



خودکفایی در صنعت مشبک‌های کامپوزیتی در صنعت نفت

علی میرزاآقایی^۱ دانشجویی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 دکتر کرامت ملک زاده^۲ دکترای مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 دکتر جعفر اسکتری جم^۳ دکترای مهندسی مکانیک- دانشگاه آنا هند

مقدمه

امروزه استفاده از سازه‌های کامپوزیتی در صنایع نفت و گاز به دلیل وزن کم و استحکام بالای آنها اهمیت زیادی یافته است. بر همین اساس پلیمرهای تقویت شده با الیاف، به علت قدرت بالا و منحصر به فردشان کاربرد وسیعی یافته‌اند. ساختارهای سیلندری ساخته شده از مواد کامپوزیتی به طور وسیعی در صنایع پایین دستی نفت استفاده می‌شوند؛ مخازن CNG، مخازن حامل سوخت و خطوط انتقال نفت و گاز همچنین لوله‌های مورد استفاده در چاه‌های نفتی جهت استخراج نفت بعضی از کاربردهای فراوان این ساختارها در صنعت نفت هستند.

سیلندرهایی تقویت شده‌ی مشبک سیلندرهایی هستند که از نوع بخصوصی از ساختارهای تقویت کننده در جهات درونی و بیرونی پوسته خود برخوردارند. با داشتن تقویت کننده‌ها به طور قابل توجهی مقاومت بار سیلندر بدون افزایش زیاد وزن، افزایش می‌یابد. برای کاهش وزن بیشتر پوسته، در ساخت تقویت کننده‌ها از پلیمرهای تقویت شده‌ی با الیاف استفاده می‌شود. ساختار تقویت کننده می‌تواند رده‌بندی رشته‌ای و حلقه‌ای یا یک الگوی ایزوگرید (تک شبکه‌ای) پیچیده‌تری داشته باشد. نوع

بهینه ترکیب بندی تقویت کننده‌ها توسط نوع کاربرد، شرایط بارگیری، قیمت و دیگر عوامل دیکته می‌شود. به کارگیری لوله‌های کامپوزیتی جهت انتقال سیال دارای مزایای زیادی از جمله سرعت زیاد نصب، عمر طولانی، سرعت انتقال زیاد سیال و... است. این مقاله در ابتدا ضمن برشمردن مزایای استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع نفتی از جمله لوله‌های انتقال نفت و گاز، به بررسی ویژگی مهم و منحصر به فرد سیلندرهای کامپوزیتی تقویت شده با تقویت کننده‌های

ستاره‌ای شکل (مشبک) خواهد پرداخت که علاوه بر دارا بودن تمام ویژگی‌های مربوطه، در مقابل نیروهای وارد شده بر سازه از جمله تنش، کرنش و کماتش از استحکام بالایی نیز برخوردار است. به طور کلی ویژگی‌های اصلی لوله‌های کامپوزیتی را می‌توان در شش مورد خلاصه نمود: عمر طولانی، مقاومت در برابر خوردگی، وزن کم، تحمل فشار بالا، سهولت تولید و تحمل دمای بالا. در این مقاله ضمن معرفی مختصری از



۱ | شبکه استاندارد تقویت کننده‌ی کامپوزیتی سیلندر



سیلندرهای کامپوزیتی، آنالیز نیرو و گشتاور وارد بر این نوع سازه‌ها و معادلات مربوطه بررسی می‌گردد. همچنین مدل‌سازی انجام گرفته با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود معرفی خواهد شد. در انتها، با بیان نحوه مش‌بندی، بارگذاری و شرایط مرزی مدل، به ارائه روش حل پرداخته، نتایج بدست آمده تحلیل می‌گردد.

۱- مروری بر مقالات

طی ۴ دهه گذشته تحقیقات بسیاری در مورد کمانش، شکست و رفتار کمانشی تقویت‌کننده‌ها و پوسته‌های لوله‌ای و سیلندری شکل انجام شده است. بخش مهم این تحقیقات را مطالعه‌ی متمرکز لوله‌های تقویت شده تشکیل می‌دهد. ساده‌ترین لوله‌های تقویت‌شده، فقط دارای تقویت‌کننده‌های محوری است. ساختار حلقه‌ای می‌تواند به استرینگرها برای حصول یک ترکیب آرتوگراید تقویت‌شده اضافه شود. در تحقیق انجام شده توسط «گراهام»^۱ آنالیز مدل برای تعیین بارهای کمانشی از حلقه و استرینگر ارائه گردیده است. نوع دیگری از رده‌بندی تقویت‌کننده‌ها رده‌بندی جانبی است. این حالت، به مدل الماسی شکل تقویت‌کننده‌ها منحصراً می‌گردد. «فیلیپ و گردال»^۲ در پژوهش‌های خود به نام «تحلیل ساختاری و طراحی بهینه‌ی ژئودیسکالی پنل‌های کامپوزیت تقویت‌شده»^۳ در مورد روش اندازه‌گیری میزان بار تعادلی سراسری این نوع پنل‌های تقویت‌شده بحث می‌کنند. سیلندر لوله‌های تقویت‌شده‌ی ایزوگراید که موضوع اصلی این مقاله است، شامل تقویت‌کننده‌های متقاطع در $\pm 60^\circ$ درجه و تقویت‌کننده‌های افقی است. این رده‌بندی منجر به الگوی توزمی تقویت‌کننده به شکل مثلث متساوی‌الساقین است. از کارهای تحقیقی که قبلاً انجام شده به نظر می‌رسد که سازه‌های

ایزوگراید از سازه‌های اورتوگراید کارا تر است. ابزار تحلیلی متفاوتی توسط محققان برای پیش‌بینی موفق سه حالت تعادل ناپایدار مرتبط با لوله‌های تقویت‌شده ارائه گردیده است.

۲- معرفی سازه‌های مشبک کامپوزیتی

سازه‌های تقویت‌شده به وسیله‌ی پوسته‌های مشبک، سیلندر لوله‌هایی هستند که از نوع معینی از ساختارهای تقویت‌کننده در جهات درونی و بیرونی پوسته خود برخوردار می‌باشند.

روش‌های تولیدی جدید در رشته پیچی و روش‌های جایگزینی فیبری خودکار، مشکلات تولید را کاهش داده است. از این رو کاربرد این نوع سیلندر لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده، بسیار افزایش یافته است به طوری که در حوزه‌ی نفت و در ساخت خطوط انتقال نفت و گاز روز به روز بر میزان کارایی آنها افزوده می‌شود. تضمین آینده‌ی سیلندرهای کامپوزیتی تقویت‌شده در کشور، نیازمند انجام یک فعالیت تحقیقی بسیار وسیع است.

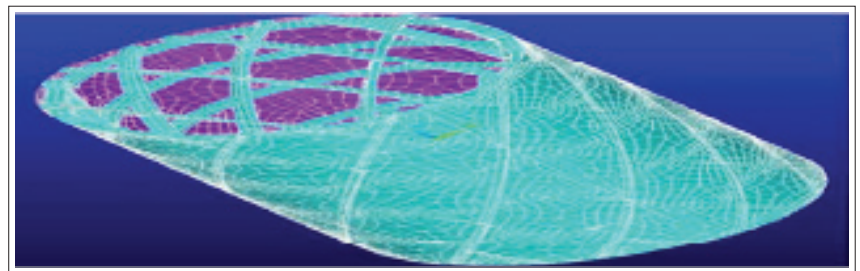
لوله‌ها، سیلندرها و سازه‌هایی از این دست همواره در معرض ترکیب‌های مختلفی از بارگذاری داخل صفحه یا خارج از صفحه یا نیروهای برشی اعمال شده قرار دارند و لزوم استحکام بالا در مقابل این نوع نیروها از جمله عوامل مهم و حیاتی در رتبه‌بندی آنها به‌شمار می‌رود. به سبب هندسه‌ی این ساختارها، کمانش یکی از مهمترین معیارهای شکست است. حالت کمانش یک پوسته‌ی سیلندری تقویت‌شده می‌تواند بعداً به کمانش کلی پوسته‌ی محلی منجر شود. کمانش کلی بسته‌شدن ساختار کلی پوسته و تقویت‌کننده‌ها در یک واحد است. پوسته‌ی محلی و موضعی و تقویت‌کننده‌ها از طرف دیگر در وضعیت شکست موضعی هستند که شامل

شکست موضعی پوسته یا تقویت‌کننده در دو حالت متفاوت است.

یک سازه کامپوزیتی (اعم از لوله یا سیلندر) که با استفاده از ریب‌های پوسته‌ی مشبک تقویت شده است، در هر یک از حالات شکست مرتبط با ترکیب‌بندی تقویت‌کننده‌ها، ضخامت پوسته، زاویه و نوع کمانش پوسته و بار استفاده شده دچار شکست خواهد شد. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی بارهای کمانشی متفاوت و انواع حالات سیلندرهای تقویت شده وجود دارد. رویکردهای متفاوت در نوشته‌های مختلف می‌تواند به‌عنوان روش‌های مجزای اعم از روش تماس پوسته‌ای، روش صفحه‌ای و روش تقویت‌کننده‌های آغشته‌شده قابل طبقه‌بندی باشد. در این مقاله یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی نیروی کمانشی لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده شبکه‌ای تحت شرایط بارگذاری یک بعدی ایجاد شده است. مدل ایجاد شده شامل هر حالتی از ترکیب‌بندی تقویت‌کننده‌ها بوده و در هر دو سوی پوسته قابل مدل‌سازی دقیق است. لوله‌های تقویت‌شده دارای ویژگی‌های پوسته‌ی هندسی و غیر هندسی بوده و به‌دقت می‌توان آنها را مدل‌سازی نمود.

۳- مدل‌سازی

یک مدل سه بعدی برای سیلندر کامپوزیتی تقویت شده با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ANSYS ساخته شد (شکل ۲). سیلندر مدل‌سازی شده دارای تقارن شعاعی 360° است. در ابتدا مقطع 360° مدل‌سازی گردید. سپس کل ساختار با استفاده از این بخش اولیه ایجاد شد. به عبارتی در ابتدا شبکه‌ی سازه‌ای ایجاد و سپس پوسته به این تقویت‌کننده اضافه گردید. تقویت‌کننده‌های $\pm 60^\circ$ درجه در بخش اولیه توسط ایجاد میله‌های ستاره‌ای دارای قطر خارجی برابر با قطر داخلی پوسته مدل‌سازی شدند. نقاط بالایی تقاطع تقویت‌کننده‌ها با انطباق جابجایی‌های متناظر مدل‌سازی شد. تقویت‌کننده‌ها در واقع شامل نقاطی می‌گردید که با الحاق گره‌های متقاطع بالایی تقویت‌کننده‌ها با نقاط متقاطع به هم کامل می‌شدند. فیبرهای موجود در تقویت‌کننده‌ها، در امتداد خود تقویت‌کننده قرار می‌گرفتند. در این قسمت سه جدول دقیق و در عین حال مختلف برای درجات





تقویت کننده‌ی ۶۰-۶۰ درجه در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین سیستم هماهنگی درون سیلندر، برای هر المان تعریف شده است که این امر با ویژگی‌های ارتوتروپیک تعبیه شده، کاملاً متناسب است. تقویت کننده‌هایی که حاوی ۲۰ رشته هستند و عناصر جامد لایه‌بندی شده در آنها وجود دارد، برای الگوبه کار گرفته شده‌اند (SOLID 191).

حاصل فرآیند رشته پیچی است که سطح آن از ته پیچی متناوب و متعدد $\pm 30^\circ$ حاصل شده است. این سطح از ۴ لایه متعدد تشکیل شده است و لایه‌ها از ۳۰ تا ۳۰ درجه به طور متوالی قرار گرفته‌اند. این سطح چهار لایه می‌تواند برای مدلی که لایه‌های زیادی دارد و به منظور آنالیز مقدماتی کمانش سطح سیلندرها تقویت نشده که تقارن‌های متفاوت $\pm 30^\circ$ دارند، استفاده شود. این سطح و سفت کننده‌ها، بر روی پوسته به هم چسبیده می‌شوند به طوری که المان‌های پوسته، به صورت خود کار با المان‌های جسم جامد، هم‌آهنگی پیدا می‌کنند. این پوسته، با ۸ گره برای المان لایه‌های پوسته مدل‌سازی شد (Sheel 99).

۱-۳-۱-۳ مش بندی

پوسته با المان‌های چهارضلعی مش بندی شده است؛ در حالی که تقویت کننده‌ها با المان‌های شش ضلعی مش بندی شده‌اند. تمام المان‌ها دارای گره‌هایی در وسط هستند و اندازه‌ی این نوع مش بندی‌ها هم بر روی پوسته و هم بر روی تقویت کننده ۴mm است. درجه آزادی این مش بندی‌ها بر مبنای محاسبات انجام گرفته انتخاب می‌شود. این مش بندی تقریباً باعث به وجود آمدن ۱۵۰ المان و ۲۵۰۰۰۰ درجه آزادی می‌شود.

۲-۳-۲ بارگذاری و شرایط مرزی

سیستم مختصاتی جهانی برای سیلندرها طوری تعریف شده است که سطح زیرین سیلندر بر روی صفحه‌ی X-Y قرار گرفته، محور Z بر محور سیلندر منطبق باشد. شرایط مرزی زیر نیز بر سیلندر تحمیل می‌شود:

(۱) جابجایی عرضی و شعاعی "v"، "w" در هر دو صفحه‌ی سیلندر صفر در نظر گرفته می‌شود (در $Z=0$ تا $Z=h$ ، $w=v=0$).

(۲) جابجایی محوری u، در سطح پایینی سیلندر،

صفر اما در بالاترین سطح، غیر صفر است. منظور از بالاترین سطح، جایی است که نیرو اعمال می‌شود. (در $Z=0$ ، $u \neq 0$ ، در $Z=h$ ، $u=0$)

فشار واحد یکنواختی بر سطح بالایی سیلندر ($Z=h$) وارد می‌شود. برای محاسبه‌ی نیروی کمانش، این فشار واحد در الف) سطحی که فشار به آن وارد می‌شود ضرب می‌شود، ب) در مقدار ویژه‌ای که از آنالیز کمانش بدست آمده ضرب می‌شود.

۳-۳-۳ حل مساله

تحلیل کمانش خطی، در نرم افزار اجزای محدود ANSYS، در دو مرحله صورت می‌گیرد؛ در مرحله‌ی اول، راه حل ثابتی برای سازه در نظر گرفته می‌شود. این تحلیل، تنش کمانشی سازه محاسبه می‌شود. گام دوم شامل حل کردن مساله‌ی مقدار ویژه‌ای است که معادله‌ی (۱) به ما می‌دهد.

$$([k] + \lambda_i [s]) \{\psi\}_i = \{0\} \quad (1)$$

که در آن:

ماتریس تقویت کننده $[k]$

ماتریس تنش تقویت کننده $[s]$

مقدار ویژه که برای ضرب نیروهای تولید شده استفاده می‌شود λ_i

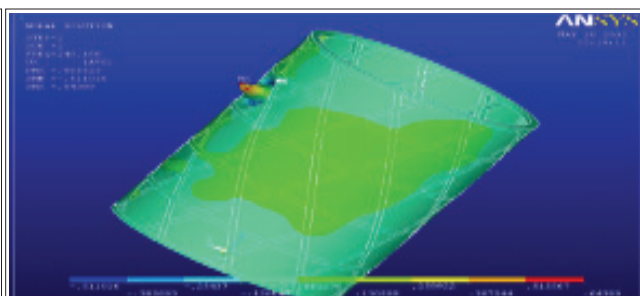
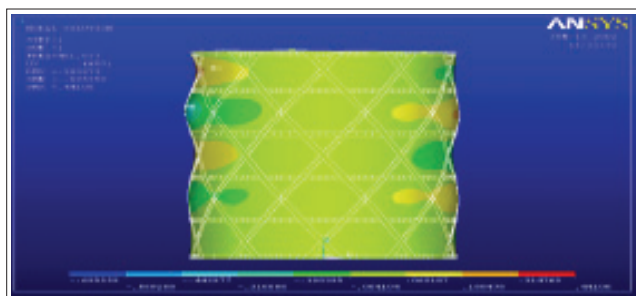
مقدار ویژه‌ی جابجایی ψ_i

روش «block lanczos» برای استخراج نتایج حاصل از معادله‌ی (۱) به کار گرفته شده است. مقدار ویژه‌ی برگرفته شده از تحلیل کمانش در واقع تابع عواملی است که نیروی واحد را اعمال می‌کند و در واقع این نیرو در آن ضرب می‌شود. به عنوان نتیجه، میزان بار ویژه‌ی کمانش، طبق معادله‌ی (۲) محاسبه می‌شود.

$$p_{cr} = (\lambda_i)_{min} AP \quad (2)$$

ویژگی‌های فیزیکی مدل

Composite system	IM7/977-2
Cylinder height	180 mm
Cylinder diameter	146 mm
Shell winding angle	$\pm 30^\circ$
Stiffeners orientation	$0, +60^\circ, +60^\circ$
Horizontal stiffener spacing	38.5 mm
Cross stiffeners spacing	42.5 mm
Stiffener cross section	$6 \times 2.8 \text{ mm}$

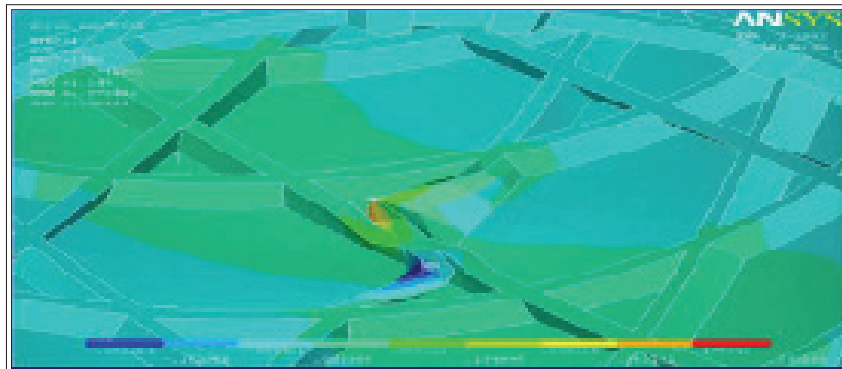


منتقل و به تدریج سراسر سازه دچار حالت شکست کمانش می‌شود. (شکل ۴)

تقریباً زمانی که ضخامت پوسته ۳ mm است به نظر می‌رسد که پوسته قویتر از تقویت کننده است. بنابراین خزش (لهیدگی) موضعی شروع به اتفاق افتادن می‌کند. تقریباً برای هر پوسته‌ای که بیش از ۳ mm ضخامت دارد، خزش (لهیدگی) موضعی تقویت کننده، حالت شکست غالب است (شکل ۵). در اینجا باید یاد آور شد که حالت شکست کمانشی سراسری مشاهده شده نتیجه‌ی بدست آمده برای یک سیلندر تقویت نشده نیست. این شکست منطقه‌ی جزئی از قطعه‌ی معینی از سیلندر را شامل می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که نقطه‌ی منحصر به فردی در سازه وجود دارد که در آن، حالت شکست، به طور ناگهانی برای حالت شکست کمانشی عوض شده، اما سریعاً شروع به حرکت بین حالات شکست کمانشی در همدیگر می‌کند.

جمع بندی

به کارگیری لوله‌های کامپوزیتی جهت انتقال سیال دارای مزایای زیادی است. به طور کلی ویژگی‌های اصلی لوله‌های کامپوزیتی را می‌توان در شش مورد خلاصه نمود: عمر طولانی، مقاومت در برابر خوردگی، وزن کم، تحمل فشار بالا، سهولت تولید و تحمل دمای بالا. موضوع استفاده از لوله‌های (سیلندرهای) تقویت شده با تقویت کننده‌های مشبک به ما این اجازه را خواهد داد تا در آینده در بخشی از خطوط انتقال نفت و گاز که نیاز به مقاومت و استحکام سازه بیش از سایر مولفه‌ها وجود دارد، بتوانیم لوله‌هایی با استحکام فوق‌العاده طراحی نماییم.



۵ | خزش (لهیدگی) تقویت کننده

تقویت شده‌ی کامپوزیتی به کار گرفته می‌شود که ویژگی‌های آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. برای بررسی سه نوع شکست کمانش، تحلیل‌های مختلفی در مورد پوسته‌هایی با ضخامت مختلف صورت می‌گیرد. در حالی که حفظ کننده‌ی بیشتر آنها تقویت کننده‌ها هستند. ضخامت پوسته از سه تا چهار میلی‌متر متغیر است. در اینجا مشاهدات حاصل از تحلیل‌ها، به علت طولانی شدن مقاله مطرح نمی‌گردد.

۳-۶-۳-۳ طریق‌های شکست

این سیلندر با نازک‌ترین ضخامت، یعنی ۳۰ mm کاملاً دچار شکست می‌شود. البته به دلیل کمانش سطح درونی زمانی که ضخامت سطح افزایش می‌یابد، حالت شکست هم به تدریج طبق کمانش سراسری تغییر می‌یابد تا جایی که به ۱/۵ mm می‌رسد. (شکل ۳) در این شرایط بر اساس کمانش منطقه‌ای پوسته، تقویت کننده‌های مجاور شروع به ایجاد کمانش کامل می‌کنند. با ضخیم‌تر شدن پوسته، تقویت کننده‌ها و پوسته شکست موضعی را به کلیه سلول‌های مجاور

$$P_{cr} = (A_p)_{min} AP$$

مقادیر میزان مقدار ویژه

A= کل مساحتی که فخر بر آن اعمال شده است

P= فشار اعمالی اولیه

۳-۴-۴ هم‌گرایی

هم‌گرایی تحلیل کمانش به منظور ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود است. بررسی هم‌گرایی طبق الگویی صورت می‌گیرد که یک مدل دارای تقویت کننده ۷۵ باشد. آنالیز کمانش برای این مدل، برای مش بندی نازک ۳ میلی‌متر، برای مش بندی متوسط ۴ میلی‌متر و برای مش بندی ضخیم ۵ میلی‌متر است.

همچنین، می‌توان بارهای کمانش بدست آمده را برای طراحی‌های با مش بندی نازک و متوسط که خیلی به هم نزدیک باشند، به کار برد و از آن برای ساخت تمام‌الگوها استفاده نمود.

۳-۵-۵ آنالیز نتایج

آنالیز اجزای محدود، برای سیلندرهای

پانویس‌ها

¹ Ali_m_ghaei@yahoo.com

² Graham

³ Phillip and Gurdal

منابع

- [1] Helms JE, Li G, Smith BH. Analysis of grid stiffened cylinders. ASME/ETCE 2001;
 [2] Navin J, Norman FK, Damodar R. Formulation of an improved smeared stiffener theory of buckling analysis of grid-stiffened composite panels. NASA Technical Memorandum 110162; June 1995.

- [3] Phillips JL, Gurdal Z. Structural analysis and optimum design of geodesically stiffened composite panels. Report NASA CCMS-90-50 (VPI-E-90-08), Grant NAG-1-643; July 1990.
 [4] Brush DO, Almroth BO. Buckling of bars, plates, and shells. New York, NY: McGraw-Hill; 1975.