

## بالا بردن استحکام مخازن جدار ضخیم تحت فرآیند تلفیقی اتوفرتاژ و الیاف پیچی با کشش اولیه

عنایت اله حسینیان<sup>۱\*</sup>، ابوذر عباس قربانی<sup>۲</sup>، علی نوری<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، بزرگراه فتح، مهرآباد جنوبی، ehosseinian@alum.sharif.edu  
 ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، بزرگراه فتح، مهرآباد جنوبی aaghorbani429@gmail.com  
 ۳- دانشیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، بزرگراه فتح، مهرآباد جنوبی، anouri@ssau.ac.ir  
 \*نویسنده مخاطب

### چکیده

در صنعت و تکنولوژی‌های به روز دنیا، برای استحکام بخشیدن و بالا بردن عمر خستگی لوله‌ها و مخازن تحت فشار داخلی از روش اتوفرتاژ استفاده می‌شود تا تنش‌های پسماند مفید فشاری در آن‌ها ایجاد شود. همچنین اگر پارامتر کاهش وزن نیز مطرح باشد استفاده از لوله‌های الیاف پیچی شده نیز بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. در این تحقیق تلفیق این دو روش مورد توجه قرار گرفته است. در ابتدا لوله فولادی اتوفرتاژ شده و سپس الیاف تحت کشش ثابت و با زاویه به دور آن پیچیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش زاویه الیاف پیچی و کشش اولیه منجر به افزایش تنش پسماند فشاری در داخل لوله و کاهش تنش پسماند کششی در خارج آن خواهد شد که در نهایت باعث افزایش استحکام لوله تلفیقی و همچنین افزایش عمر خستگی می‌شود. همچنین چنانچه فشار اتوفرتاژ یکسان باشد لوله تلفیقی نسبت به لوله فولادی از استحکام بالاتری برخوردار خواهد بود. در این تحقیق موارد بسیاری از جمله درصد‌های مختلف اتوفرتاژ، تغییر زاویه و تعداد لایه‌های الیاف پیچ و اعمال فشار بهینه بررسی و در نهایت نتیجه گرفته شده است که بر اساس سه عامل کاهش وزن، افزایش تنش‌های پسماند فشاری در داخل لوله و کاهش تنش‌های پسماند کششی در خارج لوله، لوله تلفیقی از لوله اتوفرتاژ شده مستحکم‌تر بوده و عمر خستگی بالاتری دارد.

**واژه‌های کلیدی:** اتوفرتاژ - الیاف پیچی - مخازن جدار ضخیم - خستگی

### ۱- مقدمه

تاریخچه تکنولوژی فشار بالا به قرن ۱۴ میلادی می‌رسد در آن دوران یک مخترع آلمانی به نام برنولد شوارتر، اولین لوله تفنگ را اختراع کرد [۱]. برای قرون متوالی از تکنولوژی فشار بالا فقط در لوله‌های تفنگ و توپ‌های سنگین و نیمه سنگین استفاده می‌شد. روش‌های گوناگون در جهت افزایش فشار پذیری در لوله‌ها وجود دارد که اتوفرتاژ هیدرولیکی یکی از روش‌های متداول در این زمینه است. اتوفرتاژ فرآیندی است که طی آن تنش‌های پسماند مفیدی در لوله‌ها و مخازن تحت فشار ایجاد می‌شود و در نتیجه ظرفیت بارپذیری و مقاومت در مقابل رشد ترک‌های داخلی افزایش می‌یابد. اتوفرتاژ لوله‌ها در سال ۱۹۳۰ توسط یک افسر فرانسوی پیشنهاد شد و پس از آن در ساخت لوله‌های جدار ضخیم کاربرد فراوانی یافت. امروزه این روش در صنایع مختلف نیروگاهی، نظامی، شیمیایی و هسته‌ای استفاده می‌شود [۱]. به دلیل کاربرد فراوان اتوفرتاژ در لوله‌ها، محاسبه دقیق تنش‌های پسماند ناشی از آن نیز بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. حل الاستیک لوله‌های جدار ضخیم تحت فشار داخلی برای اولین بار در

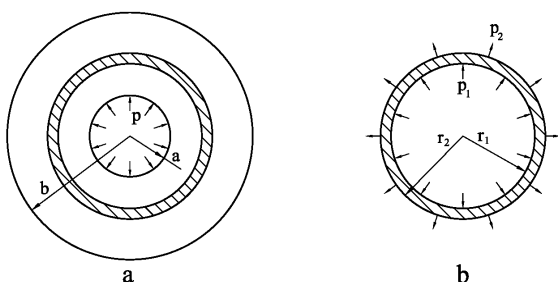
سال ۱۸۵۲ توسط لامه (Lamé) [۲] ارائه شد. پارامترهای اساسی که باعث تفاوت در تئوری‌های بکار رفته در مقالات در زمینه لوله‌های تحت فشار است را می‌توان به روش حل، معیار تسلیم، روابط تنش- کرنش در محدوده رفتار پلاستیک، تراکم‌پذیری، مدل‌های رفتار ماده و حالت انتها (شرایط مرزی) دسته‌بندی کرد. از بین روش‌های حل تحلیلی اولیه می‌توان به روش حل ارائه‌شده توسط هیل (Hill) [۳] برای لوله اتوفرتاژ شده در حالت انتها بسته و ماده‌ای با رفتار الاستیک- کاملاً پلاستیک اشاره کرد. همچنین در مورد روش‌های حل تحلیلی می‌توان از روش ارائه‌شده توسط هانگ (Huang) [۴] نام برد. از بین روش‌های حل عددی روش VMP که توسط جاهد و همکاران [۵ و ۶] ارائه شده است بدلیل قابلیت انعطاف زیاد در پذیرش مدل‌های مختلف رفتار ماده در بارگذاری و باربرداری (اثر باشینگر و رفتار غیر خطی پس از نقطه باشینگر)، معیارهای تسلیم، تراکم پذیری و یا تراکم ناپذیری و سعی محاسباتی بهتر نسبت به روش اجزا محدود، مورد توجه بسیاری از محققان واقع شده است. پارکر (Parker) بیشترین تحلیل‌ها را با استفاده از روش VMP انجام داده است. وی بر اساس این روش کدی کامپیوتری بنام برنامه هنکی [۷] فراهم آورده است. در نهایت این روش توسط فرهی و همکاران [۸] بسط داده شد تا توانایی حل هر چهار حالت شرایط انتهایی لوله یعنی کرنش و تنش صفحه‌ای، انتها باز و انتها بسته را داشته باشد.

از طرف دیگر برای افزایش استحکام و فشار پذیری لوله، روش الیاف پیچی بر روی لوله‌های پر فشار هم بسیار کاربرد پیدا کرده و مطالعات و بررسی‌های بسیاری در مورد آن انجام پذیرفته است [۹ و ۱۰].

همچنین ایده تلفیق دو روش اتوفرتاژ و الیاف پیچی در لوله‌های جدار ضخیم خود موضوع جدیدی است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است تا لوله‌هایی با استحکام بالاتر و وزن کمتر بدست آیند [۱۱-۱۳]. صدیقی و جباری [۱۱] حالتی را بررسی کرده اند که در ابتدا لوله فولادی اتوفرتاژ شده و آنگاه الیاف پیچی شده است و الیاف پیچی صرفاً تحت زاویه ۹۰ درجه بررسی شده است ولی در مراجع [۱۲ و ۱۳] بر عکس لوله در ابتدا الیاف پیچی شده و آنگاه فرآیند اتوفرتاژ بر روی آن انجام پذیرفته است و استحکام مجموعه بررسی شده است.

در این تحقیق ابتدا لوله اتوفرتاژ شده و آنگاه تحت الیاف پیچی بر روی آن انجام شده است. استحکام لوله تحت زوایای مختلف الیاف پیچی بشکلی عمیق تر مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت به این سوال پاسخ داده شده است که آیا روش تلفیقی ارائه شده در این بررسی می‌تواند باعث بهبود بیشتر استحکام لوله و کاهش وزن آن شود؟

پس از این مرحله و با استفاده از روش تکرار،  $U_{eff}$  و  $E_{eff}$  جدید در حل الاستیک جایگذاری شده و دوباره حل تکرار می‌شود تا جواب همگرا شود. همگرایی وقتی بدست می‌آید که منحنی تجربی تنش-کرنش تک محوره با منحنی  $\frac{\sigma_{eq} - \sigma_{eq}}{E_{eff}}$  که در آخرین مرحله بدست آمده است با ترانس معینی بر هم منطبق شوند.



شکل ۱- سطح مقطع لوله (a) لوله تحت فشار (b) یک نوار ایزوله شده

در اینجا  $a$  و  $b$  به ترتیب شعاع داخلی و خارجی و  $p$  نیز فشار داخلی می‌باشد. همچنین  $r_1$ ،  $r_2$ ،  $P_1$  و  $P_2$  به ترتیب شعاع‌ها و فشارهای داخلی و خارجی در نوار منفک شده می‌باشند.

برای محاسبه تنش‌های پسماند، در انتهای فاز بارگذاری، منحنی‌های تنش-کرنش کلیه نقاط مادی واقع بر وسط نوارها تعریف می‌شوند. نقاط شروع منحنی‌های باربرداری، تنش‌های معادل نهایی بر روی منحنی تنش-کرنش در فاز بارگذاری می‌باشند که در نقاط وسط نوارها بدست آمده‌اند. با مشخص شدن منحنی‌های باربرداری، بارگذاری ثانویه که در اینجا همان باربرداری است اعمال می‌شود (برای اعمال باربرداری کافی است که جهت فشار داخلی اعمالی را معکوس نماییم). در این حالت نیز روش حل دقیقاً مشابه حالت بارگذاری است. توجه شود که در این حالت هر نوری، منحنی تنش-کرنش مربوط به خود را دارد. با کم کردن نتایج حاصل از تحلیل ثانویه از نتایج تحلیل اولیه، تنش‌های پسماند بدست می‌آیند.

روش VMP در آغاز توسط Dubey و Jahed [۵ و ۶] برای حل مسائل صفحه ای ارائه شده است. ولی مسائل واقعی اتوفرتاژ لوله‌ها، حالت انتها باز و انتها بسته هستند. بدین جهت این روش توسط فرهی و همکاران [۸] بسط یافت تا توانایی حل این مسائل را داشته باشد. آنها عنوان این روش را روش حل مستقیم گذاشتند.

در این تحقیق ابتدا لوله فولادی اتوفرتاژ شده و سپس الیاف پیچی می‌شود. بمنظور اجتناب از تنش برشی حادث از پیچش تحت زاویه الیاف و همچنین سهولت محاسبه، الیاف در دو لایه با زاویای قرینه نسبت به هم پیچیده شده (شکل ۲) و در انتها هر دو لایه پشت سرهم، یک لایه در نظر گرفته شده است که همانند مخزنی با دیواره نازک اطراف لایه‌های قبلی قرار می‌گیرد.

## ۲- فرمولاسیون و روش حل مسئله

هدف این تحقیق محاسبه تنش‌های پسماند در لوله‌های جدار ضخیم اتوفرتاژ شده است که پس از عملیات اتوفرتاژ لوله تحت الیاف پیچی با کشش ثابت قرار می‌گیرد تا در نهایت برای این فرآیند تلفیقی تنش‌های پسماند بدست آید.

با توجه به قابلیت‌های بسیار خوب روش VMP که توسط Dubey و Jahed [۵ و ۶] ارائه شده است از این روش برای حل مسئله استفاده خواهد شد. به اجمال این روش حل توضیح داده می‌شود. در روش ارائه شده میتوان مسائل غیر الاستیک با شرایط مرزی متقارن محوری را با استفاده از روش تکرارشونده الاستیک حل نمود. آنها بر اساس رابطه هنکی و قانون تصحیح شده هوک فرمول زیر را پیشنهاد کردند.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + U_{eff}}{E_{eff}} \sigma_{ij} - \frac{U_{eff}}{E_{eff}} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (1)$$

که  $\varepsilon_{ij}$  و  $\sigma_{ij}$  به ترتیب مولفه‌های کرنش و تنش هستند. همچنین  $U_{eff}$  و  $E_{eff}$  نیز به ترتیب ضریب پواسون موثر و ضریب یانگ موثر هستند که به ضریب پواسون  $U$  و ضریب یانگ  $E$  و همچنین حالت نهایی تنش بستگی دارند. این ضرایب به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$E_{eff} = \frac{3E}{3 + 2E\phi} \quad (2)$$

$$U_{eff} = \frac{2U + [(E/E_{eff}) - 1]}{2E/E_{eff}}$$

که  $\phi$  تابعی اسکالر است که از منحنی تنش-کرنش تک محوره بدست می‌آید و به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$\phi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_{eq}^p}{\sigma_{eq}} \quad (3)$$

که  $\varepsilon_{eq}^p$  و  $\sigma_{eq}$  به ترتیب کرنش معادل پلاستیک و تنش معادل هستند. بنابراین  $U_{eff}$  و  $E_{eff}$  را می‌توان متغیرهای میدانی دانست که خواص مادی را در هر نقطه توصیف می‌کنند (بدلیل آنکه حالت نهایی تنش در هر نقطه یکتا است). کاملاً روشن است که برای مقادیر ثابت  $U_{eff}$  و  $E_{eff}$  معادله (۱) رفتار الاستیک ماده را توصیف می‌کند. برای آنکه بتوان مسئله را با استفاده از رابطه (۱) حل نمود لازم است که ابتدا توزیع  $U_{eff}$  و  $E_{eff}$  و در سرتاسر جسم معلوم شود. بدین منظور در ابتدا سطح مقطع لوله آن گونه که در شکل (۱-ا) نشان داده شده است به نوارهای باریکی تقسیم می‌شود. کلیه نقاط داخلی هر نوار دارای  $U_{eff}$  و  $E_{eff}$  یکسانی هستند. در نتیجه هر نوار منفک شده از سیستم مطابق شکل (۱-ب)، به همان روشی که مسائل متقارن محوری در الاستیسیته حل می‌شوند قابل حل است.

و در اولین مرحله با استفاده از حل الاستیک، توزیع تنش‌ها و بدنبال آن تنش‌های معادل در کل جسم مشخص می‌شود. آنگاه با استفاده از روش تصویر و یا روش انرژی، ابتدا توزیع  $U_{eff}$  و  $E_{eff}$  بدست آمده و پس از آن با استفاده از معادله دوم رابطه (۲)، توزیع در سرتاسر ماده بدست می‌آید.

در کلیه تحلیل ها، خواص لوله فولادی بر اساس خواص ارایه شده توسط Gibson و همکاران [۱۴] و مطابق جدول ۱ انتخاب شده است.

جدول ۱- خواص مواد مورد استفاده

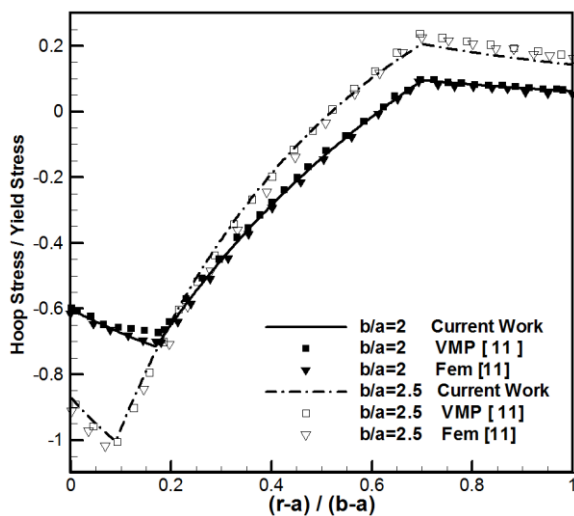
تنش تسلیم اولیه (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	مدول مماسی (GPa)
۱۱۰۰	۲۰۹	۰/۳	۲۰/۹

رفتار ماده در بارگذاری و باربرداری دو خطی در نظر گرفته شده است و مدول یانگ و مدول مماسی در بارگذاری و باربرداری یکسان فرض شده است. در بعضی از حالات مسئله برای دو نسبت قطری حل شده است. با شعاع داخلی  $a=50$  میلیمتر و شعاع خارجی  $b=100$  میلیمتر (برای نسبت  $b/a=2$ ) و  $b=125$  میلیمتر (برای نسبت  $b/a=2.5$ )، ضریب باشینگر برای نسبت قطری ۲ برابر  $0/45$  و برای نسبت قطری  $2/5$  برابر  $0/7$  در نظر گرفته شده است. الیاف از جنس لوله و تعداد لایه ها برابر و به ضخامت یک صدم قطر خارجی فرض شده و بجز در حالتی که تعداد لایه ها متغیر است تعداد لایه ها بیست در نظر گرفته شده است.

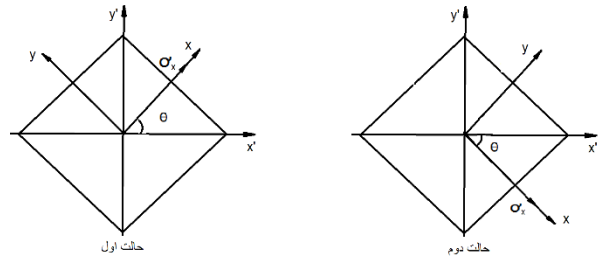
### ۳-۱- صحت سنجی روش جدید

روش جدید با روش مرجع [۱۱] مقایسه شده است که الیاف پیچی در آن تحت زاویه ۹۰ درجه و تحت تنش کششی ثابت  $720 \text{ MPa}$  انجام پذیرفته است. این مرجع از دو روش VMP و اجزا محدود برای حل مسئله استفاده کرده است. درصد اتوفرتاژ در هر دو نسبت قطری برابر  $70$  درصد در نظر گرفته شده است.

شکل ۳ تنش های مماسی پسماند را برای لوله تلفیقی نشان می دهد. بررسی شکل نشان دهنده تطابق بسیار خوبی بین کار حاضر و روش های ارائه شده در مرجع [۱۱] می باشد.



شکل ۳- مقایسه تنش مماسی روش جدید با مرجع [۱۱] برای دو نسبت قطری ۲ و ۲/۵



شکل ۲- دیاگرام چینش لایه ها و تنش های وارده

با توجه به شکل ۲، همان راستای الیاف،  $y$  راستای عمود بر آن،  $\theta$  زاویه چینش الیاف،  $x'$  راستای محور طولی مخزن،  $y'$  راستای مماسی مخزن و  $\sigma_x$  کشش اولیه الیاف است. برای تبدیل تنش های وارده از راستای محلی الیاف  $(x,y)$  به راستای مخزن  $(x',y')$  نیاز به بهره برداری از فرمول های انتقال می باشد. در نهایت و با استفاده از اصل جمع آثار خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \sigma_{x'} &= \sigma_x (1 + \cos 2\theta) \\ \sigma_{y'} &= \sigma_x (1 - \cos 2\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\tau_{x'y'} = 0$$

برای تلفیق تنش های ناشی از اتوفرتاژ لوله و الیاف پیچی روش ارائه شده در مرجع [۱۱] را بکار خواهیم برد. درین روش الیاف لایه به لایه پیچیده شده و بر اساس متد مستقیم [۸] محاسبات انجام میگیرد. برای پیچیدن یه لایه جدید یک نوار جدید بعنوان یک مخزن جدار نازک تعریف شده که ضخامت آن با ضخامت لایه پیچشی برابر است. اگر لایه جدید با یک تنش حلقه ای برابر با  $S_w$  بهم بافته شود، در این صورت، فشار تحت این لایه  $P_w$  می تواند به صورت زیر محاسبه شود:

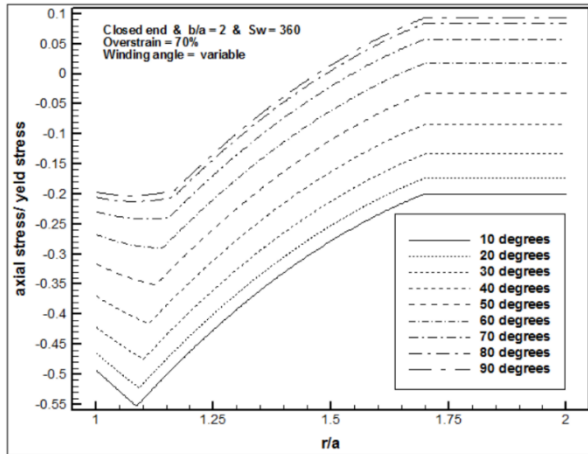
$$P_w = \frac{2tS_w}{D_w - 2t} \quad (5)$$

که  $t$  برابر با ضخامت لایه الیاف می باشد. این فشار برای مخزن همانند یک فشار خارجی اعمال می شود. بنابراین، توزیع تنشی که توسط این لایه جدید بوجود آمده می تواند بکمک روش مستقیم تحت شرایط انتها باز محاسبه شود. تنش مماسی در این لایه برابر با  $S_w$  بوده، در حالیکه تنش های شعاعی و محوری صفر هستند.

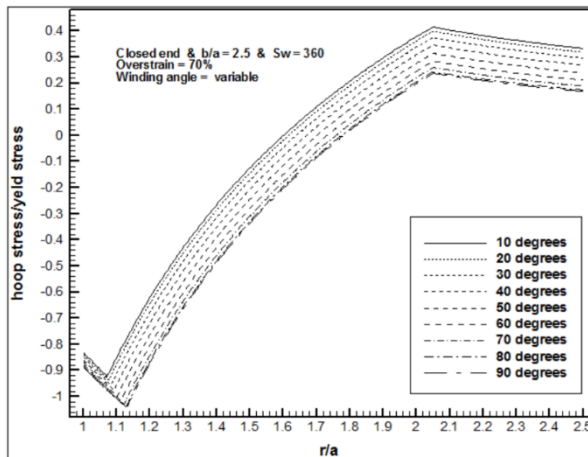
هنگامی که تکرارها کامل شوند، تنش های محاسبه شده به تنش های پسماند قبلی اضافه می شوند و لایه جدید دیگری می تواند بر اساس این روش بافته و تأیید شود. در نهایت، تنش های پسماند در فرآیند الیاف پیچی برای مخازن و لوله ها تحت رفتار الاستیکی یا رفتار پلاستیکی بدست خواهد آمد.

### ۳- تحلیل فرآیند تلفیقی اتوفرتاژ و الیاف پیچی با کشش اولیه در لوله های جدار ضخیم

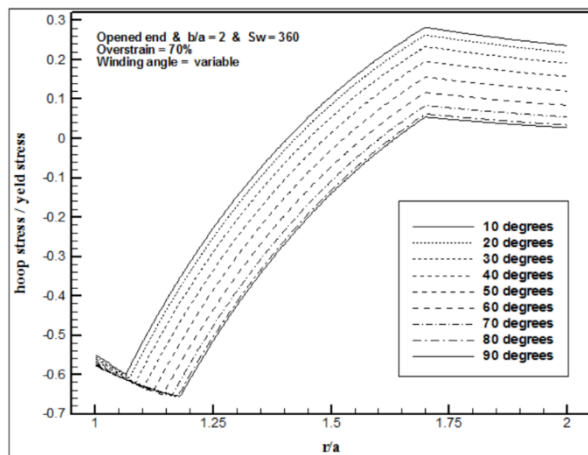
بر اساس روش VMP توسعه یافته توسط فرهی و همکاران [۸] و روش پیشنهادی توسط صدیقی و جباری [۱۱] برنامه ای کامپیوتری تهیه شد و بگونه ای بسط داده شد تا بتوان نتایج را برای الیاف پیچی با زوایای مختلف نیز استخراج کرد. در سرتاسر این تحلیل از معیار تسلیم فون میسر استفاده شده است.



شکل ۳- نمودار تنش محوری لوله تلفیقی تحت زوایای مختلف الیاف پیچی با درصد اتوفر تاژ ۷۰ درصد در حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲/۵ همچنین شکل ۷ تنش های پسماند مماسی را برای شرایط انتها بسته و در لوله ای با نسبت قطری ۲/۵ نشان میدهد که رفتار تنش های مماسی آن بسیار شبیه به رفتار لوله ای با نسبت ۲ است.

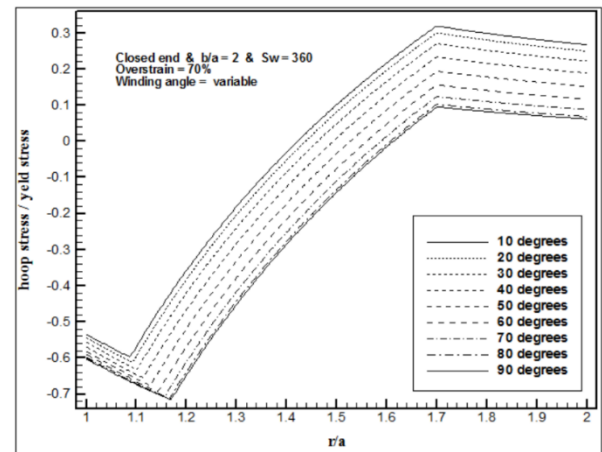


شکل ۶- نمودار تنش مماسی لوله تلفیقی تحت زوایای مختلف الیاف پیچی با درصد اتوفر تاژ ۷۰ درصد در حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲/۵

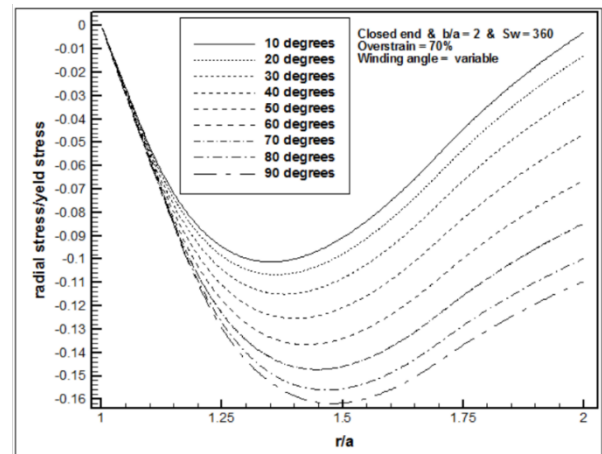


شکل ۷- نمودار تنش مماسی لوله تلفیقی تحت زوایای مختلف الیاف پیچی با درصد اتوفر تاژ ۷۰ درصد در حالت انتها باز با نسبت قطر ۲

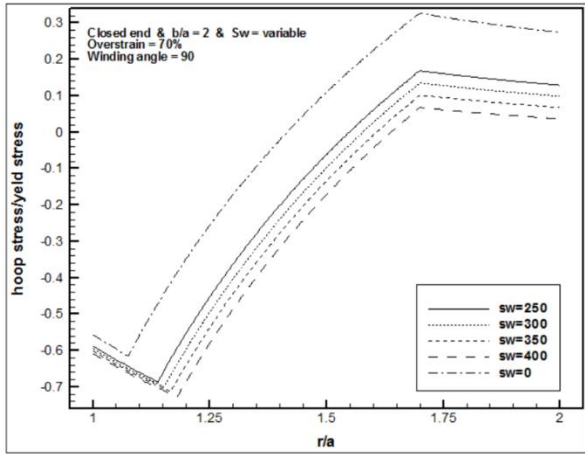
۳-۲- تنش های پسماند در لوله تلفیقی با تغییر در زوایای پیچش الیاف هدف از این بخش بررسی تاثیر زاویه پیچش الیاف در تنش های مماسی و شعاعی و محوری پسماند است. بدین منظور از لوله ای با درصد اتوفر تاژ ۷۰٪ استفاده شده و تحت الیاف پیچی با زوایای مختلف قرار گرفته است. این لوله با نسبت های قطری ۲ و ۲/۵ انتخاب شده که با نیروی کششی اولیه ثابتی برابر با ۳۶۰ مگاپاسکال الیاف پیچی شده است. تنش های پسماند در زوایای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه محاسبه شده اند. اشکال (۴-۶) به ترتیب تنش های پسماند مماسی، شعاعی و طولی را برای شرایط انتها بسته در جداره لوله ای با نسبت قطری ۲ نمایش می دهد. با توجه به نتایج حاصله مشهود است که با افزایش زوایای الیاف، قدر مطلق تنش پسماند مماسی داخلی افزایش (اثر مطلوب)، و تنش پسماند کششی خارجی کاهش (اثر مطلوب) می یابد. در رابطه با تنش شعاعی و محوری می توان گفت که افزایش زاویه پیچش الیاف، موجب افزایش قدر مطلق تنش پسماند در راستای شعاعی و کاهش قدر مطلق تنش پسماند در راستای محوری می شود. هر چند این مقادیر در زوایای ۸۰ و ۹۰ تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند.



شکل ۴- نمودار تنش مماسی لوله تلفیقی تحت زوایای مختلف الیاف پیچی با درصد اتوفر تاژ ۷۰ درصد در حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲



شکل ۵- نمودار تنش شعاعی لوله تلفیقی تحت زوایای مختلف الیاف پیچی با درصد اتوفر تاژ ۷۰ درصد در حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲

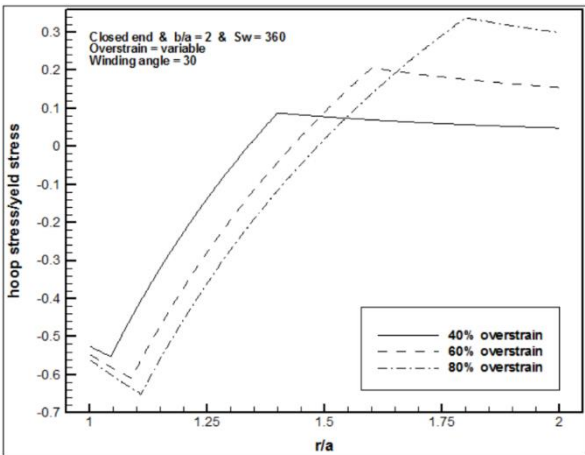


شکل ۱۱- نمودار تنش پسماند مماسی با کشش های مختلف الیاف با درصد اتوفرتاژ ۷۰ درصد و حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲ با زاویه ۹۰ درجه

#### ۳-۴- تغییرات تنش پسماند در لوله با تغییر درصد اتوفرتاژ

هدف از این بخش بررسی تاثیر درصد اتوفرتاژ در تنش های پسماند است. بدین منظور از لوله ای با ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد اتوفرتاژ استفاده شده و تحت الیاف پیچی با زوایای ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ درجه قرار گرفته است. این لوله با نسبت های قطری ۲ انتخاب شده که با نیروی کششی اولیه ثابتی برابر با ۳۶۰ مگاپاسکال الیاف پیچی شده است. بررسی اشکال (۱۴-۱۲) نشان می دهد که با افزایش درصد اتوفرتاژ قدر مطلق تنش پسماند فشاری افزایش یافته و تنش های پسماند کششی در سطح خارجی لوله فولادی نیز افزایش می یابد لذا با تغییر درصد اتوفرتاژ جهت بهبود فشارپذیری لوله باید زاویه پیچش متناسب با آن انتخاب شود.

در این راستا استفاده از درصد اتوفرتاژ بیشتر از ۷۰٪ توصیه نمی شود زیرا باعث تغییرات کمی در تنش های پسماند فشاری در داخل می شوند و این در حالی است که تنش های پسماند کششی در سطح بیرونی لوله را به شدت افزایش می دهند.

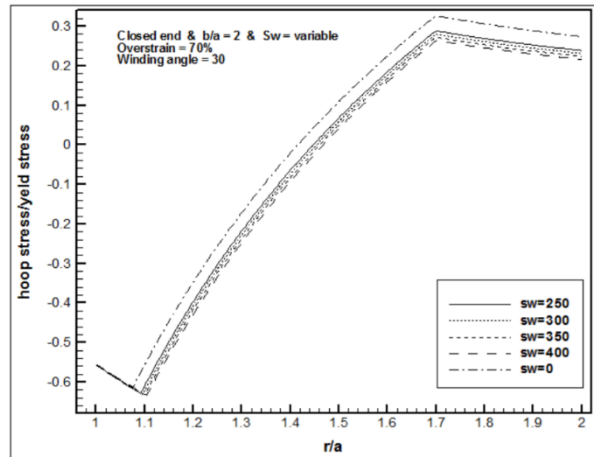


شکل ۱۲- نمودار تنش مماسی لوله تحت اتوفرتاژ ۴۰ و ۶۰ و ۸۰ درصد در حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲ تحت زاویه ۳۰ درجه

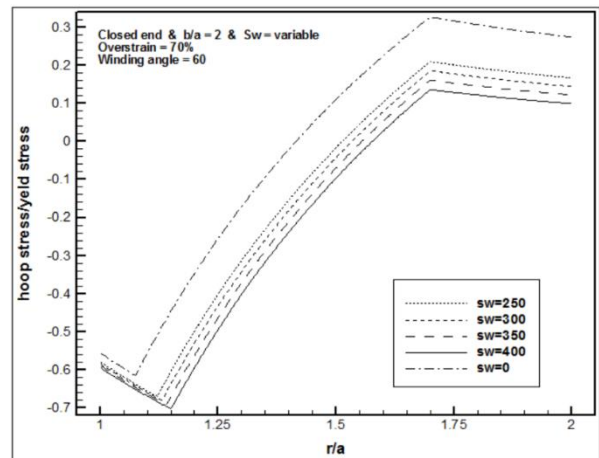
در انتها و در شکل ۸ تنش های پسماند مماسی در لوله ای با شرایط انتهایی انتها باز و برای نسبت قطری ۲ نمایش داده است. همچنان که مشاهده می شود نتایج حاصل بسیار مشابه حالت انتها بسته می باشد.

#### ۳-۳- تغییرات تنش های پسماند مماسی در لوله حاصل از تغییر در کشش الیاف

در این بخش تاثیر تغییرات تنش پسماند مماسی در اثر تغییر کشش الیاف را مورد مطالعه قرار می دهیم. در این راستا الیاف تحت زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه با کشش اولیه ۳۶۰ مگاپاسکال در لوله ای با نسبت قطری ۲ و در حالت انتها بسته بررسی می شوند. همانگونه که در اشکال (۱۱-۹) نشان داده شده، با افزایش کشش در الیاف، تنش پسماند مماسی چه در داخل لوله و چه خارج آن بهبود می یابد که اثر مطلوب در افزایش استحکام لوله خواهد داشت. با کمی دقت می توان دریافت هرچه زاویه بیشتر باشد، میزان تاثیر کشش الیاف بیشتر خواهد بود.

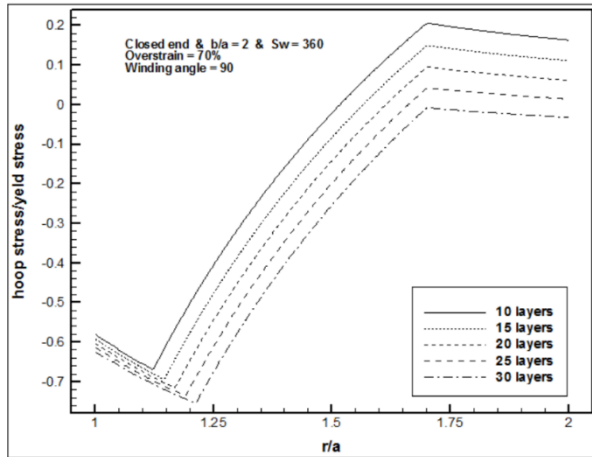


شکل ۹- نمودار تنش پسماند مماسی با کشش های مختلف الیاف با درصد اتوفرتاژ ۷۰ درصد و حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲ با زاویه ۳۰ درجه

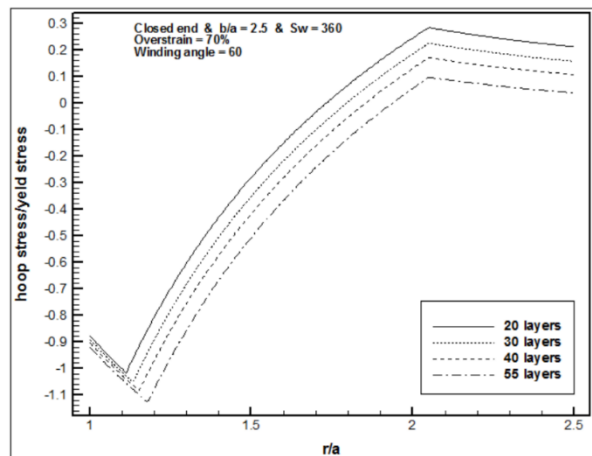


شکل ۱۰- نمودار تنش پسماند مماسی با کشش های مختلف الیاف با درصد اتوفرتاژ ۷۰ درصد و حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲ با زاویه ۶۰ درجه

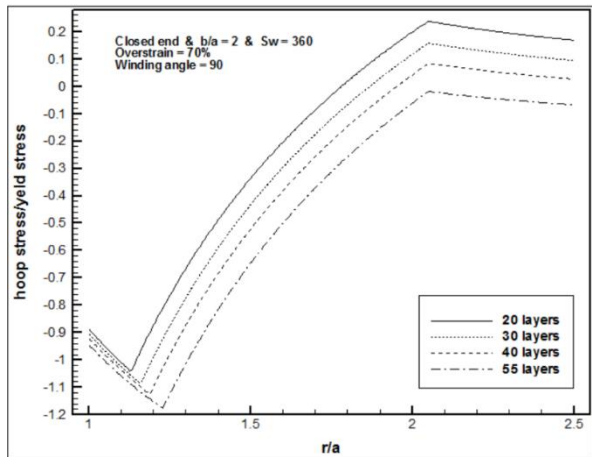
بدین منظور از اتوفرتاژ ۷۰٪ و الیاف تحت کشش اولیه ۳۶۰ مگاپاسکال و زاویه پیچش ۶۰ و ۹۰ درجه در لوله‌ای با نسبت قطری ۲ و ۲/۵ و حالت انتها بسته استفاده می‌کنیم.



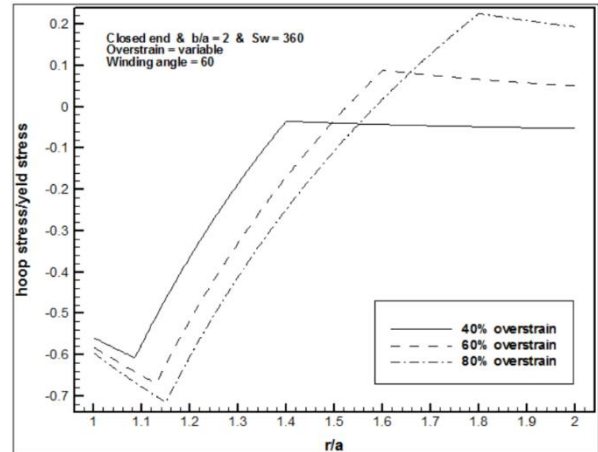
شکل ۱۶- نمودار تنش مماسی لوله تحت اتوفرتاژ ۷۰ درصد و حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲ و زاویه پیچش ۹۰ درجه با تغییر در تعداد لایه‌ها



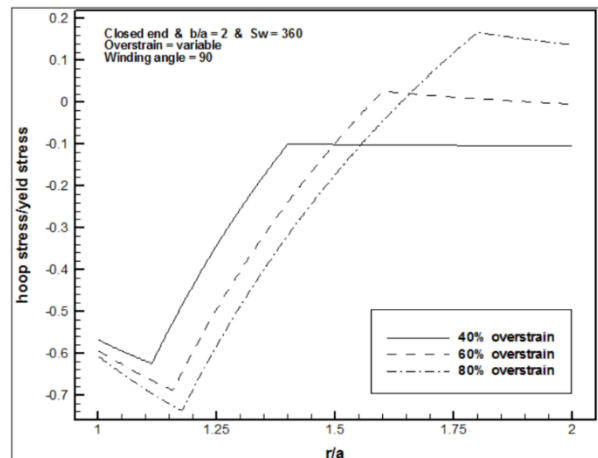
شکل ۱۷- نمودار تنش مماسی لوله تحت اتوفرتاژ ۷۰ درصد و حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲/۵ و زاویه پیچش ۶۰ درجه با تغییر در تعداد لایه‌ها



شکل ۱۸- نمودار تنش مماسی لوله تحت اتوفرتاژ ۷۰ درصد و حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲/۵ و زاویه پیچش ۹۰ درجه با تغییر در تعداد لایه‌ها

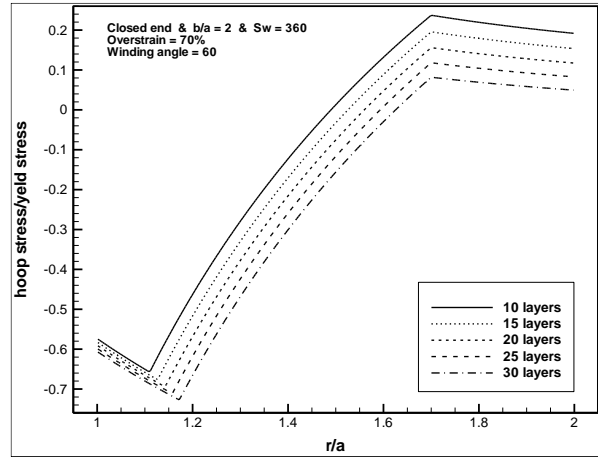


شکل ۱۳- نمودار تنش مماسی لوله تحت اتوفرتاژ ۴۰ و ۶۰ و ۸۰ درصد در حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲ تحت زاویه ۶۰ درجه



شکل ۱۴- نمودار تنش مماسی لوله تحت اتوفرتاژ ۴۰ و ۶۰ و ۸۰ درصد در حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲ تحت زاویه ۹۰ درجه

۳-۵- بررسی تنش‌های پسماند در لوله با تغییر در تعداد لایه‌های الیاف حال به مطالعه تغییرات تنش پسماند در اثر تغییر تعداد لایه‌های الیاف می‌پردازیم.



شکل ۱۵- نمودار تنش مماسی لوله تحت اتوفرتاژ ۷۰ درصد و حالت انتها بسته با نسبت قطر ۲ و زاویه پیچش ۶۰ درجه با تغییر در تعداد لایه‌ها



- 1852.
- [3] R.Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 1967
- [4] X. Huang, "A General Autofrettage Model of a Thick-Walled Cylinder Based on Tensile-Compressive Stress-Strain Curve of a Material," J. Strain Anal. Eng. Des., 40(6), pp. 599-608, 2005.
- [5] H. Jahed, R. Sethuraman and R. N. Dubey, "A Variable Material Property Approach for Solving Elastic - Plastic Problems," Int. J. pressure Ves. Piping, 71, pp. 285 - 291, 1997.
- [6] H. Jahed, , and R. N. Dubey, , "An Axisymmetric Method of Elastic - Plastic Capable of Predicting Residual Stress Field," ASME J. Pressure Vessel Technol., 119, pp. 264 -273, 1997.
- [7] A. P. Parker, "Autofrettage of Open -End Tubes – Pressures, Stresses, Strain, Code Comparisons," ASME J. pressure vessel Technol., 123, pp. 271-28, 2001.
- [8] G. H. Farrahi and E. Hosseinian and E. Assempour, "General Variable Mateial Property Formation for the solution of Autofrettaged Thick-Walled Tubes With constant Axial Strains, NOVEMBER, Vol. 130/04/1209-7, 2008.
- [9] M. Xia, K. Kemmochi and H.Takayanagi "Analysis of filament-wound fiberreinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading." Compos Struct;51:273-83, 2001.
- [10] H. Bakaiyan , H. Hosseini, E. Ameri "Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations" Composite Structures 88, 532-54, 2009.
- [11] M. Sedighi, A.H. Jabbari, "Investigation of residual stresses in thick-walled vessels with combination of autofrettage and wire-winding," Int. J. pressure Ves. Piping, 111-112, pp. 295-301, 2013.
- [12] A. P. Parker, E. Troiano and J. H. Underwood "Stresses Within Compound Tubes Comprising a Steel Liner and an External Carbon-Fiber Wrapped Laminate", J. Pressure Vessel Technol., 127(1), pp. 26-30, 2005.
- [۱۳] ک. خدامرادی، «مقایسه استحکام لوله‌های فولادی اتوفرتاژ شده با لوله‌های فولادی الیاف پیچ اتوفرتاژ شده»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ۱۳۹۶.
- [14] Gibson, M. C., Hameed, A., Parker, A. P., and Hetherington, J. G., "A Comparison of Methods for Predicting Residual Stresses in Strain-Hardening, Autofrettage Thick Cylinders, Including the Bauschinger Effect," ASME J. Pressure Vessel Technol., 128(2), pp. 217-222, 2006.

همانگونه که در شکل‌های (۱۸-۱۵) مشاهده می‌شود، تنش پسماند فشاری در داخل لوله با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش پیدا می‌کند و از طرف دیگر تنش کششی خارج لوله کاهش پیدا می‌کند که هر دو صورت اثر مطلوب در افزایش استحکام لوله دارد. ضمناً افزایش تعداد لایه‌های الیاف باعث افزایش قطر خارجی لوله (که از معیارهای طراحی است) می‌شود که خود جزء معایب آن بحساب می‌آید. این نتایج در مورد هر دو نسبت قطری تقریباً یکسان است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش از لوله فولادی اتوفرتاژ شده الیاف پیچ شده که الیاف آن از جنس خود لوله می‌باشد استفاده شده است. در این بررسی تاثیر انواع زوایای الیاف پیچی و تغییرات درصد اتوفرتاژ و ابعاد لوله و کشش اولیه الیاف و تعداد الیاف مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصله به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- در لوله فولادی الیاف پیچ شده با افزایش زاویه الیاف قدر مطلق تنش پسماند فشاری در سطح داخلی لوله بیشتر می‌شود و تنش پسماند کششی در سطح خارجی کاهش می‌یابد.

۲- ابعاد لوله مورد استفاده بعنوان یک پارامتر طراحی بسیار حائز اهمیت است. نتایج حاصله بیانگر این است که در یک فشار اتوفرتاژ مشخص لوله حاصل از روش تلفیقی دارای استحکام بالاتری نسبت به لوله فولادی اتوفرتاژ شده می‌باشد.

۳- با افزایش کشش اولیه الیاف، قدر مطلق تنش پسماند فشاری در سطح داخلی لوله بیشتر می‌شود و تنش پسماند کششی در سطح خارجی کاهش می‌یابد.

۴- در کلیه موارد روند نتایج برای نسبت قطری ۲/۵ بسیار مشابه نسبت قطری ۲ ارزیابی می‌شود.

۵- در مورد لوله‌های فولادی به دلیل ناپایداری لوله و ترس از شکست اتوفرتاژ صد درصد امکان پذیر نمی‌باشد و همچنین اتوفرتاژ بالای ۷۰٪ تاثیر چندانی در افزایش تنش‌های پسماند داخلی ندارد ولی تنش پسماند کششی را دچار تغییرات زیادی می‌نماید که مطلوب نیست. بنابراین پیشنهاد می‌شود اتوفرتاژ بین بازه ۶۰ الی ۷۰ درصد انجام شده و جهت بهبود کارایی از الیاف پیچی استفاده شود. این امر تنش پسماند فشاری داخلی را بهبود می‌بخشد و چندین برابر آن موجب بهبود تنش پسماند کششی می‌شود.

۶- تصمیم گیری نهایی در زمینه جایگزینی لوله فولادی اتوفرتاژ شده با لوله تلفیقی اتوفرتاژ شده به معیارهای طراحی نظیر کاهش وزن، اندازه قطر خارجی، تنش پسماند داخلی و تنش پسماند خارجی بستگی دارد. هر کدام از آنها و یا تلفیقی از آنها در این تصمیم گیری مهم است. استفاده از لوله‌های کامپوزیتی در مواردی مانند لوله‌های تحت فشار در هواپیما که کاهش وزن قطعه اهمیت بسزایی دارد، نسبت به لوله فولادی ارجحیت دارد.

#### مراجع

- [۱] ع. حسینیان، «ارائه مدل رفتاری فولاد ۱,۶۹۵۹DIN و تعیین تنش‌ها در لوله‌های جدار ضخیم اتوفرتاژ شده»، پایان نامه دکتر، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷
- [2] G.Lamé, "Lecons sur la Théorie de L'élasticité," Paris,