

تجزیه و تحلیل مکانیکی انبر حمل مواد خطرناک

ابوالفضل ابراهیمی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان
 abbas_ebr_286@yahoo.com

بیژن بابازاده، کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

سید مصطفی میرباقری، کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مصطفی نورمحمدی، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت
 mo_nourmohammadi@iust.ac.ir

چکیده

انبر حمل مواد خطرناک ابزاری است که برای افزایش ایمنی و کاهش خسارت‌های جانی استفاده می‌شود. از جمله موارد کاربرد این وسیله جابه‌جایی مواد شیمیایی و مواد محترقه و منفجره خطرناک است که با توجه به داشتن بازوی مکانیکی با سه درجه آزادی و دوربین با قابلیت دید در تاریکی مطلق قادر است اجسام خطرناک را با وزن حداکثر شش کیلوگرم بگیرد و با استفاده از سه پایه چرخ‌دار به محل مناسب انتقال دهد. در این مقاله تحلیل سازه‌ای انبر به روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار کاس موس، انجام می‌شود. البته، در پاره‌ای از موارد جهت صحت‌گذاری نتایج عددی تحلیل المان محدود از روابط تحلیلی نیز استفاده شده است. برای محاسبه مشخصات مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی از آزمون مکانیکی سه‌نقطه استفاده شده است. در نهایت حداکثر بار قابل حمل توسط انبر محاسبه و روش‌هایی برای افزایش این مقدار پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: انبر حمل مواد خطرناک، لوله کامپوزیتی، روش المان محدود

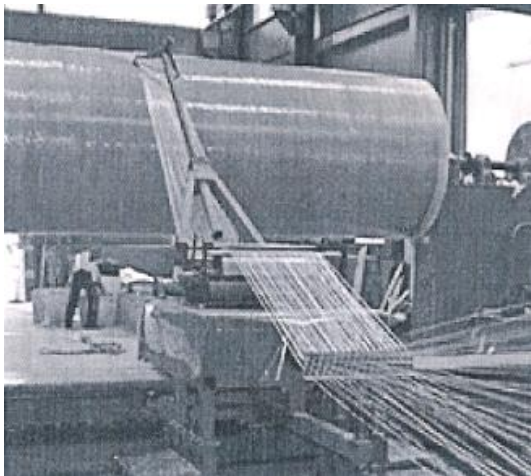
مقدمه

سالانه تعداد زیادی از متخصصان خبره در حین خنثی‌سازی و جابه‌جایی مین‌ها یا بمب‌های عمل‌نکرده و اتفاقات مشابه دیگر، در سراسر جهان، قطع عضو می‌شوند و یا جان خود را از دست می‌دهند. لذا، امروزه در بسیاری از کشورهای جهان، به‌خصوص ایران، تجهیزات پیشرفته‌ای جهت

کاهش خطرات انسانی ساخته می‌شوند. این تجهیزات به دو دسته EOD^۱ و IED^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]. انبر حمل مواد خطرناک از جمله ابزارهایی است که جهت افزایش امنیت و کاهش خسارت‌های جانی کاربران به‌هنگام جابه‌جایی مواد منفجره و شیمیایی خطرناک استفاده می‌شود. طول این دستگاه ۴/۲ متر است (شکل ۱) و



می‌شود. سپس الیاف و یا نوار آغشته به رزین به‌دور آن پیچیده می‌شود.



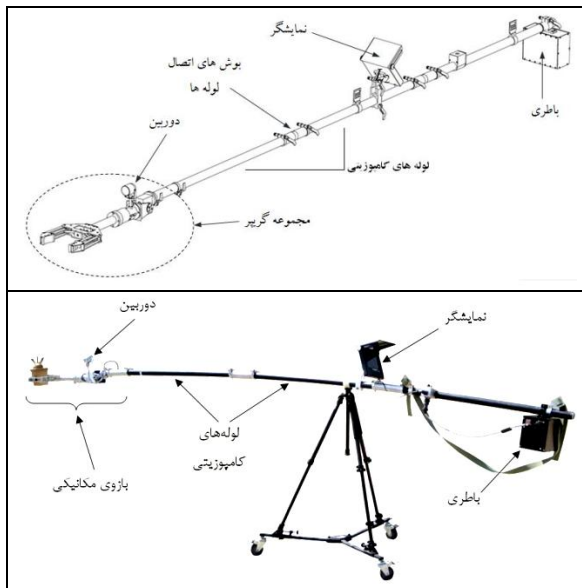
شکل ۲. نمایی از فرایند رشته‌پیچی الیاف در ساخت یک لوله کامپوزیتی [۲]

خواص مکانیکی لوله ساخته‌شده به‌کمک این روش به موارد گوناگونی بستگی دارد. مواردی چون:

۱. جنس و نوع الیاف به‌کار رفته
۲. جنس رزین مورد استفاده
۳. زاویه پیچش الیاف
۴. نسبت حجمی مواد به‌کار رفته در ساخت لوله
۵. سرعت و کشش اعمال‌شده در هنگام اجرای فرایند
۶. سیکل پخت لوله براساس محدوده پیشنهادی برای پخت رزین

این موارد در خواص نهایی لوله موردنظر مؤثر است. مهندسان طراح نیز معمولاً براساس معادلات حاکم بر رفتار سازه‌های کامپوزیتی چندلایه و دوار، این موارد را تعیین می‌کنند [۲]. در این مقاله، از روش نوارپیچی برای ساخت لوله کربنی استفاده شده است. نوار کربنی با خاصیت ارتوتروپیک^۵ پیش از پیچش با یک رزین هواپخت آغشته و به‌دور مندرل طراحی‌شده پیچیده شده است. قطر بیرونی مندرل مطابق با قطر داخلی لوله است. گفتنی است

قابلیت بلندکردن اشیائی تا وزن شش کیلوگرم را دارد. انبر دارای بازویی مکانیکی با سه درجه آزادی است. فک آن نیز قابلیت باز و بسته‌شدن، چرخش و پیچش خودکار را دارد.



شکل ۱. انبر حمل مواد خطرناک

از دیگر ویژگی‌های این دستگاه دوربین و نمایشگری است که می‌تواند در محیط‌های تاریک کار کند و قابلیت گرفتن و بلندکردن اجسام خطرناک را از راه دور به‌وجود آورد. سه‌پایه چرخ‌دار آن نیز حرکت و جابه‌جایی را آسان‌تر کرده است. در ساخت مجموعه انبر، قطعات مکانیکی از چهار نوع ماده کامپوزیتی، آلومینیوم گرید ۵۰۸۳ فولاد St37 و آلیاژ فسفر برنز استفاده شده است.

لوله حامل کامپوزیتی

به‌دلیل سبک‌سازی مجموعه انبر و در عین حال حفظ استحکام و خیز مناسب، از لوله‌های کامپوزیتی به‌عنوان تیر حامل بار استفاده می‌شود. به‌طور کلی، در ساخت لوله‌های کامپوزیتی از دو روش رشته‌پیچی الیاف^۳ و نوارپیچی^۴ استفاده می‌شود. در هر دو روش، دستگاه فیلامنت و ایندینگ (شکل ۲) که از جمله دستگاه‌های کنترل عددی است، به‌کار برده می‌شود [۲]. در این روش یک قالب به فرم و ابعاد داخلی لوله موردنظر، موسوم به مندرل، ساخته

$$\sigma_Y = \frac{\left(\frac{1000 \times 1}{4}\right) \times \left(\frac{0.0389}{2}\right)}{\frac{\pi}{64}(0.0389^4 - 0.034^4)} = 103.89 \text{ MPa}$$

همچنین خیز بیشینه تیر مذکور به صورت نظری از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$\Delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (3)$$

با قراردادن $\Delta=17 \text{ mm}$ ، مدول الاستیسیته کامپوزیت برابر با $E=2.62 \times 10^{10}$ به دست می‌آید [۳]. نتایج این آزمون در جدول ۱ آمده است. جدول ۲ نیز مشخصات مکانیکی مواد به کار رفته در انبر را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج تست سه نقطه‌ای لوله

نمونه مورد آزمون	ابعاد میلی‌متر	نیروی تسلیم نیوتن	خیز تسلیم میلی‌متر
نمونه با ابعاد واقعی	L=1000 D _i =34 D _o =38.9	1000	17
نمونه با ابعاد استاندارد	L=300 D _i =34 D _o =38.9	970	1.8

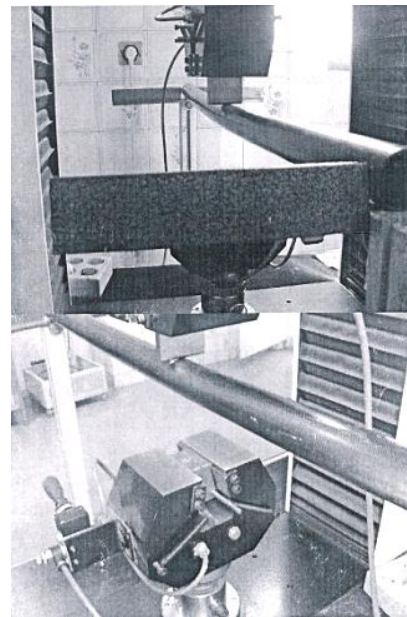
جدول ۲. مشخصات مکانیکی مواد به کار رفته در انبر

ماده	چگالی کیلوگرم بر متر مکعب	تنش تسلیم مگاپاسکال	مدول الاستیسه گیگاپاسکال
کامپوزیت الیاف کربنی	۱۸۰۰	۱۰۴	۲۶/۲
آلومینیوم گرید 5083	۲۶۸۰	۲۰۰	۷۰
فولاد St 37	۷۸۵۰	۲۳۵	۲۰۰
فسفر برنز	۸۷۸۰	۱۹۳	۱۱۰

نمونه‌های ساخته شده از رزین اپوکسی ۵۰۵۲ با پخت سرد و پارچه کربنی ریزبافت شرکت تی تکست ساخته شده‌اند.

تعیین خواص مکانیکی لوله کامپوزیتی

به منظور تعیین استحکام و سفتی نمونه‌های تولید شده، دو نمونه (یکی در ابعاد استاندارد D-2344 و دیگری با ابعاد واقعی اما به کمک فیکسچر) ساخته شد و تحت آزمون سه نقطه‌ای با دستگاه SANTAM مدل STM-150 قرار گرفت.



شکل ۳. نحوه انجام تست سه نقطه‌ای

برای استخراج مشخصات مکانیکی ماده تولید شده، ابتدا از روش تحلیلی استفاده می‌کنیم. تنش بیشینه تیر تحت بارگذاری نمایش داده شده از رابطه ۱ به دست می‌آید [۳]:

$$\sigma_{\max} = \frac{M(D_o/2)}{I} = \frac{(FL/4)(D_o/2)}{I} \quad (1)$$

به طوری که در این رابطه I ممان اینرسی مقطع لوله بوده، برابر با است با [۳]:

$$I = \frac{\pi}{64}(D_o^4 - D_i^4)$$

بنابراین تنش تسلیم، که معادل تنش بیشینه در شرایط آزمون شده بالاست، برابر است با:

شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری

در تحلیل پیش رو، تکیه‌گاه همواره در محل بوش اتصال اول (نزدیک باطری) در نظر گرفته می‌شود. چهار حالت گوناگون بارگذاری در این تحلیل مورد نظر می‌باشد که بیانگر حالات بحرانی عملکرد تیر است. شکل ۴ این چهار حالت را نمایش می‌دهد.

محاسبه تنش و خیز اجزای انبر

برای تحلیل سازه‌های اجزای انبر به روش المان محدود از تحلیلگر کاس‌موس استفاده شده است. اما با توجه به امکان بروز خطا در مدل‌های نرم‌افزای، توزیع تنش در برخی از قطعات با استفاده از روابط تحلیلی نیز محاسبه شده است تا از صحت نتایج عددی اطمینان حاصل شود. با توجه به اینکه تنش‌های موجود در انبر حمل مواد خطرناک در سه

قطعه از مجموعه بحرانی می‌باشد، محاسبات در مورد این قطعات صورت گرفت.

محور خروجی جعبه‌دنده و خار

محور خروجی جعبه‌دنده، که توسط فلنج‌هایی به قطعه U شکل متصل است (شکل ۵)، تحت بار پیچشی قابل توجهی قرار دارد. در بحرانی‌ترین حالت؛ یعنی زمانی که درجه آزادی اول زاویه صفر دارد، (حالت ۱ از شکل ۴) مقدار بار پیچشی به بیشترین حد خود می‌رسد. برعکس، زمانی که درجه آزادی اول ۹۰ درجه روبه پایین دوران کند، بار پیچشی صفر بوده، محور تنها بار برشی تحمل می‌کند. در ادامه تنش‌های به‌وجود آمده در این دو حالت محاسبه و سپس با مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل المان محدود، صحت نتایج به‌دست‌آمده بررسی می‌شود.

حالت بارگذاری	پیکربندی انبر
۱	
۲	
۳	
۴	

شکل ۴. حالت‌های متنوع بارگذاری انبر

شکل P نیروی وزن بار حمل‌شده، W وزن مجموعه قطعات بعد از جعبه‌دنده و T گشتاور پیچشی واردشده به محور از جانب جعبه‌دنده می‌باشد که توسط یک خار مستطیلی به محور منتقل می‌شود.

در حالت اول بارگذاری، بار پیچشی روی محور خروجی جعبه‌دنده غالب است و از بار برشی صرف‌نظر می‌شود. شکل ۶ نیروهای وارد به انبر و اثر پیچشی آنها روی محور خروجی جعبه‌دنده را نشان می‌دهد. در این

جدول ۳ مقادیر تنش ون مایسس به دست آمده برای محور خروجی جعبه دنده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه معیار شکست ون مایسس در پیشگویی رفتار پیچشی محورها دقت بالاتری دارد، در اینجا نیز از این معیار بهره می‌گیریم. تنش معادل ون مایسس برای محور تحت پیچش خالص از رابطه ۶ حاصل می‌شود [۲]:

$$\sigma_{von} = \sqrt{3} \tau_{max} \quad (6)$$

شکل‌های ۸ و ۹، به‌طور نمونه، نتایج حاصل از روش تحلیل المان محدود را در مورد محور خروجی جعبه دنده با دو نیروی وزنی ۵ و ۱۰ کیلوگرم فورس مقایسه کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این نتایج با نتایج حاصل از روش تحلیلی تطابق دارند، صحت مدل نرم‌افزاری ساخته شده را تأیید می‌کنند. حال به بررسی خار محور خروجی جعبه دنده می‌پردازیم. شکل ۱۰ دیاگرام آزاد محور به همراه خار را نشان می‌دهد. گشتاور اعمال شده به محور از طرف قطعه U شکل (گشتاور T) سبب به وجود آمدن نیروی برشی V در خار می‌شود. بنابراین نیروی برشی خار که عامل اصلی شکست خار خواهد بود، از رابطه ۷ به دست می‌آید:

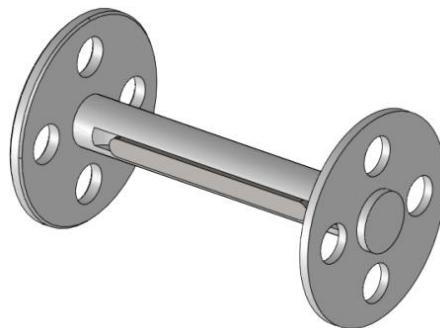
$$V = T / r \Rightarrow \tau = V / A \quad (7)$$

به طوری که در این رابطه τ تنش برشی به وجود آمده در مقطع خار می‌باشد. همچنین A مساحت ناحیه تحت برش مقطع خار است. ($A = 4 \times 50 \text{ mm}^2$)

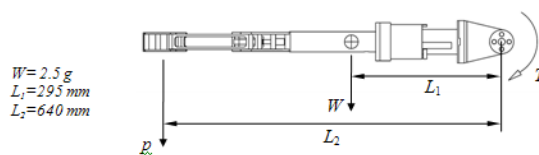
شکل ۱۱ نیز مقایسه بین نتایج تحلیلی با روش المان محدود صحت مدل نرم‌افزاری ساخته شده را نشان می‌دهد.

لوله کامپوزیتی

طول بلندلوله‌های کامپوزیتی و پایین بودن مدول الاستیسیته کامپوزیت در مقایسه با مواد دیگر، منشأ اصلی خیز در انبر لوله‌های کامپوزیتی خواهند بود. بنابراین در تحلیل خیز انبر می‌توان با تقریب بسیار خوبی دیگر



شکل ۵. محور خروجی جعبه دنده و خار مستطیلی



شکل ۶. دیاگرام آزاد انبر (قطعات بعد از جعبه دنده)

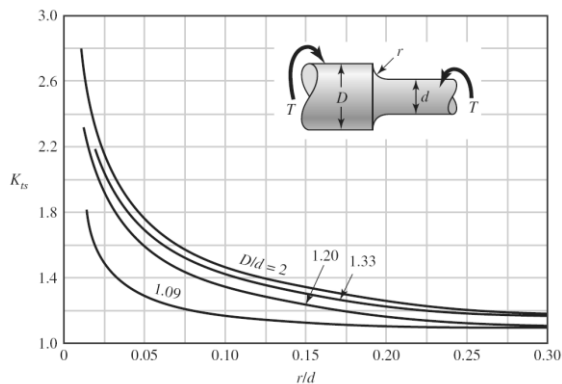
گشتاور وارده به محور از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\sum M_A = 0 \rightarrow pL_2 + WL_1 = T \quad (4)$$

تنش برشی بیشینه روی محور نیز عبارت است از:

$$\tau_{max} = K_{ts} \frac{(T/2)r}{J} \quad (5)$$

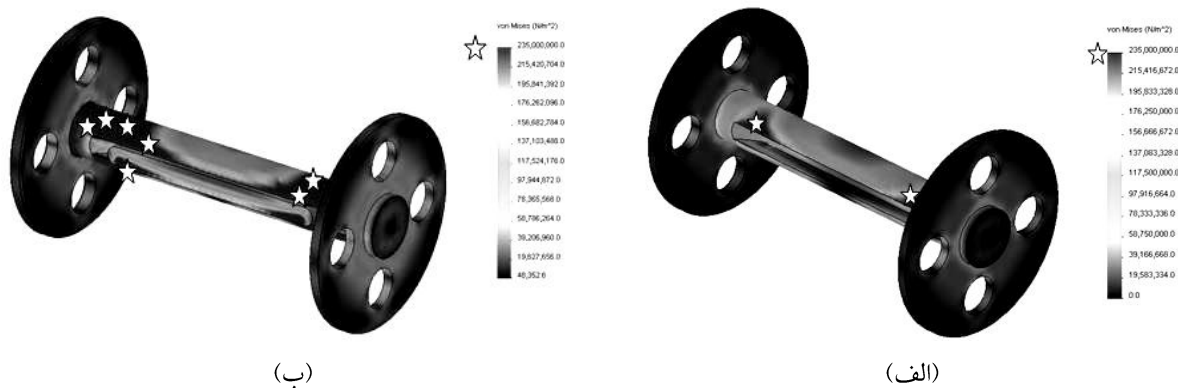
به طوری که در این رابطه r شعاع محور و J ممان اینرسی قطبی مقطع محور است [۲]. همچنین K_{ts} ضریب تمرکز تنش است که از تغییر مقطع ناگهانی محور ناشی می‌شود. با توجه به شکل ۷ این ضریب برابر با $1/4$ در نظر گرفته می‌شود.



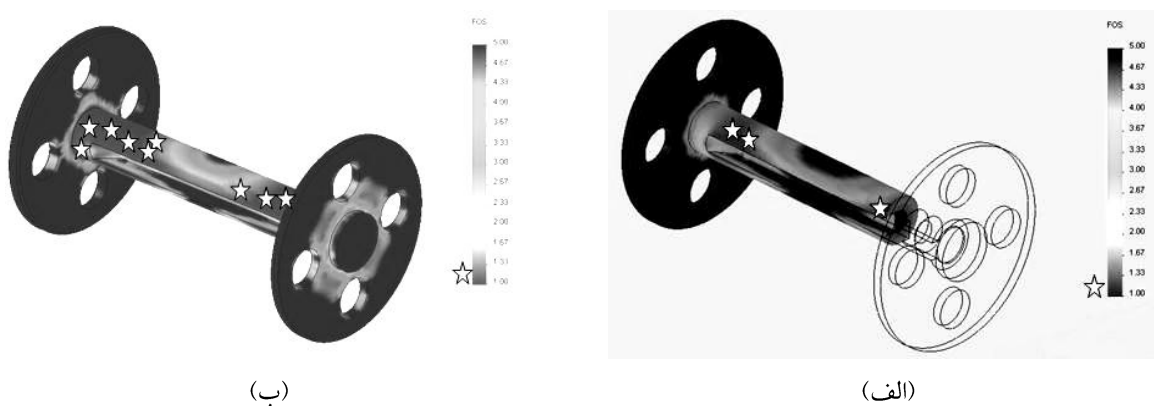
شکل ۷. ضریب تمرکز تنش برای محور دوپله تحت پیچش

قسمتها را صلب در نظر گرفت و تنها خیر لوله‌های

کامپوزیتی را لحاظ کرد.



شکل ۸. نمودار تنش ون‌مایسس؛ الف) نیروی وزنی ۵ کیلوگرم فورس، ب) نیروی وزنی ۱۰ کیلوگرم فورس



شکل ۹. نمودار توزیع ضرایب اطمینان؛ الف) نیروی وزنی ۵ کیلوگرم فورس، ب) نیروی وزنی ۱۰ کیلوگرم فورس

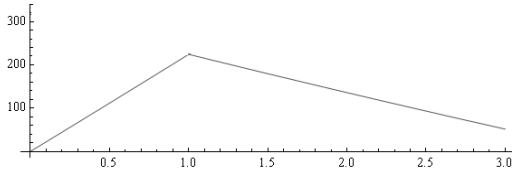


شکل ۱۰. دیاگرام آزاد محور خروجی جعبه‌دنده و خار مستطیلی

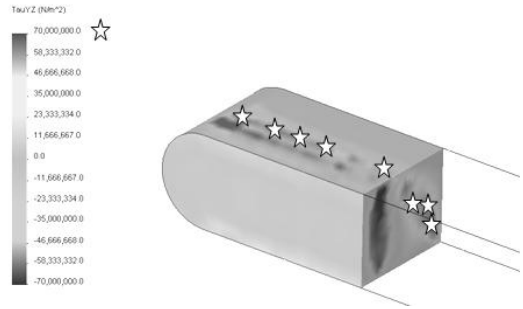
$$M_{AB}(x) = R_A x + \frac{mg x^2}{2}$$

$$M_{BC}(x) = W(d_1 + L - x) + p(d_2 + L - x) + \frac{mg}{2}(L - x)^2$$

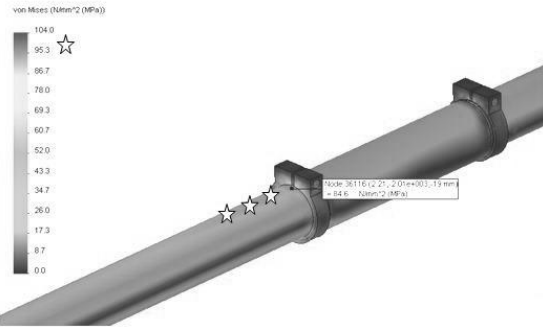
شکل ۱۲ نمایی شماتیک از انبر به همراه دیاگرام آزاد آن را نمایش می‌دهد. در این شکل p بار حمل‌شده، W وزن قسمت گریپر (تمامی بخش‌های بعد از فلنج خروجی) و m جرم لوله کامپوزیتی بر واحد طول آن می‌باشد. با بهره‌گیری از معادلات تعادل [۲]، عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی بدین صورت به دست می‌آیند:



شکل ۱۳. نمودار تغییرات ممان خمشی در طول لوله‌های کامپوزیتی برای بار ۵ کیلوگرم



شکل ۱۱. نمودار توزیع تنش برشی برای خار مستطیلی

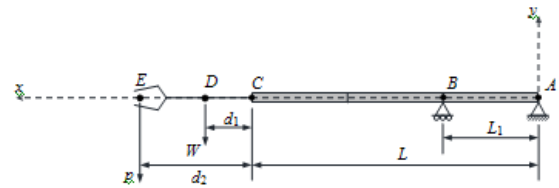


(الف)



(ب)

شکل ۱۴. نمودار توزیع تنش ون مایسس برای لوله‌های کامپوزیتی



شکل ۱۲. نمایی شماتیک از انبر و دیاگرام آزاد آن

(اجزای بعد از فلنج خروجی صلب فرض شده‌اند)

همچنین ممان خمشی وارد بر مقطع لوله عبارت است از:

$$M_{AB}(x) = R_A x + \frac{mgx^2}{2}$$

$$M_{BC}(x) = W(d_1 + L - x)$$

$$+ p(d_2 + L - x) + \frac{mg}{2}(L - x)^2$$

شکل ۱۳ نمودار تغییرات ممان خمشی را در طول لوله نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بیشینه ممان در محل تکیه‌گاه ظاهر می‌شود. جدول ۴ تنش بیشینه به‌وجود آمده در لوله را به‌دست می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بار مجاز برای اینکه لوله‌ها به نقطه تسلیم نرسند، حدود ۵ کیلوگرم می‌باشد.

در شکل ۱۴ نتایج حاصل از روش المان محدود برای لوله‌ها در دو حالت وزنه ۳ کیلوگرم و ۵ کیلوگرم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از روش المان محدود مؤید روش تحلیلی می‌باشند.

جدول ۴. ممان خمشی و تنش بیشینه در مقطع لوله‌های کامپوزیتی

F.S.	σ_{max} مگاپاسکال	M_{max} نیوتن متر	P کیلوگرم فورس
۱/۸۲	۵۷	۱۱۳	۱
۱/۲۲	۸۵	۱۶۹	۳
۰/۹۲ (تسلیم)	۱۱۳	۲۲۴	۵

اینرسی مقطع لوله را به همراه دارد. با توجه به اینکه تنش با ممان اینرسی نسبت عکس دارد، این افزایش قطر کاهش ۴۰ درصدی تنش‌ها را به دنبال خواهد داشت.

قدردانی

ضمن تشکر و قدرانی از تمامی عزیزانی که در نگارش این مقاله ما را یاری نمودند، این اثر را به آنان که بی‌تکلف و بدور از هیاهو جان خود را در گرو ایجاد سرزمینی سبز و اطمینان نهاده و در جدال با دشمن خاموش (مین) می‌باشند، تقدیم می‌کنیم.

جدول ۳. تنش ون مایسس بیشینه روی محور خروجی جعبه‌دنده

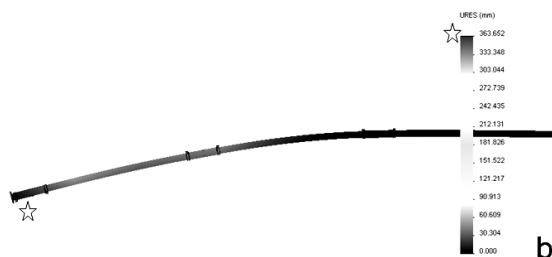
F.S.	تنش ون مایسس مگاپاسکال	تنش برشی ماکزیمم مگاپاسکال	گشتاور پیچشی نیوتن متر	نیرو کیلوگرم فورس
۳/۷	۶۳/۲	۳۶/۵	۱۳/۶۳	۱
۱/۹	۱۲۱	۶۹/۸	۲۶/۱	۳
۱/۳	۱۷۹	۱۰۳	۳۸/۶	۵
مرز تسلیم	۲۳۷	۱۳۷	۵۱	۷
تسلیم	۳۲۵	۱۸۷	۷۰	۱۰
مرز شکست	۳۶۸	۲۱۲	۷۹	۱۱/۵

جدول ۵. قطعات بحرانی انبر

نام قطعه	جنس	بار بیشینه قابل حمل کیلوگرم فورس
محور خروجی جعبه‌دنده	فولاد St 37	۷
خار مستطیلی	فولاد St 37	۱۰
لوله‌های کامپوزیتی	کامپوزیت الیاف کربن	۵



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. نمودار توزیع جابه‌جایی لوله‌های کامپوزیتی (الف) وزنه ۳ کیلوگرم فورس، (ب) وزنه ۵ کیلوگرم فورس

جمع‌بندی

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده در مورد تنش‌های بحرانی به‌وجود آمده در کلیه اجزای انبر به این نتیجه رسیدیم که این تنش‌ها در مورد سه قطعه بحرانی بوده، مابقی قسمت‌ها با ضرایب اطمینان بالایی تحمل بار می‌کنند. جدول ۵ این قطعات را به همراه بیشینه بار قابل تحمل نشان می‌دهد. با اصلاح این سه قطعه می‌توان ظرفیت حمل بار انبر را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

(۱) در مورد خار مستطیلی و محور خروجی جعبه‌دنده می‌توان با تغییر فولاد مورد استفاده، تنش تسلیم را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.


(۲) در مورد محور خروجی جعبه‌دنده با افزودن یک ماهیچه به محل اتصال محور به فلنج، می‌توان تمرکز تنش را تا حد زیادی کاهش داد.

(۳) در مورد لوله‌های کامپوزیتی، که بیشترین عامل محدودکننده‌اند، می‌توان با افزایش ضخامت دیواره لوله ظرفیت حمل بار را به میزان لازم بالا برد. مثلاً افزایش ۲ میلی‌متری قطر خارجی لوله، افزایش ۱/۶۳ برابری ممان



1. explosive ordnance disposal
2. improvised explosive device
3. filament winding
4. tape winding
5. orthotropic
6. TETEXT Co

- [1]. Bean, ph; "A guide to the Mine action standard", Geneva International Center for Humanitarian Demining, Geneva, Switzerland, April, 2006, pp.1-7.
- [2]. Kelly. A, Yu. N . Rabotonov, *Handbook of Composites*, First edition, Voulume 4, North – Holand – Amesredam, New York, Oxford, 1983, pp. 111 – 172.
- [3]. Beer, F. P, Johnston, E. Russell, *Mechanics of Material*, Toronto, McGraw-Hill, 1985.




انجمن سازندگان تجهیزات صنعت نفت
SIPIEM


شرکت بهران مبدل (سهامی خاص)

BEHRAN MOBADDEL Co.(pjs)


طراحی و ساخت تجهیزات مکانیکی ثابت پالایشگاهی، نیروگاهی، پتروشیمی، شیمیایی و تاسیسات




Heating | Cooling




کواهینامه مدیریت کیفیت
ISO9001:2000




انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME



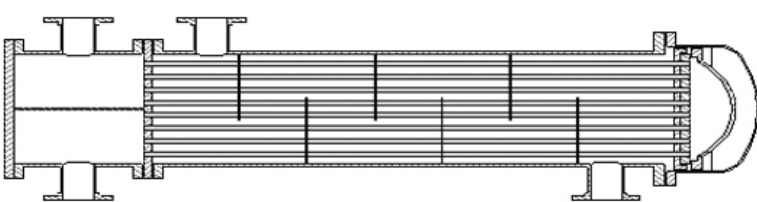
انجمن صنعت تاسیسات
ISHRAE



جامعه کیفیت ایران



انجمن تخصصی تحقیق و توسعه صنایع و معادن



- ✓ Heat exchanger
- ✓ Reactor&Mixers
- ✓ Pressure Vessels&Storage Tank
- ✓ Tank Heater
- ✓ Deaerator & Air Separator
- ✓ Flash Tank&Blow down&Condensate Tank
- ✓ Water Softener&Sand Filter

- ✓ مبدلهای حرارتی ویرودتی
- ✓ انواع راکتور و میکسر
- ✓ مخازن تحت فشار و ذخیره
- ✓ مخازن آبگرمکن کویلدار
- ✓ دی اریاتور و جداکننده هوا از آب
- ✓ مخازن چینی تاسیسات بخار
- ✓ سختی گیر و فیلتر شنی

بهران مبدل سفارش مشتریان را با کیفیت و گارانتی عرضه مینماید.

www.bهرانmobadde.com

دفتر مرکزی: تهران - بزرگراه رسالت - مابین رشید و زرین - روبروی پمپ بنزین رشید - ساختمان شماره 243 - طبقه سوم - واحد 16
کارخانه: کیلومتر 30 جاده سمتان - شهرک صنعتی عباس آباد - بلوار خیام - خیابان جامی - خیابان تاک

Tel : (0098 21) 77715391,2 & 77706926,7 Fax : (0098 21) 77873951
(0098 292) 3424575,6 & 3424991-4 (0098 292) 3424577

Email: info@bهرانmobadde.com

