



طراحی و ساخت مخزن تحت فشار سه لایه با استفاده از فرایند شرینگ فیت

امیر ناصرالاسلامی^۱، هادی عیوضی باقری^۱، سید محمد وهاب موسوی^۲، سید سلمان سیدافغهی^{۳*}

۱- پژوهشگر، مرکز مواد پیشرفته و نانوفناوری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

*تهران، صندوق پستی: ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱، kpsafghahi@ihu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۳ تیر ۱۴۰۲

داوری اولیه: ۹ مرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۴ مرداد ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

شرینگ فیت

پرس ایزو استاتیک داغ

روش المان محدود

تنش پسماند

چکیده

یکی از روش‌های افزایش مقاومت در برابر شکست و افزایش عمر خستگی در مخازن تحت فشار جدار ضخیم، ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح آن است. یکی از این روش‌ها، فرایند شرینگ فیت و یا انطباق تداخلی است. در این مقاله عملیات شرینگ فیت برای ساخت مخزن سه لایه‌ی کوره‌ی پرس ایزواستاتیک داغ با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود و روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. تنش‌های به وجود آمده در اثر فرایند شرینگ فیت در مخازن با استفاده از محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازی المان محدود بررسی شد. برای انجام شرینگ فیت به صورت تجربی، سه عدد مخزن از جنس فولاد VCN150 ساخته شد و عملیات شرینگ فیت با موفقیت انجام گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، بیشترین جابجایی شعاعی برای مخزن بیرونی ۰/۸۹ میلی‌متر و مقدار تنش پسماند به وجود آمده ۳۹/۹ مگاپاسکال است. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و محاسبات تحلیلی برای مخزن میانی و مخزن بیرونی نشان می‌دهد مقدار اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و حل تحلیلی برای مخزن میانی و بیرونی‌ترین مخزن به ترتیب ۲/۳٪ و ۲/۸٪ است.

Design and manufacturing of three layer pressure vessel by Shrink fit process

Amir Naseroleslami¹, Hadi Eivazi Bagheri¹, Seyyed Mohammad Vahab Mousavi², Seyyed Salman Seyyed Afghahi^{3*}

1- Advanced Materials and Nanotechnology Research Center, Imam Hossein University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

3- Department of Material science, Imam Hossein University, Tehran, Iran

*P.O.B. 1698715461 Tehran, Iran, kpsafghahi@ihu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 24 June 2023

First Decision: 31 July 2023

Accepted: 15 August 2023

Keywords:

Shrink Fit

Hot Isostatic Press

Finite Element Method

Residual Stress

Abstract

Induction of compressive residual stress on the surface thick-walled cylinder is a way to increase the resistance to failure and increase the fatigue life. The shrink-fit process is one of these methods. In this paper, the three-layer shrink fit for the construction of the hot isostatic press cylinders has been analyzed using experiments, analytical modeling, and finite element simulation. The stresses created due to the shrink fit process in cylinders were investigated using analytical calculation and finite element simulation. To perform the shrink fit experimentally, three cylinders were made of VCN steel and the shrink fit operation was performed. Based on the results from the finite element simulation, the maximum radial displacement for the outer cylinder is 0.89 mm and the residual stress value is 39.9 MPa. Also, the comparison of simulation results and analytical method for the middle and outer cylinder shows that the differences were 2.3% and 2.8%, respectively.

۱- مقدمه

ماده اولیه و کارپذیری آن را افزایش می‌دهد؛ همچنین یکی از فرایندهای به کاررفته در متالورژی پودر است. این فرایند تحت فشار و دمای بالا انجام می‌گیرد. معمولاً فشار درون مخزن در بازه ۱۰۰ تا ۳۰۰ مگاپاسکال بوده و دمای آن بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود. پروسه ساخت و مونتاژ مخازن این نوع کوره، جزء گلوگاه‌های اصلی ساخت آن است و

پرس ایزواستاتیک گرم یک فرایند ساخت است که در آن ذرات پودر فلزات، آلیاژها و سرامیک‌ها تحت فشار ایزواستاتیک و حرارت بالا به همدیگر می‌چسبند و یک جز واحد را تشکیل می‌دهند. این روش برای کاهش تخلخل فلزات و افزایش چگالی بسیاری از سرامیک‌ها به کار می‌رود. این فرایند خواص مکانیکی

پلاستیک ماده نیز برود. مجذوبی و همکاران [۷] بهینه‌سازی وزن یک مخزن دولایه تحت یک فشار خاص را به روش المان محدود و تجربی انجام دادند. بر اساس نتایج تحقیق آن‌ها، وزن مخازن دولایه تا ۶۰٪ در مقایسه با مخزن تک لایه متناظر کاهش می‌یابد. در یک تحقیق دیگر کلالی و همکاران [۸،۹] تأثیر فرایند شرینگ فیت را در مخزن دولایه مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق آن‌ها، با این روش ظرفیت مخازن افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها عملکرد مخازن تحت فشار و تعیین شعاع‌های بهینه سیلندرهای چندلایه به روش تحلیلی را مورد بررسی قرار دادند. نارکی و همکاران [۱۰] با استفاده از ترکیب روش‌های تئوری و عددی به بررسی مخازن تحت فشار جدار ضخیم کامپوزیتی چندلایه هیبریدی که تحت تأثیر هر دو عامل فشار و دمای سیکلی قرار دارند، پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از روش‌های تئوری، معادلات تنش‌ها و کرنش‌ها را استخراج نموده، سپس تغییرات دما در جداره مخزن را به روش تفاضل محدود محاسبه کرده‌اند. در تحقیقی دیگر مجردی و همکاران [۱۱] رفتار مخزن تحت فشار استوانه‌ای و کروی از جنس فولاد با روش المان محدود توسط نرم‌افزار ANSYS بررسی نمودند. بررسی نتایج نشان می‌دهد ناحیه مجاور فیلت که دیواره ستون عمودی مخزن به سر آن متصل می‌شود، یک ناحیه بحرانی است. در پژوهشی دیگر عارفی و همکاران [۱۲] تحلیل ترموالاستیک استوانه‌ای جدار ضخیم با خواص وابسته به دما را بررسی نمودند. در تحقیق آن‌ها، شرایط بارگذاری به‌صورت فشار هیدرو استاتیک داخلی و گرادیان دما در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن تقریب‌های مرتبه صفر، اول و دوم (توزیع دمای نهایی) مشاهده می‌شود منحنی‌ها به سمت همگرایی پیش می‌روند. عبدالسلام [۱۳] بهینه‌سازی فرایند شرینگ فیت سه‌لایه را مورد بررسی قرار داد. برای این منظور از روش المان محدود برای محاسبه تنش پسماند هوپ و تنش معادل فون میسز استفاده شده است. ایزارد و همکاران [۱۴] مطالعه‌ی کاهش تمرکز تنش ناشی از شرینگ فیت شفت و توپی را با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان می‌دهد با قرارگیری یک رینگ بین شفت و توپی (با ضخامت یک‌چهارم توپی) مقدار تمرکز تنش در لبه‌های توپی تا ۴۰٪ کاهش می‌یابد.

اورید و همکاران [۱۵] تحلیل تنش در عملیات شرینگ فیت مخازن سه‌لایه را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج تحقیق آن‌ها، تنش هوپ با افزایش لایه‌ها کاهش می‌یابد به‌طوری‌که مقدار آن برای لایه اول ۲۴۷/۹ مگاپاسکال، مخزن دولایه ۲۳۱/۲

بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از جمله روش‌های مؤثر برای بالا بردن ظرفیت تحمل فشار، روش اتوفرتاژ و روش چندلایه نمودن مخازن است. مخزن چندلایه از تداخل دو یا چند سیلندر که توسط فرایند شرینگ فیت در داخل هم جازده می‌شوند، تشکیل می‌گردد. این انطباق پرسی باعث ایجاد تنش پسماند در سطح سیلندر (مخزن) می‌گردد.

فرایند شرینگ فیت یک روش اتصال کم‌هزینه است که از گرما برای ایجاد یک اتصال بسیار قوی بین دو جزء فلزی استفاده می‌شود. تداخل معمولاً با گرم کردن یکی از اجزا و درعین حال خنک نگه‌داشتن جزء دیگر برای مونتاژ آسان ایجاد می‌شود. گرما باعث انبساط قسمت فلزی می‌شود؛ بنابراین، قسمت دیگر را می‌توان به راحتی در قسمت منبسط‌شده جا داد. با سرد شدن، قسمت منبسط‌شده به اندازه اصلی خود برگشته و نیروهای اصطکاکی، یک اتصال بسیار مؤثر ایجاد می‌کنند [۱].

امروزه انطباق تداخلی به دلیل کارایی بالا و فرایند ساخت ساده، به‌طور گسترده در کاربردهای متعدد در زمینه مهندسی مکانیک استفاده می‌شود. در رابطه با موضوع افزایش ظرفیت تحمل فشار مخازن می‌توان پژوهش‌های جدیدی و همکاران [۲] را نام برد. آن‌ها تأثیر تنش‌های پسماند فرایند اتوفرتاژ را بر عملکرد مخازن دارای ترک داخلی با ابعاد محدود و در جهات محوری و مماسی به کمک المان محدود بررسی کردند. فنک و همکاران [۳] با استفاده از روش المان محدود تأثیر دما بر عملیات اتوفرتاژ را مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج به‌دست‌آمده با انجام اتوفرتاژ در دمای پایین، تنش پسماند القایی به مخزن افزایش یافته و ظرفیت تحمل فشار مخزن بیشتر می‌گردد. همچنین جاهد و همکاران [۴] با ترکیب دو فرایند شرینگ فیت و اتوفرتاژ به کمک روش‌های عددی، پارامترهای بهینه را برای افزایش عمر خستگی محاسبه کردند. به دلیل نیاز به تجهیزات و هزینه بالای اجرای عملیات شرینگ فیت به صورت تجربی و صنعتی، بیشتر تحقیقات در مورد فرایند شرینگ فیت، معطوف به روش‌های شبیه‌سازی و تحلیلی است و کمتر به‌صورت تجربی اجرا و گزارش شده است. نتایج برخی از این تحقیقات در ادامه آورده شده است. لارنس و همکاران [۵] مقدار تنش و تغییر شکل را برای یک دیسک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فشار فرایند شرینگ فیت را به‌صورت تابعی از تداخل شعاعی در رفتار پلاستیکی کامل در شرایط کرنش صفحه‌ای تعیین نمودند. اوزل و همکاران [۶] توزیع تنش و تغییر شکل را در اتصال شفت و توپی با روش المان محدود مورد بررسی قرار داده و گزارش نمودند که مقدار تنش در تماس اولیه ممکن است تا ناحیه

که در آن a و b به ترتیب شعاع داخل سیلندر درونی و شعاع خارجی سیلندر بیرونی و c شعاع مشترک دو سیلندر است. در این رابطه مقدار $\delta = 0/035\text{mm}$ بر حسب استاندارد انطباقات (H7/p6) فرض شده و E مدول الاستیک فولاد VCN می باشد. با توجه به محاسبه فشار، توزیع تنش در سیلندرهایی داخلی و خارجی بر اساس روابط ۵ و ۶ (روابط لامه) خواهد بود [۱۸].

برای محاسبه تنش حاصل از شرینگ فیت بین مخزن ۳ و مخزن ۲ با استفاده از روابط ۴ تا ۶ در نرم افزار متلب کدنویسی انجام شد و مقدار تنشها استخراج گردید. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی فون میسر (رابطه‌ی ۷) و ساده نمودن آن با صرف نظر از تنش طولی (σ_z)، مقدار تنش معادل در هر یک از مخازن با استفاده از رابطه‌ی ۸ محاسبه شد.

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{c^2 P_{sh}}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \\ \sigma_\theta = -\frac{c^2 P_{sh}}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{c^2 P_{sh}}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) \\ \sigma_\theta = \frac{c^2 P_{sh}}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{Van Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]} \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{Van Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta)^2 + (\sigma_r)^2]} \quad (8)$$

۲-۲- شبیه سازی

برای شبیه سازی المان محدود عملیات شرینگ فیت مخازن، از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. جهت شبیه سازی تنش به وجود آمده در ناحیه‌ی تماس دو مخزن استوانه‌ای در عملیات شرینگ فیت، از حل گر استاتیکی^۱ استفاده شد. همچنین در نرم افزار آباکوس برهم کنش^۲ به کار رفته با قید شرینگ فیت است و به دلیل ضریب اصطکاک کمتر از ۰/۰۵ بین دو سطح، تماس به صورت بدون اصطکاک^۳ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این در تحلیل جابه جایی بر اثر کاهش و افزایش دما، حل گر مورد استفاده از نوع کوپل حرارت-جابجایی^۴ است. برهم کنش به کاررفته نیز از نوع تماس سطح به سطح^۵ است که با لحاظ کردن قید شرینگ فیت صورت گرفته است. همچنین مش انتخابی از نوع سویپ^۶ در نظر گرفته شده است. ضمناً برای ساده سازی و به منظور ایجاد مش در سازه، در بخش مدل سازی تنش مخزن شماره ۲، شیاری سطحی بدون زاویه مارپیچ در

مگاپاسکال و برای مخزن سه لایه ۲۲۴ مگاپاسکال است. کلاهی و همکاران [۱۶] فرایند شرینگ فیت سیلندرهایی جدار ضخیم ساخته شده از مواد تابعی (FGM) را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج گزارش شده مقدار تنش هوب به فشار شرینگ فیت وابسته بوده و در جهات مختلف مقادیر متفاوتی دارد.

با توجه به اینکه اکثر پژوهش‌های انجام شده به ویژه در داخل کشور در زمینه فرایند شرینگ فیت مخازن صرفاً به صورت تئوری است، لذا در این پژوهش عملیات شرینگ فیت مخزن سه لایه مورد استفاده در کوره ایزو استاتیک داغ به طور تجربی انجام شده است. علاوه بر این شرینگ فیت مخزن سه لایه به صورت شبیه سازی المان محدود و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این بخش روش تحقیق مورد استفاده در مقاله شامل بررسی فرایند شرینگ فیت مخازن با استفاده از روابط تحلیلی، نحوه شبیه سازی و روش انجام فرایند به صورت تجربی ارائه شده است.

۲-۱- روش تحلیلی

با توجه به اینکه فرایند شرینگ فیت به صورت تحلیلی با استفاده از روابط الاستیک بررسی می گردد، در ادامه جهت مقایسه با نتایج حاصل از شبیه سازی، مقدار تنشها در عملیات شرینگ فیت مخازن ۳ و ۲ به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت.

توزیع تنش‌های الاستیک شعاعی (σ_r) و مماسی (σ_θ) در مخازن تحت فشار داخلی (P_i) و فشار خارجی (P_o) به صورت رابطه ۱ تا ۳ می باشد [۱۷]:

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_i - b^2 P_o}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 (P_i - P_o)}{(b^2 - a^2) r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 P_i - b^2 P_o}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (P_i - P_o)}{(b^2 - a^2) r^2} \quad (2)$$

$$u = \frac{1 - \nu}{E} \frac{(a^2 P_i - b^2 P_o) r}{b^2 - a^2} + \frac{1 + \nu}{E} \frac{a^2 b^2 (P_i - P_o)}{(b^2 - a^2) r} \quad (3)$$

که a و b به ترتیب شعاع‌های داخلی و خارجی مخزن می باشند. از آنجایی که در این پژوهش فشار داخلی و خارجی در فرایند شرینگ فیت صفر است، تنش‌های شعاعی و مماسی بین مخازن از رابطه‌ی ۵ و ۶ استخراج می شود.

علاوه بر این، هنگامی که دو سیلندر با تداخل شعاعی δ درون یکدیگر جازده شوند، فشار ایجاد شده در مرز بین دو سیلندر جازده شده مطابق رابطه‌ی ۴ است:

$$P_{sh} = \frac{E \delta (c^2 - a^2)(b^2 - c^2)}{C (b^2 - a^2) 2c^2} \quad (4)$$

¹ Static-general

² Interaction

³ Frictionless

⁴ Coupled Temperature Displacement

⁵ Surface to Surface Contact

⁶ Sweep

سپس تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. شکل ۲ نحوه‌ی عملیات حرارتی مخزن را نشان می‌دهد. جهت عملیات حرارتی ابتدا قطعات تحت دمای ۸۹۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۷۵ دقیقه نرماله سازی شدند؛ سپس خنک کاری قطعات داخل هوا انجام شد. مرحله‌ی آستنیت‌ه کردن نمونه‌ها تحت دمای ۸۴۰ درجه سانتی‌گراد برای زمان ۷۵ دقیقه انجام شد و نمونه‌ها داخل روغن کوئنچ شدند. در نهایت قطعات تحت دمای ۶۱۰ درجه سانتی‌گراد برای زمان ۵۲۰ دقیقه تمپر شده و در هوا خنک شدند. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری از قطعه کار قبل و بعد از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ساختار اولیه فریت-سمانتیت اولیه (شکل الف) بعد از عملیات حرارتی به فریت تمپر شده-مارتنزیت تبدیل شده و مقدار سختی به ۳۸ راکول سی رسیده است.

نظر گرفته شده است. در شکل ۱ تصویر شماتیک مخزن سه لایه‌ی موردنظر پس از شرینگ فیت نشان داده شده است.

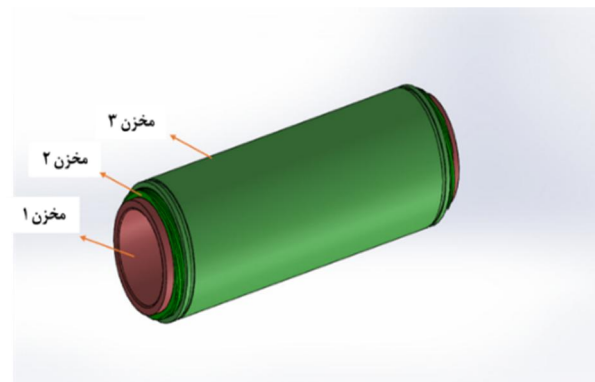


Fig. 1 Schematic view of the Shrink fit vessel

شکل ۱ تصویر شماتیک مخزن شرینگ فیت شده

۲-۳- مواد و روش ساخت مخازن

برای طراحی و ساخت مخازن تحت فشار بالا دستگاه هیپ، به دلیل وجود فشار داخلی بالاتر از ۶۰۰ bar، از استاندارد انجمن مهندسی مکانیک^۱ استفاده و مخازن دستگاه پرس ایزواستاتیک داغ، از فولاد VCN^۲ 150 ساخته شد. از ویژگی‌های مهم این فولاد استحکام بالا و قابلیت عملیات حرارتی خوب آن است. همچنین این فولاد در برابر حرارت مقاوم بوده، بنابراین، در ساخت قطعات و دستگاه‌هایی که در معرض بارهای کششی، خمشی و پیچشی قرار دارند؛ کاربرد دارد. از دیگر ویژگی‌های این فولاد می‌توان به مقاومت بالا در برابر شکست اشاره کرد.

برای تعیین خواص مکانیکی، آزمایش کشش از فولاد تهیه شده انجام گردید. میزان استحکام تسلیم برای نمونه در آزمون کشش برای میلگرد VCN150 حدود ۹۰۰ مگاپاسکال و استحکام نهایی حدود ۱۰۰۰ مگاپاسکال به دست آمد. همچنین برای اطمینان از ترکیب شیمیایی، آنالیز ترکیب شیمیایی انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ آنالیز ترکیب شیمیایی فولاد VCN150

Table 1 Chemical composition of the VCN150

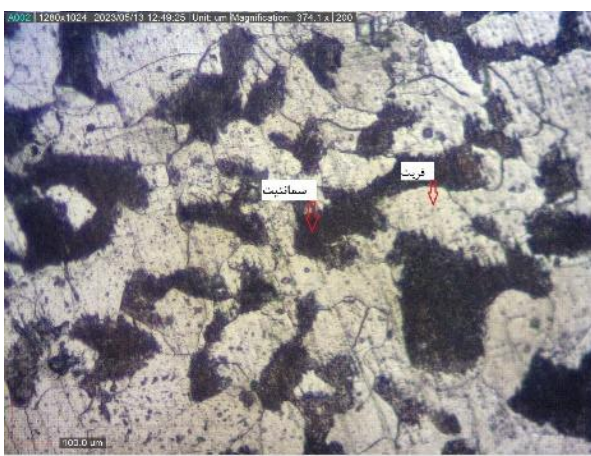
عنصر	C	Si	Ni	Cr	Mn	Mo
درصد وزنی	0.35	0.22	1.3	1.4	0.66	0.16

پس از اطمینان از ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی، میل‌گردهای تهیه شده با ابعاد موردنظر ماشین‌کاری شده و



Fig. 2 Heat treatment of the vessel

شکل ۲ عملیات حرارتی مخزن



(الف)

¹ ASME Sec VIII. Div.3

² Vanadium Carbide Nitride

۴-۲- روش تجربی فرایند شرینگ فیت

برای انجام عملیات شرینگ فیت به صورت تجربی، یک سامانه هیتر برای گرم کردن مخازن طراحی شد. این سامانه شامل تعدادی المنت سرمایی به صورت کمربندی، ترموکوپل و سیستم کنترل دما بود. همچنین یک مخزن برای نگهداری نیتروژن مایع و قرارگیری مخازن در داخل آن ساخته شد. ابتدا مخزن ۳ که بیشترین قطر را داشت، توسط هیتر که دورتادور آن را فرا گرفته است تحت دمای ۳۲۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت؛ دلیل انتخاب این دما، جلوگیری از ایجاد اثر افزایش دما بر کاهش استحکام مخازن عملیات حرارتی شده است. شکل ۵، سامانه هیتر ساخته شده را نشان می دهد.

همزمان مخزن ۲ درون نیتروژن مایع با دمای ۱۹۶ درجه سانتی گراد قرار داده شد. برای این کار در ابتدا مخزن ۲ داخل مخزن نیتروژن مایع قرار داده شد. سپس نیتروژن مایع به صورت تدریجی داخل مخزن ریخته شد. افزودن نیتروژن مایع تا زمانی که مخزن ها با نیتروژن مایع به تعادل دمایی رسیدند و خروج بخار نیتروژن کاهش یافت، ادامه پیدا کرد.



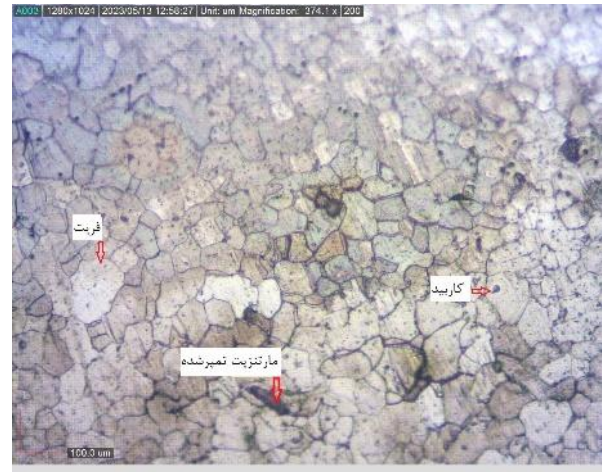
Fig. 5 Vessels prepared for Shrink Fit operation

شکل ۵ مخازن آماده شده برای عملیات شرینگ فیت



Fig. 6 Transferring vessels 2 of liquid nitrogen for shrink Fit

شکل ۶ انتقال مخزن ۲ از نیتروژن مایع جهت عملیات شرینگ فیت



(ب)

Fig. 3 Optical microscope image of VCN steel a) Before heat treatment (ferrite with cementite) b) After heat treatment (ferrite, carbide, tempered martensite)

شکل ۳ تصویر میکروسکوپی نوری از فولاد VCN (200X) الف) قبل از عملیات حرارتی (ساختار: فریت به همراه سمنتیت) ب) بعد از عملیات حرارتی (ساختار: فریت، کاربید، مارتنزیت تمپر شده)

برای افزایش دقت ساخت و افزایش کیفیت سطوح داخلی و خارجی این مخازن، پس از عملیات حرارتی ماشین کاری نهایی و عملیات سنگ زنی انجام شد. با توجه به طراحی مورد نیاز مخزن کوره پرس ایزو استاتیک داغ، بر روی سطح مخزن شماره ۲، شیارهای مارپیچ با زاویه ۴۵ درجه و طول گام ۱۲ میلی متر برای گردش مایع خنک کننده تعبیه شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. در جدول ۲ ابعاد نهایی مخازن ساخته شده با طول ۱۵۰۰ میلی متر آورده شده است.

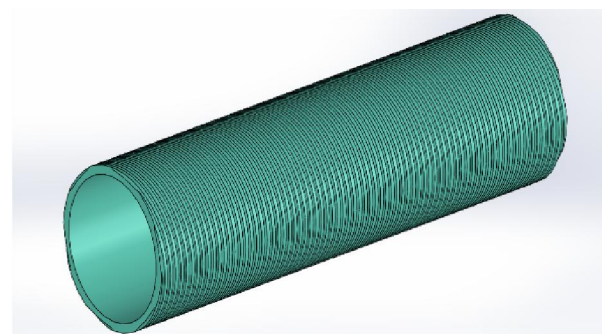


Fig. 4 Vessel No. 2 (middle)

شکل ۴ مخزن شماره ۲ (میانی)

جدول ۲ ابعاد نهایی مخازن ساخته شده

Table 2 The final dimensions of the vessels			
مخزن ۳	مخزن ۲	مخزن ۱	قطعه
400	360	300	قطر داخلی (mm)
440	400	360	قطر خارجی (mm)

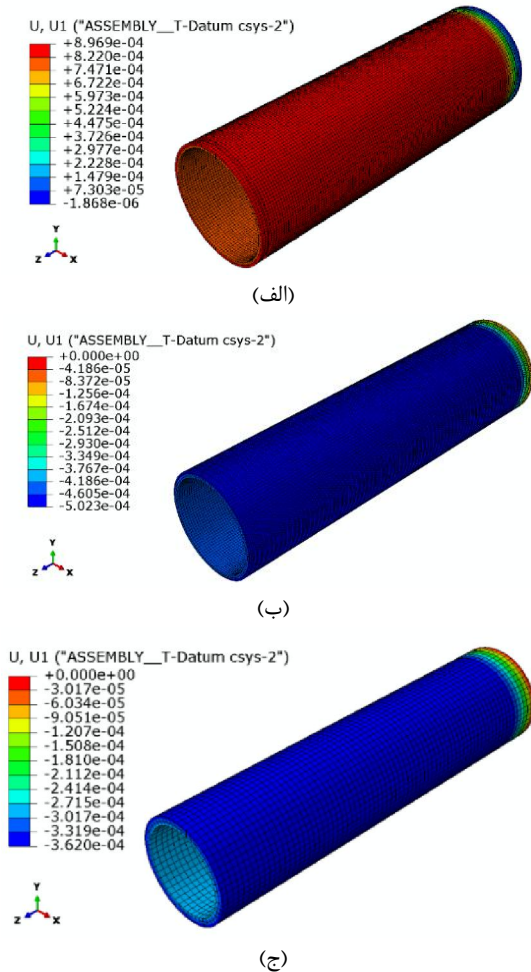
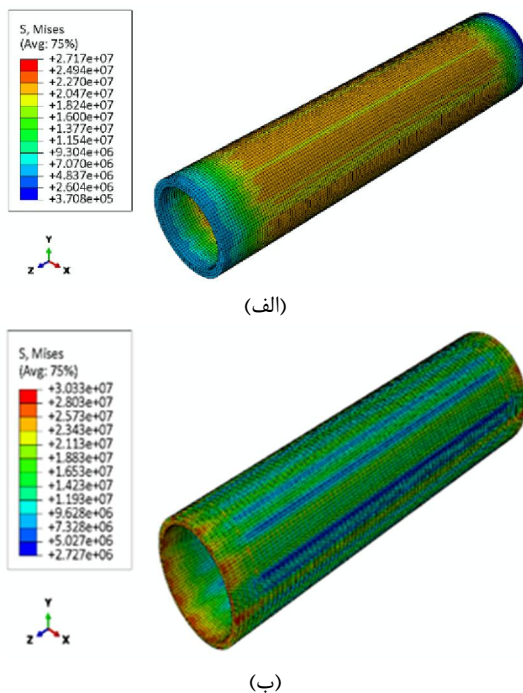


Fig. 7 Radial displacement contour of vessel 1 (inner tank)

شکل ۷ کانتور جابجایی شعاعی مخزن شماره ۱ (مخزن داخلی)



(ب)

پس از این مرحله با استفاده از جرثقیل مخزن ۲ از مخزن نیتروژن مایع خارج و با دقت درون مخزن ۳ جا زده شد. زمانی که مخزن ۲ از نیتروژن مایع بیرون کشیده می شود، این انتقال می بایست با سرعت انجام شود چون با گذشت زمان انقباض سازه کم شده و به حالت اولیه خود برمی گردد، شکل ۶ خارج نمودن مخزن از نیتروژن مایع را نشان می دهد. پس از قرارگیری مخزن ۲ درون مخزن ۳، به مخازن فرصت داده شد که هم دما شوند. سپس با استفاده از سامانه هیتر دو مخزن شرینگ فیت شده تا دمای ۳۲۰ درجه سانتی گراد گرم شدند. در نهایت مخزن شماره ۱ جهت ایجاد انقباض شعاعی درون نیتروژن مایع قرار داده شد و سپس درون مخزن ۲ مونتاژ گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نتایج شبیه سازی فرایند شرینگ فیت

ابتدا در هر یک از مخازن میزان جابجایی شعاعی بر اثر افزایش و یا کاهش دما به صورت مجزا شبیه سازی شده است. جهت ایجاد انبساط، مخزن ۳ (بیرونی ترین لایه) تحت دمای ۶۰۰ درجه ی کلوین قرار گرفت که باعث جابجایی انبساطی شعاعی ۰/۸۹ میلی متر شد که در شکل ۷-الف نشان داده شده است. هم زمان مخازن شماره ۲ که بر روی سطح آن شیارهای مارپیچ ایجاد شده است و مخزن شماره ۱ تحت دمای ۱۱۳ درجه ی کلوین (۱۶۰- درجه سانتی گراد) قرار گرفت. شکل ۷-ب و شکل ۷-ج شبیه سازی این مخازن را نشان می دهد. مطابق شکل های ۷-ب و ۷-ج، میزان جابجایی انقباضی شعاعی برای مخزن ۲، ۰/۵ میلی متر و برای مخزن ۱، ۰/۳۶ میلی متر است.

در عملیات شرینگ فیت پس از ایجاد انبساط حرارتی در مخزن شماره ۳ و سرد کردن مخزن شماره ۲ در نیتروژن مایع، این دو مخزن درون یکدیگر قرار داده می شوند. با گذشت زمان و برگشت دمای آن ها به دمای محیط، مخزن ۳ دچار انقباض و مخزن ۲ دچار انبساط می شود که در اثر این فعل و انفعال، تنش شعاعی در این سازه ها به وجود می آید. پس از قرارگیری مخزن شماره ۱ درون مخزن شماره ۲ و تکمیل فرایند شرینگ فیت با هر سه مخزن، طبق شکل ۸-الف، حداکثر تنش فون میسر پسماند بر اثر فرایند در مخزن ۱، ۲۷ مگاپاسکال محاسبه شد. همچنین حداکثر مقدار این تنش در مخزن شماره ۲ و مخزن شماره ۳ به ترتیب مقادیر ۳۰ مگاپاسکال و ۳۹/۹ مگاپاسکال محاسبه شده است که در شکل های ۸-ب و ۸-ج به طور مجزا نشان داده شده است.

مقادیر تنش فون میسز تحلیلی به دست آمده با نتایج روش عددی، با پیشروی به سمت بیرون در راستای شعاع مخزن ۲ و مخزن ۳ که به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، در صورتی که از لایه درونی به سمت لایه بیرونی مخزن پیشروی شود، مقدار تنش فون میسز در گره‌های مزبور شناسایی شده و بر این اساس نمودار تنش فون میسز با روش عددی در راستای شعاع برای هر یک از مخازن ۲ و ۳ ترسیم شده است. از طرف دیگر به کمک نرم‌افزار متلب برای تعدادی نقاط بین شعاع داخلی و شعاع خارجی (در اینجا ۲۰ نقطه) تنش‌های شعاعی و تماسی به کمک رابط ۵ برای مخزن شماره ۲ و رابط ۶ برای مخزن شماره ۳، مورد محاسبه قرار گرفته و در نهایت با استفاده از رابط ۸ تنش فون میسز در هر یک از مخازن محاسبه شده و نمودار تنش فون میسز با روش تحلیلی در راستای شعاع برای هر یک از مخازن ۲ و ۳ ترسیم می‌شود.

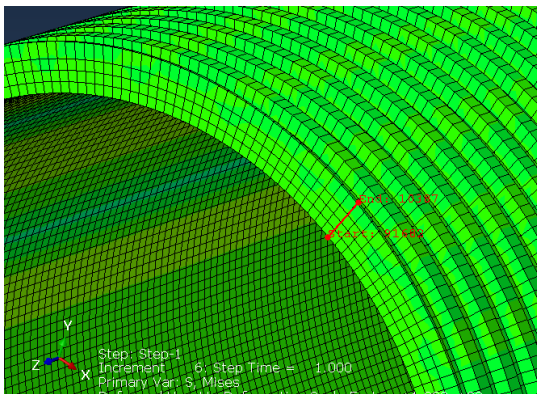


Fig. 9 Selecting the direction in vessel 2 to compare the von Mises stress with the analytical results

شکل ۹ انتخاب جهت در مخزن ۲ برای مقایسه‌ی مقدار تنش فون میسز با نتایج تحلیلی

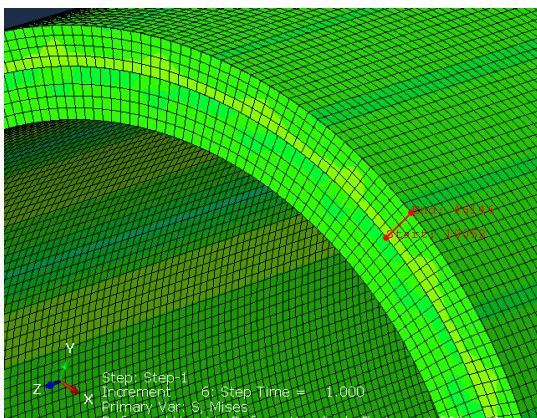
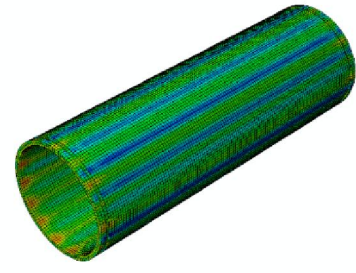
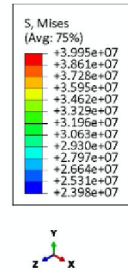


Fig. 10 Selecting the direction in vessel 2 to compare the von Mises stress with the analytical results

شکل ۱۰ انتخاب جهت در مخزن ۳ برای مقایسه‌ی مقدار تنش فون میسز با نتایج تحلیلی



(ج)

Fig. 8 Stress distribution in vessel 3 (outer) after the shrink fit process
شکل ۸ توزیع تنش در مخزن شماره سه (بیرونی) بعد از اتمام شرینگ فیت

در جدول ۳ مقادیر تنش و جابجایی شعاعی برای مخازن آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین تنش ناشی از عملیات شرینگ فیت در مخزن شماره ۳ (بیرونی‌ترین مخزن) به وجود می‌آید. دلیل بیشتر بودن تغییر شعاع مخزن شماره ۳ نسبت به مخازن ۱ و ۲ را می‌توان با توجه به ارتباط تنش با شعاع مخازن استوانه‌ای بیان نمود. با توجه به اینکه ضخامت هر سه مخزن ثابت است لذا بیشتر تنش مربوط به مخزن شماره ۳ که دارای قطر بزرگ‌تری از مخازن ۱ و ۲ است اتفاق می‌افتد؛ این مسئله باعث می‌گردد که بیشترین مقدار جابجایی شعاعی نیز در این مخزن به وجود آید. البته مقادیر تنش ایجاد شده در مخازن پس از شرینگ فیت (حداکثر ۴۰ مگاپاسکال) با استحکام کششی فولاد مورد استفاده (۹۰۰ مگاپاسکال) بسیار فاصله دارد. این مسئله نشان می‌دهد که عملیات شرینگ فیت مخازن کاملاً در ناحیه الاستیک انجام شده است که دلیل آن انتخاب صحیح پارامترها به‌ویژه مقدار تداخل است.

جدول ۳ تغییرات شعاع و مقادیر تنش در اثر شرینگ فیت

Table 3 Radius and stress changes due to shrink fit

مخزن	شماره ۱	شماره ۲	شماره ۳
دما (کلوین)	113	113	600
جابجایی شعاعی (mm)	0.36	0.5	0.89
تنش فون میسز (MPa)	27	30	39.9

۳-۲- مقایسه نتایج تنش فون میسز ناشی از شرینگ فیت

مخزن ۲ و ۳ به صورت تحلیلی و عددی

برای محاسبه مقادیر تنش‌های شعاعی و تماسی به صورت تحلیلی، رابطه‌ی ۵ برای مخزن ۲ و رابطه‌ی ۶ برای مخزن ۳ مورد استفاده قرار گرفت. پس از محاسبه تنش شعاعی σ_r و تنش تماسی σ_θ برای هر یک از مخازن و قرار دادن در رابطه ۸، مقدار تنش فون میسز برای هر مخزن محاسبه گردید. برای مقایسه‌ی

جدول ۴ تغییرات تنش فون میسز تحلیلی و عددی در راستای شعاع مخزن ۲

Table 4 Analytical and numerical von Mises stress changes along the vessel 2 radius

شعاع Node (m)	تنش فون میسز		خطا (%)
	عددی (MPa)	تحلیلی (MPa)	
0.18	16.81	17.46	3.7
0.185	16.34	16.76	2.5
0.19	15.58	16.13	3.39
0.195	15.45	15.56	0.7
0.2	15.22	15.04	1.21
میانگین			2.3

جدول ۵ تغییرات تنش فون میسز تحلیلی و عددی در راستای شعاع مخزن ۳

Table 5 Analytical and numerical von Mises stress changes along the vessel 3 radius

شعاع Node (m)	تنش فون میسز		خطا (%)
	عددی (MPa)	تحلیلی (MPa)	
0.2	17.76	18.34	3.15
0.205	17.24	17.62	2.17
0.21	16.50	16.96	2.71
0.215	15.82	16.35	3.21
0.22	15.37	15.79	2.66
میانگین			2.78

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق با توجه به اهمیت بررسی نحوه طراحی و ساخت مخازن تحت فشار بالا به صورت تئوری و تجربی، عملیات شرینگ فیت مخزن سه لایه فولادی مورد استفاده در پرس ایزو استاتیک داغ با موفقیت انجام شد. ابتدا عملیات شرینگ فیت مخازن به روش المان محدود شبیه سازی شد و در ادامه جهت صحت سنجی نتایج و اطمینان بیشتر، مقدار تنش به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج به دست آمده به صورت زیر است:

۱. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی و نتایج تحلیلی، مقادیر تنش به وجود آمده در اثر عملیات شرینگ فیت بسیار کمتر از استحکام کششی فولاد VCN است. لذا عملیات شرینگ فیت کاملاً در ناحیه الاستیک انجام شده است.
۲. با توجه انجام عملیات شرینگ فیت در محدوده الاستیک و مونتاژ صحیح سه مخزن، در نتایج شبیه سازی و روش تحلیلی روند مشابهی برای تغییرات تنش ایجاد شده است؛ به طوری که بر اساس محاسبات تحلیلی و روش عددی، بیشترین تغییرات شعاع و تنش ایجاد شده در مخزن شماره ۳ است.

مقادیر مربوط به تنش فون میسز در هر گره شناسایی شده و مقدار به دست آمده از شبیه سازی با نتایج به دست آمده از محاسبات تحلیلی به ترتیب در شکل های ۱۱ و ۱۲ مقایسه قرار گرفته است. همچنین در جداول ۴ و ۵ مقادیر تنش فون میسز عددی و تحلیلی و درصد خطای هر یک ارائه شده است. مطابق شکل ۱۱، بیشترین مقدار تنش تحلیلی در سطح داخل مخزن ایجاد شده و روند تغییرات هر دو نمودار تحلیلی و عددی مشابه است به طوری که در راستای شعاع مخازن، از سمت داخل به سمت بیرون استوانه، مقادیر تنش، کاهش می یابد. افزایش تنش در سطح داخلی مخزن به دلیل ایجاد تداخل و ایجاد ناحیه تماس بین دو مخزن در عملیات شرینگ فیت است که باعث افزایش تنش می گردد. همچنین مقایسه ی شکل ۱۱ با شکل ۱۲ نشان می دهد بیشترین مقدار تنش تحلیلی در مخزن ۳ ایجاد شده است که با نتایج شبیه سازی مطابقت دارد. علاوه بر این مقدار میانگین اختلاف نتایج شبیه سازی و محاسبات تحلیلی برای مخزن ۳، ۲/۸٪ و برای مخزن ۲، ۲/۳٪ محاسبه شده که نشان دهنده همگرایی نتایج و انتخاب صحیح پارامترهای شرینگ فیت است.

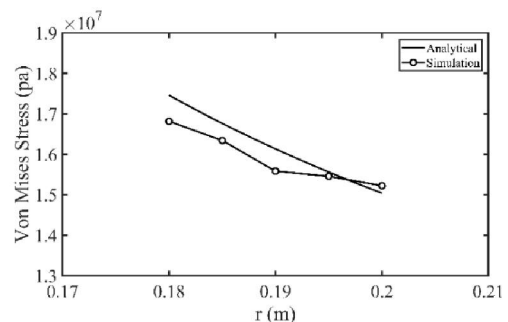


Fig. 11 Comparison of analytical and numerical von Mises stress along the vessel 2 radius

شکل ۱۱ مقایسه ی مقدار تنش فون میسز تحلیلی و عددی در راستای شعاع در مخزن ۲

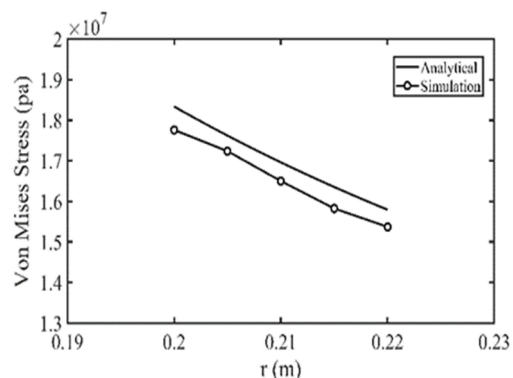


Fig. 12 Comparison of the von Mises stress, analytical and numerical, along the vessel 3 radius

شکل ۱۲ مقایسه ی مقدار تنش فون میسز تحلیلی و عددی در راستای شعاع در مخزن ۳

- [8] S.A. Teymour kolaie, A. Sotodeh, Investigating the effect of the shrink fit process on the performance of pressure vessels and determining the optimal radius of multi-layer cylinders by analytical solutions, *The first national CNG conference*, Tehran, 2008. (in Persian)
- [9] S.A. Teymour kolaie, *investigating the process of auto-fermentation and shrink fit in increasing the capacity of cylinders under pressure*, Master Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, 2009. (in Persian)
- [10] A. Naraki, P. Ghabezi, Analysis of composite cylindrical pressure vessels under the effect of cyclic internal pressure and temperature, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 1, pp.15-32, 2013. (in Persian)
- [11] E. Mojaradi, Sh. yousefi, Analysis of thin-walled, thick-walled, cylindrical and spherical tanks under pressure by ANSYS, *The 5th international conference in science and technology*, london, 2016.
- [12] M. Arefi, S. Sharifiyan, Thermo-elastic analysis of thick-walled target cylinder with variable properties with temperature using perturbation method, *The Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp.79-100, 2019.
- [13] O. Abdelsalam, Design optimization for a three-layer shrink-fitted pressure vessel exposed to very high pressure, *Material Science and Engineering*, Vol. 610, pp. 1-14, 2019.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/610/1/012077>
- [14] E. Izard, R. Garcia, M. Martín, M. Lorenzo, Finite Element Analysis of the Reduction in Stress Concentration Factors in Shrink Fits by Using Contact Rings, *Applied Science*, Vol. 12, pp. 2-14, 2022.
<https://doi.org/10.3390/app121910037>
- [15] Sh. D. Urade, D.V. Bhope, S.D. Khamankar, Stress Analysis of Multilayer Pressure Vessel. *International Journal of Engineering and Technical Research*, Vol. 2, No.9, pp.34-43, 2014.
<http://doi:10.4172/2168-9873.1000157>
- [16] M.R. Salehi Kolahi, M. Karamooz, H. Rahmani, Elastic analysis of Shrink-fitted Thick FGM Cylinders Based on Linear Plane Elasticity Theory. *Mechanics of Advanced Composite Structures*, Vol. 7, pp. 121 – 127, 2020.
<http://doi:10.22075/MACS.2019.18551.1221>
- [17] T. Z. Blazynski, *Applied elasto plasticity of Solids*, Macmillan press Ltd, London, 1971.
- [18] R. Budynas, *Advanced strength and applied stress analysis*, Second Ed., McGraw-Hill, New York, 1996.
۳. نتایج شبیه سازی و محاسبات تحلیلی نشان می دهند که بیشترین تنش ها در شعاع داخلی مخازن ایجاد می شود، به طوری که سطح داخلی مخزن، تنش بیشتری نسبت به سطح بیرونی آن دارد.
۴. مقایسه نتایج تحلیلی و شبیه سازی مقادیر تنش فون میسر حاصل از شرینگ فیت نشان می دهد که روند تغییرات تنش برحسب شعاع مخزن، کاملاً مشابه بوده و مقدار اختلاف آن ها کمتر از ۳٪ است.

۵- مراجع

- [1] F. Öztürk, T. Chien, Simulations of Interference and Interfacial Pressure for Three Disk Shrink Fit Assembly. *Gazi University Journal of Science*, Vol. 23, No. 2, pp. 233-236, 2010.
- [2] M. Hadidi, A. Makari, Influence of Structural Defects on the Beneficiary Effects of Autofrettage, *Structural Integrity & Durability*, Vol.6, No.2, pp.113-122, 2010.
<https://doi.org/10.3970/sdhm.2010.006.113>
- [3] H. Feng, B. Donth, H. Mughrabi, Finite-Element Modelling of Low-Temperature Autofrettage of Thick-Walled Tubes of the Austenitic Stainless Steel AISI 304 L: Part II. Thick-Walled Tube with Cross-Bore, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 6, pp. 71-85, 1998.
<https://doi.org/10.1088/0965-0393/6/1/007>
- [4] H. Jahed, B. Farshi, M. Hosseini, Fatigue Life Prediction of Autofrettage Tubes Using Actual Material Behaviour, *Internasional Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol. 83, pp. 749–755, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.07.007>
- [5] U. Gamer, R. Lance, Residual Stress in Shrink Fits, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 25 No. 7, pp. 465-470, 1998.
[https://doi.org/10.1016/0020-7403\(83\)90039-5](https://doi.org/10.1016/0020-7403(83)90039-5)
- [6] A. Ozel, S. Temiz, M. Aydin, S. Sen, Stress Analysis of Shrink-Fitted Joints for Various Fit Forms via Finite Element Method, *Materials and Design*, Vol. 26, pp.281-289, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.06.014>
- [7] G.H. Majzoobi, A. Ghomi, Optimisation of Compound Pressure Cylinders, *Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, Vol. 15, No. (1-2), pp.135-145, 2006.