر، لازم است ملاحظات مکانیکی دیگری نیز در این مسئله نقش داشته باشد؛ بنابراین سه تابع جداگانه به‌منظور تأثیر نهادن روی امتیاز هر طرح تعریف می‌شود. اولین تابع، مقدار تجاوز تنش بیشینه فون‌میزز از مقدار نصف تنش تسلیم $114/5 \text{ MPa}$ و تابع دوم، مقدار تجاوز تنش بیشینه غشایی از مقدار 172 MPa و تابع سوم، مقدار تجاوز تنش بیشینه خمشی از مقدار 343 MPa را به‌عنوان معیار خود انتخاب می‌کنند. این سه تابع مانند تابع جریمه، رفتار جریمه‌ای را روی جواب‌های نامناسب اعمال می‌کنند. بدین صورت که هر چه مقدار تنش‌های یک طرح از مقدار نصف تنش تسلیم فاصله بگیرد، توسط این دو تابع، بیشتر جریمه شده و امتیاز منفی بیشتری می‌گیرد. این شیوه در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی برای تطبیق هرچه بیشتر تابع هدف با شرایط و محدودیت‌های مسئله به کار گرفته می‌شود.

۴ نتایج

فرآیند بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی مناسب، با شروع از مدل اولیه اجزا محدود داکت بخار، انجام پذیرفت و با معرفی مدل بهینه پایان یافت. داده‌های آماری مربوط به اجرای فرآیند بهینه‌سازی در جدول ۸ بیان شده است.

جدول ۸: مشخصات اجرای فرآیند بهینه‌سازی برای مسئله

تعداد حل در نرم‌افزار انسیس	۶۹ بار
کل زمان فرآیند بهینه‌سازی	۱۱۳/۳ ساعت
مشخصات سیستم	Intel CPU core i5 2.53 Hz, 16 Gigabyte RAM

نتایج حاصل از بهینه‌سازی داکت در جدول ۹ با مدل ورودی مقایسه شده است.

جدول ۹: نتایج حاصل از بهینه‌سازی داکت بخار

نتایج	مقادیر (kg)
جرم اولیه داکت بخار	۵۴۳۹۶
جرم مدل بهینه داکت بخار	۵۲۰۲۳
مقدار کاهش جرم	۵٪
بیشینه تنش فون‌میزز در مدل بهینه (MPa)	۱۱۳/۵۳

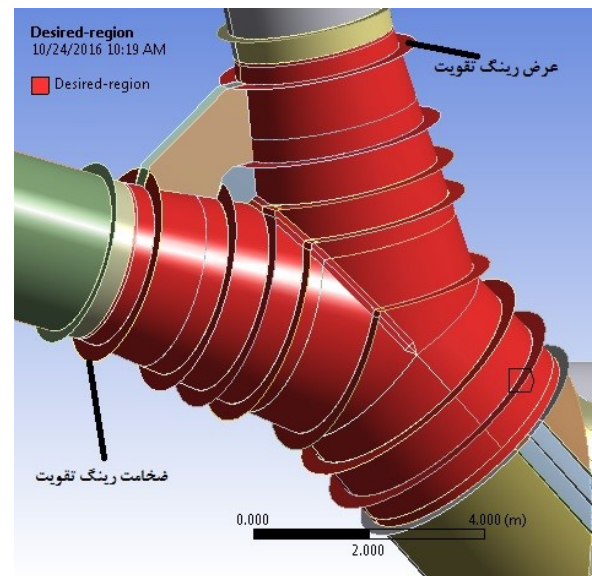
در شکل ۱۲ نیز روند همگرایی الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم مناسب بهینه‌سازی، بعد از ۴۹ تکرار (تکرار نسلی) نشان داده شده است. در روند

هندسی داکت و ملزومات ساخت و تولید، بازه تغییر ضخامت و عرض بر اساس جدول ۷ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۷: بازه تغییر ضخامت و عرض استاندارد ورق‌های ساخت داکت بخار

نوع هندسه ورق	ابعاد استاندارد (mm)
بازه ضخامت‌های استاندارد ورق	۱۲، ۱۰، ۸، ۶، ۵، ۴، ۲، ۱ ۲۲، ۲۰، ۱۸، ۱۶، ۱۵، ۱۴
بازه عرض رینگ‌های تقویت (اختلاف شعاع خارجی و داخلی رینگ تقویت)	۳۰۰، ۲۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ ۵۵۰، ۵۰۰، ۴۵۰، ۴۰۰، ۳۵۰ ۶۰۰

در شکل ۱۱ ناحیه مدنظر جهت بهینه‌سازی عرض و ضخامت رینگ‌های تقویت وای اسپلیتر^{۲۰} داکت بخار کندانسور هوا خنک نشان داده شده است.



شکل ۱۱: ناحیه طراحی بهینه عرض و ضخامت رینگ‌های تقویت وای اسپلیتر

۴.۳ توابع بهینه‌سازی

۱.۴.۳ تابع هدف

بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت بخار کندانسور هوا خنک نیروگاه کهنوج بر اساس وزن، هدف این پژوهش است. مقادیر جرم در تابع هدف به واسطه چگالی پوسته موردنظر در محیط Workbench نرم‌افزار اجزاء محدود ارزیابی می‌شود.

۲.۴.۳ تابع قید

در مسائل بهینه‌سازی مهندسی دو نوع قیدهای هندسی و رفتاری اعمال می‌گردند. در مسئله بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت بخار در بخش مدل‌سازی متغیرهای طراحی معرفی شدند؛ بنابراین در اینجا در مورد قیدهای رفتاری که باید به مسئله اعمال گردند بحث می‌شود. یکی از مهم‌ترین قیدهای رفتاری در طراحی سازه‌های مهندسی، سلامت و استحکام سازه است؛ یعنی طراحی یک سازه زمانی معنا خواهد داشت که سازه توانایی موردنظر در تحمل بارهای وارده و شرایط محیطی حاکم بر مسئله را داشته باشد. در مسئله بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت بخار کندانسور هوا خنک، با

²⁰Y-splitter

۵ نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش بهینه‌سازی مفید بر مبنای استفاده از الگوریتم ژنتیک و در سطحی کاربردی، برای بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت بخار یک کندانسور هوا خنک بر اساس وزن تشریح شد. در طی فرآیند بهینه‌سازی، نرم‌افزار اجزاء محدود انسیس به‌منظور ارائه نتایج مدل‌ها در قالب ارزیابی تابع هدف و قید، مورد استفاده قرار گرفت. روند بهینه‌سازی داکت بعد از اجرای ۴۹ نسل تکرار در الگوریتم ژنتیک انجام گرفت و مدل بهینه معرفی شد.

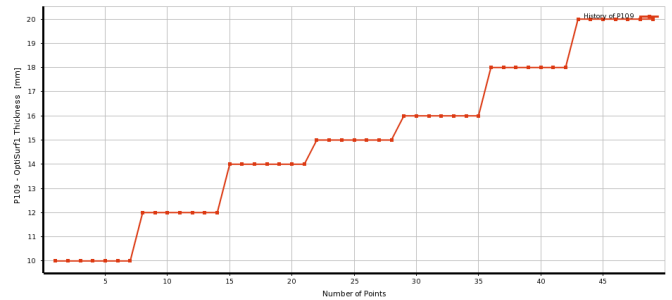
بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت بخار با کاهش ۵ درصدی جرم (وزن) نسبت به مدل ورودی به فرآیند بهینه‌سازی همراه بود. ضریب اطمینان طراحی نیز برای مدل بهینه نهایی داکت بخار در شرایط بارگذاری استاتیکی و با استفاده از معیار تنش بیشینه فون میز ۳ است.

با استناد به تحلیل المان محدود داکت بخار و نتایج شرکت مهندسی مشاور مونکو، اعتبار نتایج این روش در زمینه بهینه‌سازی قابل اعتماد بوده و به‌عنوان یک روش مفید در بهینه‌سازی سازه‌های مکانیکی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. اکثر پژوهش‌هایی که در زمینه‌های مشابه در بخش مقدمه بررسی شدند، در سطح مطالعاتی و تحقیقاتی صورت گرفته‌اند. در این پژوهش، مسئله بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت در سطحی کاربردی انجام شد و نتایج امیدوارکننده‌ای حاصل گردید؛ بنابراین از این روش در کاربردهای واقعی می‌توان بهره برد.

با توجه به موارد عنوان‌شده، در زیر به چند نکته در مورد این روش بهینه‌سازی اشاره می‌شود:

- روش مطرح شده برای بهینه‌سازی قطعات کاربردی و صنعتی، مانند رینگ‌های تقویت داکت بخار یک کندانسور هوا خنک که نیازمند به تحلیل اجزاء محدود هستند، بسیار کارا و مفید خواهد بود.
- برای رسیدن به نتایج مطلوب در زمان معقول، تعریف درست تابع هدف، قید، تعیین مناسب متغیرها و پارامترهای طراحی به‌واسطه یک راهکار عملی با امکانات نرم‌افزارهای اجزاء محدود، بسیار با اهمیت است.
- با توجه به طبیعت مبتنی بر تکرار این روش و انجام شدن تعداد زیادی تحلیل اجزاء محدود برای مدل مورد پژوهش، مهمترین محدودیت در این روش بازده زمانی است؛ بنابراین این روش برای تحلیل‌های وقت‌گیر و زمان‌بر مانند تحلیل خستگی، مناسب نیستند.
- با توجه به حذف المان‌ها در مدل اجزاء محدود به‌واسطه تخریب المان‌ها، شبیه‌سازی در کاهش بازده زمانی مؤثر بوده و کارایی این روش را در مدل‌های بزرگ محدود می‌کند.
- همان‌طور که بیان شد، تغییر در هندسه مدل به‌واسطه فعال و غیرفعال نمودن المان‌ها در مدل صورت می‌گیرد؛ بنابراین این روش در قطعاتی می‌تواند مفید واقع شود که بتوان تغییرات متغیرهای طراحی را با این قابلیت به‌درستی شبیه‌سازی نمود.

همگرایی الگوریتم ژنتیک چند هدفه MOGO در نرم‌افزار انسیس از نسل ۴۳ به بعد دیگر بهبودی در امتیاز بهترین نسل ایجاد نشده است.



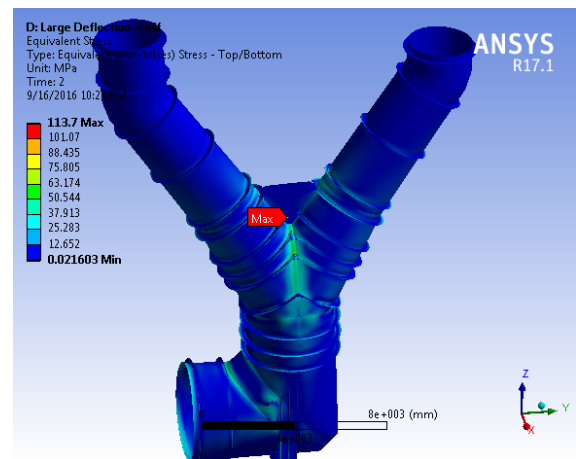
شکل ۱۲: روند همگرایی الگوریتم برای بهترین طرح در هر نسل

در جدول شماره ۱۰ مشخصات طرح‌های برتر حاصل از فرآیند بهینه‌سازی در نرم‌افزار اجزاء محدود نشان داده شده است.

جدول ۱۰: مشخصات ۵ طرح برتر در فرآیند بهینه‌سازی

طرح	ضخامت	تنش میز (MPa)	عرض (mm)	جرم (kg)
طرح ۱	۱۰	۱۱۰/۸۲	۳۰۰	۵۱۵۹۰
طرح ۲	۱۴	۱۱۳/۵۳	۲۵۰	۵۲۰۲۳
طرح ۳	۱۰	۱۰۳/۶۴	۴۰۰	۵۲۶۰۹
طرح ۴	۱۴	۱۰۸/۱۸	۳۰۰	۵۲۷۱۳
طرح ۵	۱۲	۱۰۵/۵۱	۳۵۰	۵۲۷۵۶

با توجه به میزان ۱/۵ میلی‌متری خوردگی مجاز که به عنوان حداقل مقدار در استاندارد تعیین می‌شود، طرح ۲ به عنوان طراحی برتر انتخاب می‌شود. در شکل ۱۳ مدل اجزاء محدود طراحی بهینه و کانتور تنش فون میز آن مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳: مدل بهینه نهایی داکت بخار کندانسور هوا خنک نیروگاه کهنوج

نتایج نهایی بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت در نرم‌افزار انسیس با جزئیات بیشتر در جدول ۱۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱۱: نتایج نهایی بهینه‌سازی رینگ‌های تقویت داکت

جرم (kg)	تنش میز (MPa)	تنش غشایی (MPa)	تنش خمشی (MPa)	
۵۴۳۹۶	۱۰۸/۴۹	۵۵/۶۵	۶۰/۳۹۶	مدل اولیه
۵۲۰۲۳	۱۱۳/۵	۶۹/۶۹۹	۶/۰۳۷	مدل بهینه
-۲۳۷۳	+۵/۰۱	+۱۴/۰۴۹	+۲/۶۴۱	تفاوت بین مدل‌ها

تشکر و قدردانی

از شرکت مهندسی مونکو جهت در اختیار گذاشتن نتایج داکت بخار جهت صحت سنجی با مدل اجزاء محدود ارائه شده در این پژوهش، سپاس‌گزاریم.

علائم و نشانه‌ها

D	قطر (mm)
t	ضخامت (in)
d	قطر داخلی (in)
P	فشار طراحی خارجی (psig)
t	حداقل ضخامت پوسته بدون خوردگی (in)
P	تنش اولیه (MPa)
I	ممان اینرسی رینگ تقویتی (in^4)
Q	تنش ثانویه (MPa)
F	تنش پیک (MPa)
V	حجم کل قطعه (m^3)
D_o	قطر خارجی پوسته استوانه‌ای (in)
P_o	حداکثر فشار کاری مجاز خارجی (psig)
I_s	ممان اینرسی حداقل در کد (in^4)
A_s	سطح مقطع رینگ تقویتی (in^2)
P_m	تنش غشایی اولیه عمومی، (MPa)
P_l	تنش غشایی اولیه موضعی (MPa)
P_b	تنش خمشی اولیه (MPa)

مراجع

- [9] El Ansary, AM, El Damatty, AA, and Nassef, AO. A coupled finite element genetic algorithm for optimum design of stiffened liquid-filled steel conical tanks. *Thin-Walled Structures*, 49(4):482-493, 2011.
- [10] Foryś, Paweł. Optimization of cylindrical shells stiffened by rings under external pressure including their post-buckling behaviour. *Thin-Walled Structures*, 95:231-243, 2015.
- [11] Larinoff, MW, Moles, WE, and Reichhelm, R. Design and specification of air-cooled steam condensers. *Chemical Engineering*, 110:143-156, 1978.
- [12] LLC, MultiMedia. MS Windows NT kernel description, 1999.
- [13] Skopinsky, VN and Berkov, NA. New criterion for the definition of plastic limit load in nozzle connections of pressure vessels. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 135(2):021206, 2013.
- [14] Lee, H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench*. CRC press, 2010.
- [15] Exler, Oliver, Lehmann, Thomas, and Schittkowski, Klaus. Misqp: A fortran subroutine of a trust region sqp algorithm for mixed-integer nonlinear programming-user's guide. *Report, Department of Computer Science, University of Bayreuth*, 2012.
- [16] F, Megyesy. *Pressure Vessel Handbook*. CRC press, 2001.
- [17] R, Moss. *Pressure Vessel Design Manual*. CRC press, 2004.
- [1] Rao, Singiresu S and Reddy, ES. Optimum design of stiffened cylindrical shells with natural frequency constraints. *Computers & Structures*, 12(2):211-219, 1980.
- [2] Patel, JM and Patel, TS. Minimum weight design of the stiffened cylindrical shell under pure bending. *Computers & Structures*, 11(6):559-563, 1980.
- [3] Simitises, George J and Ungbhakorn, Variddhi. Weight optimization of stiffened cylinders under axial compression. *Computers & Structures*, 5(5-6):305-314, 1975.
- [4] Bushnell, David. Global optimum design of externally pressurized isogrid stiffened cylindrical shells with added t-rings. *International journal of non-linear mechanics*, 37(4-5):801-831, 2002.
- [5] Alinia, MM. A study into optimization of stiffeners in plates subjected to shear loading. *Thin-walled structures*, 43(5):845-860, 2005.
- [6] Jarmai, K, Snyman, JA, and Farkas, J. Minimum cost design of a welded orthogonally stiffened cylindrical shell. *Computers & structures*, 84(12):787-797, 2006.
- [7] Sadeghifar, M, Bagheri, M, and Jafari, AA. Multiobjective optimization of orthogonally stiffened cylindrical shells for minimum weight and maximum axial buckling load. *Thin-Walled Structures*, 48(12):979-988, 2010.
- [8] Bagheri, M, Jafari, AA, and Sadeghifar, M. Multi-objective optimization of ring stiffened cylindrical shells using a genetic algorithm. *Journal of Sound and vibration*, 330(3):374-384, 2011.