

بررسی مراحل شکل دهی و ساخت جداره فلزی مخازن CNG به روش المان محدود

مهدی ظهور^{*۱}محسن رحیمیان^۲

* نویسنده مسئول: mzohoor@kntu.ac.ir

چکیده

از مخازن گاز طبیعی فشرده یا CNG، در انواع خودروها استفاده می‌شود. تولید انبوه این مخازن، به بررسی دقیق مراحل شکل دهی و پارامترهای مؤثر بر فرایند ساخت، در هر مرحله از شکل دهی نیاز دارد. از آن جا که مخازن تحت فشار، باید بدون درز ساخته شوند، روش ساخت جداره فلزی این نوع مخازن، شامل استفاده از یک بلانک اولیه و انجام عملیات شکل دهی کشش عمیق و بازکشش و نازک کاری و در نهایت شکل دهی چرخشی برای شکل دهی سر مخزن و گلویی آن می‌باشد. در این مقاله ابتدا به مقدمه‌ای از تاریخچه تولید این مخازن و روشهای ساخت آنها اشاره شده است. سپس از روش المان محدود، برای شبیه‌سازی مراحل اولیه شکل دهی جداره فلزی یک مخزن CNG آلومینیومی، استفاده شده است. شبیه سازی فرایند ساخت، شامل مراحل کشش عمیق سرد، بازکشش سرد و در نهایت، دو مرحله نازک کاری دیواره (بدون در نظر گرفتن شکل دهی چرخشی داغ، جهت بستن سر مخزن) می‌باشد. همچنین بین شبیه‌سازی مراحل شکل دهی، از فرایند بازپخت (آنیلینگ) جهت تنش زدایی استفاده شد. نیروی لازم برای شکل دهی و همچنین تغییر ضخامت بلانک در هر مرحله از شکل دهی مخزن، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی با نتایج منتشر شده توسط سایر محققان مقایسه و تطابق خوبی بین نتایج مشاهده شد.

کلمات کلیدی: کشش عمیق، بازکشش، نازک کاری، مخزن CNG، شبیه سازی المان محدود.

۱- استادیار- دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی و دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات.

۲- کارشناس ارشد- دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی.

۱- مقدمه

استفاده از گاز طبیعی فشرده شده در ایران به صورت روز افزون در حال گسترش است. به همین دلیل نیاز به ساخت مخازن گاز CNG به صورت گسترده‌ای احساس می‌شود. ساخت این مخازن دارای فرایندی پیچیده و پرهزینه و زمان‌بر است به صورتی که تنها برخی از کشورهای پیشرفته صنعتی در این پروژه به صورت گسترده سرمایه‌گذاری کرده‌اند. نیاز به ماشین‌ابزارهای دقیق، نیاز به مواد اولیه گران‌قیمت مانند انواع الیاف کامپوزیتی، نیاز به تکنولوژی ساخت از شکل‌دهی اولیه گرفته تا ساخت دیواره‌های چند لایه از مواد کامپوزیتی و در نهایت آزمون‌های مختلف کنترل کیفیت، ساخت این مخازن را با هزینه‌ها و سرمایه‌گذاری سنگین مواجه می‌کند. این آزمون‌ها عبارت‌اند از: تست فراصوتی، سختی سنجی، کنترل حجم، کنترل‌های کیفی لازم برای مخازن کامپوزیتی مانند کنترل رزین، عرض الیاف، کشش الیاف، آزمون‌های تحمل آسیب، آزمون‌های محیط، و آزمون‌های چرخه عمر. به کارگیری گاز طبیعی فشرده شده به عنوان سوخت وسایل نقلیه در مقیاس وسیع در دو دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ میلادی در ایتالیا و روسیه آغاز شد. مخازن اولیه، مخازن فولادی سنگینی بودند که با مشخصات صنعتی گوناگون ساخته می‌شدند، تا این که در اواخر سال ۱۹۷۰ میلادی با وضع مقررات جدید در ایتالیا، مخازن فولادی کم‌وزن به بازار عرضه شدند. در آمریکای شمالی نیز تبدیل سوخت وسایل نقلیه به گاز طبیعی در مقیاس وسیعی، از سال ۱۹۸۰ میلادی به بعد آغاز شد. مخازن سبک وزن ساخته شده از آستر فلزی پیچیده شده با الیاف شیشه‌ای که برای کاربردهای فضایی توسعه یافته بودند در سال ۱۹۷۷ میلادی به بازارهای صنعتی وارد شدند. در سال ۱۹۸۲ میلادی مخازنی که با آستر آلومینیومی با پیچش محیطی الیاف شیشه ساخته شده بود مورد استفاده قرار گرفتند. سازندگان این روند را برای طرح‌های سبک وزن تر با تولید کردن آسترهای فولادی پیچیده شده با الیاف شیشه‌ای که در سال ۱۹۸۵ میلادی آغاز شده بود، دنبال کردند. برای این که وزن مخزن را کاهش دهند، سازندگان بسیاری، طرح‌های کامپوزیتی کاملاً پیچیده‌ای را توسعه دادند و آسترهای فلزی یا پلاستیکی را برای مخازن محتوی گاز طبیعی فشرده شده به کار بردند. در اواخر دهه ۸۰ میلادی، کاربردهای عملی مخازن CNG

آسترهای پلاستیکی تقویت شده در سوئد، روسیه و فرانسه شروع شد. به دنبال توسعه استانداردهای مخازن گاز طبیعی در آمریکای شمالی، طرح‌هایی با آسترهای نسبتاً نازک آلومینیوم، با آسترهای پلاستیکی تقویت شده، پیچیده شده با پوشش الیاف شیشه و الیاف کربن بعد از سال ۱۹۹۲ میلادی به بازار معرفی شدند.

مخازن CNG معمولاً از ماده خام اولیه به سه شکل مختلف ورق، لوله یا شمشال تولید می‌شوند. بنابراین تولید این نوع مخازن با استفاده از سه شکل مختلف ماده اولیه، فرایند تولید متفاوتی را در پی خواهد داشت. در مرحله تولید این نوع مخازن، شکل دهی اولیه این مواد خام، بیشترین حجم تولید را به خود اختصاص می‌دهند. برای تولید مخازن فولادی یا آلومینیومی از ماده اولیه ورق، ابتدا ورق‌هایی از جنس مورد نظر انتخاب می‌شوند. بسته به ابعاد و الزامات طراحی، اندازه بلانک اولیه باید به گونه‌ای انتخاب شود تا کمترین دور ریز را داشته باشد. بعد از اینکه ورق‌ها فراهم شدند، عملیات حرارتی تنش‌زدایی بر روی آنها انجام می‌شود. بعد از این مرحله ورق‌های پیچیده شده، مسطح‌سازی می‌شوند و برای برشکاری آماده می‌شوند. ورق‌ها پس از این مرحله به صورت دایره و به ابعاد مورد نظر بریده می‌شوند به طوری که کمترین تنش‌های فشاری و ترک‌های احتمالی در آنها به وجود آید. بعد از انجام برشکاری، ورق‌ها در سیکل روغن کاری قرار می‌گیرند. این عمل به منظور جلوگیری از به وجود آمدن آسیب‌های احتمالی در مراحل بعدی انجام می‌شود. در مرحله بعد ورق‌ها تحت عملیات کشش عمیق سرد قرار می‌گیرند و به صورت لیوانی شکل در می‌آیند. روانکاری قبل از عملیات کشش سرد، اثرات اصطکاک را از بین می‌برد و باعث سهولت در انجام عملیات کشش می‌شود. بعد از انجام عملیات کشش عمیق سرد، مجدداً مخازن تحت عملیات تنش‌زدایی قرار می‌گیرند و بعد در سیکل روغن کاری قرار می‌گیرند. این عملیات جهت بهتر انجام شدن بازکشش سرد بعدی و نرم شدن مخزن و تنش‌زدایی به کار می‌رود. سپس مخزن تحت عملیات بازکشش سرد قرار می‌گیرد تا قطر نهایی مخزن شکل گیرد. بعد از انجام این مراحل برای این که دیواره استوانه‌ای مخزن به ضخامت مورد نظر برسد، مخازن تحت عملیات نازک

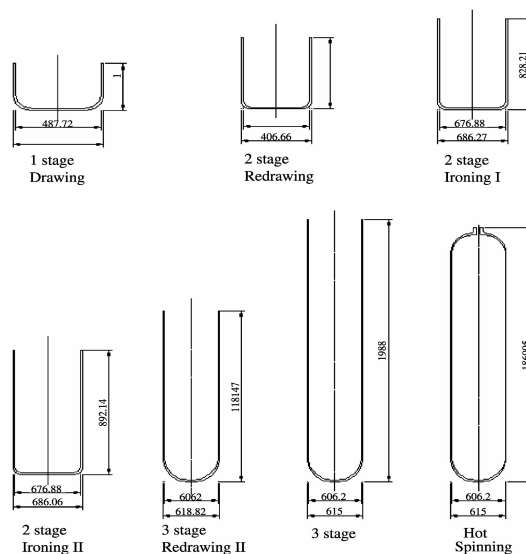
با درخواست مشتریان خواهند داشت. ماشین الیاف پیچی، یک ماشین کنترل عددی کامپیوتری CNC می‌باشد از سیستم خودکار با کارایی بالایی برخوردار است، به طوری که راه‌اندازی آن می‌تواند در چند دقیقه انجام شود. دستگاه فقط محدود به الیاف پیچی مخازن استوانه‌ای نیست، بلکه می‌توان هر شکل قابل تصویری را از طریق این دستگاه الیاف پیچی نمود. همچنین در دستگاه‌های پیشرفته می‌توان الیاف پیچی با ماتریس رزین و الیاف پخته شده را نه تنها در دمای اتاق بلکه بسته به نوع ماتریس رزین به کار رفته، حتی در کوره‌ای با یک پروفیل دمایی کنترل شده انجام داد. قطر و خارج از مرکز محور به خوبی کنترل می‌شود تا با نگهداری سطح مشترک کامپوزیت و اجزای دستگاه بتوان هم مرکزی کامپوزیت نهایی را حفظ کرد و از کج شدن آن در امتداد محور طولی جلوگیری نمود. در ابتدا برای عملیات الیاف پیچی، قرقره‌های الیاف خشک طوری تنظیم می‌شوند که تنش مشخصی در الیاف به وجود آید. مقدار کشیدگی الیاف، در پارامترهای مقاومت و سختی کامپوزیت تأثیر دارد. پس از این مرحله الیاف از حوضچه رزین عبور کرده و به رزین آغشته می‌شود، سپس الیاف کشیده شده و عریض می‌شود. در این مرحله الیاف آماده پیچیده شدن می‌باشد. الیاف بعد از خروج از حمام رزین توسط دستگاه الیاف پیچی CNC روی مخزن پیچیده می‌شود. این پیچش بسته به نوع مخزن می‌تواند محیطی، محوری، مارپیچی (ضربدری) یا ترکیبی از آنها باشد. پس از پایان یافتن الیاف پیچی، مخازن از دستگاه خارج می‌شوند. در این مرحله پخت روی مخزن اجرا می‌شود. پخت رزین ماتریس، اثر مستقیمی بر عملکرد ساختار کامپوزیتی مخزن دارد. برای بهینه سازی عملکرد کامپوزیت، زمان و دمای پخت کنترل می‌شود. عمل کنترل دما توسط کنترلرهای الکترونیکی انجام می‌شود و دمای دیگ پخت به صورت کنترل شده در دماهای مورد نظر نگه داشته می‌شود. این عمل تضمین می‌کند که ساختار کامپوزیتی به خصوصیات تعیین شده در طراحی رسیده است. بعد از اتمام مرحله پخت، مخازن از دیگ پخت خارج می‌شوند و برای بسته بندی آماده می‌شوند. انجام این مراحل، مخازنی کم وزن و با کارایی بالا را نتیجه می‌دهد [۱-۳].

کاری یا اتوکاری دیواره قرار می‌گیرند، به شکل (۱) توجه شود. در این مرحله عیوب ریخته‌گری یا نورد موجود در ورقها نیز تا حدودی از بین می‌رود. بعد از اینکه قسمت استوانه‌ای مخزن آماده شد، دیواره مخزن باید با استفاده از روش آزمون فراصوتی برای آزمایش این که دارای ضخامت یکنواخت می‌باشد یا نه، مورد بازرسی قرار گیرد. برای شکل دادن به گلولی سر مخازن، از فرایند شکل‌دهی چرخشی داغ استفاده می‌شود مطابق شکل (۲). بعد از انجام این مراحل، ماشینکاری گلولی مخزن انجام می‌شود. با انجام این مرحله از ماشینکاری، مراحل مربوط به شکل‌دهی جداره فلزی مخزن به پایان می‌رسد. برای بالا بردن سختی مخازن و مقاومت آنها در برابر ضربه‌های احتمالی و تنش‌زدایی تنشهای پس ماند ناشی از مراحل شکل‌دهی، مخازن تحت عملیات سرد کردن سریع و باز پخت قرار می‌گیرند. در هنگام شکل‌دهی مخازن و عملیات حرارتی آنها، ضایعاتی در داخل و خارج آنها از قبیل اکسیدها و پلیسه‌ها به وجود می‌آید. برای تمیزکاری این ضایعات، مخازن تحت عملیات ساچمه زنی قرار می‌گیرند. بعد از این مرحله مخازن تحت عملیات سختی سنجی قرار گرفته، سپس برای بررسی هرگونه عیب ظاهری تحت بازرسی چشمی قرار می‌گیرند. پس از آن عملیات نهایی بر روی گلولی مخزن از قبیل تمیزکاری و رزوه کاری انجام می‌شود. پس از این مرحله مخازن تحت آزمون تست فراصوتی قرار می‌گیرند تا عیوب موجود در آنها آشکار شود. در انجام این آزمون باید سطوح مخازن از هر گونه روغن، اکسید و سایر آلودگیها پاک باشند. پس از انجام مرحله تولید جداره فلزی مخزن، در مرحله بعدی جهت تقویت مخزن، عملیات پیچش الیاف کامپوزیتی بر روی مخزن شکل (۳) انجام می‌گیرد. دقت در الیاف پیچی سریع و پیوسته طبق یک برنامه از پیش تعیین شده، پایه و اساس فرایند الیاف پیچی می‌باشد. این فرایند به طراحان این توانایی را می‌دهد تا با استفاده از قراردادن دقیق خصوصیات مکانیکی در مکانهای مورد نیاز، مخازنی با استحکام بالا تولید کنند. همچنین این مسئله به طراحان اجازه می‌دهد تا مقاومت گرمایی، استحکام و سختی مواد را بهینه نمایند. مطالب فوق به این معنی است که مهندسان قدرت تغییر متغیرهای لازم را برای دستیابی به خصوصیتی

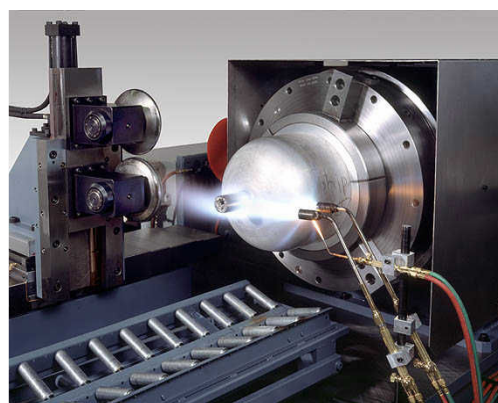
در صنایع خودروسازی، استفاده می‌شود [۴]. نخستین شبیه‌سازی این فرایند توسط آقای صدیقی و رستی بر روی یک قالب مسطح و بر اساس روش تفاضل محدود برای یک قطعه تقارن محوری انجام شد [۵]. هریوانک و سوبوتاوا [۶] و دیت و پادمانابهان [۷] بر روی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملیات کشش عمیق ورقهای فلزی مطالعاتی انجام دادند. این پارامترها شامل اندازه دانه، ضخامت بلانک فلزی، کار سختی فلز، نرخ کرنش سختی و زبری سطوح تماسی بودند. یوسیفن و تیروش [۸] مقایسه‌ای بین آزمایشهای تجربی و روشهای تئوری برای بررسی اثرات کار سختی و ناهمسانگردی و ضریب اصطکاک بر روی ضخامت نهایی ورق در عملیات کشش عمیق سرد انجام دادند. برای کاهش اثرات اصطکاک و افزایش حد مجاز کشش، چلوان و لو [۹] از یک سری ابزارهای بهبود یافته استفاده کردند. همچنین انجام فرایند کشش عمیق بدون استفاده از ورقگیر مانند استفاده از قالبهای کونیک، مورد مطالعه محققان زیادی قرار گرفته است. اکثر این تحقیقات شامل بررسی پارامترهایی مانند تغییر نیروی کشش و چین و چروک خوردگی در قالبهای کونیک و اصلاح هندسی قالبهای کشش کونیک یا قالبهای بدون ورقگیر کاهنده نیرو بوده‌اند. جهت دستیابی به نسبتهای کشش بالا، انجام فرایند بازکشش لازم است. این فرایند نیز توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای یکنواخت کردن ضخامت دیواره و افزایش ارتفاع، فرایند نازک کاری بر روی بلانک حاصل از مراحل کشش و بازکشش انجام می‌شود. تحقیق ابتدایی در مورد این فرایند شامل محاسبه کرنشها و نیز نیروی نازک کاری به وسیله روش پلاستیسیته مقدماتی بوده است. همچنین تحلیل این فرایند به وسیله روش کار همگن، روش باند پایینی و باند بالایی و روش المان محدود نیز صورت گرفته است [۵].

۲- شبیه سازی

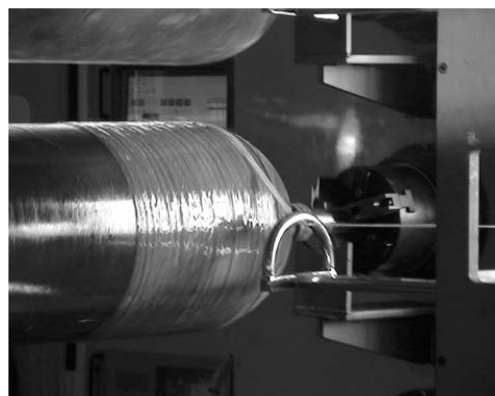
نتایج اولیه این شبیه‌سازی و تحلیل به طراح این امکان را می‌دهد که مراحل آزمون و خطا و هزینه‌های پیش تولید را کاهش دهد و امکان بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر فرایند را برای طراح فراهم می‌کند. در هر مرحله از فرایند ساخت مخزن، پارامترهای مختلفی می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد. چگونگی جریان



شکل (۱) مراحل اولیه شکل دهی جداره فلزی یک مخزن CNG [۲]



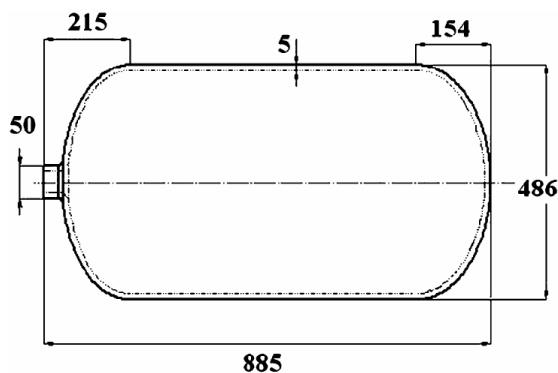
شکل (۲) شکل دهی چرخشی داغ گلولی سر مخزن CNG [۱]



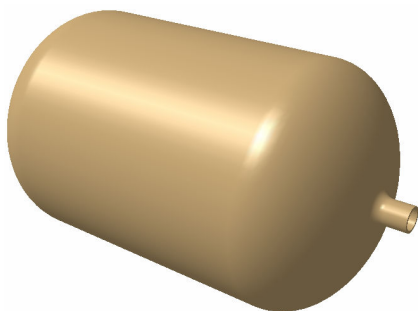
شکل (۳) پیچیدن الیاف کامپوزیتی دور آستری مخزن CNG

از فرایند کشش عمیق برای تولید محصولات متنوعی از ظروف استوانه‌ای توخالی گرفته تا پنلهای با سطوح پیچیده

بیضوی دارد. همچنین جنس مخزن از بلانک آلومینیومی AL۶۰۶۱-O با ضخامت اولیه ۱۲ میلی‌متر و قطر ۱۱۵۰ میلی‌متر است. خواص مکانیکی ماده مورد استفاده در مخزن در جدول ۱ آورده شده است (۵) و (۱۰). در شکل (۷) منحنی رفتار سخت شوندهگی ماده مورد نظر آورده شده است [۵]. در این تحلیل از منحنی سخت شوندهگی مربوط به تست شکم‌دادگی به جای منحنی به دست آمده از تست کشش ساده استفاده شده است. علت این امر به خاطر انطباق بهتر این منحنی با تغییر شکل‌های تقارن محوری مانند فرایند کشش عمیق و بازکشش و اتوکاری دیواره است. علاوه بر این، منحنی مورد نظر، محدوده وسیع تری از کرنشها را برای منحنی تنش-کرنش حقیقی فراهم می‌کند، بنابراین برای شبیه‌سازی عددی مناسبتر است.



شکل (۵) ابعاد هندسی مخزن CNG [۵]

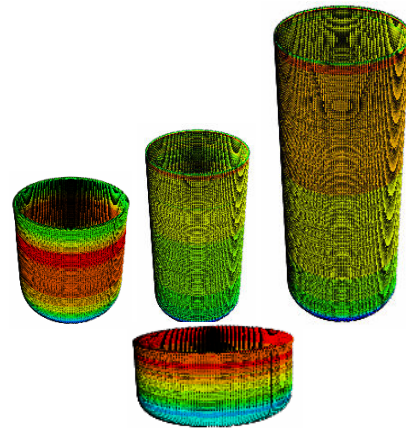


شکل (۶) مدل سه بعدی مخزن CNG [۵]

جدول (۱) خواص مکانیکی بلانک AL ۶۰۶۱-O [۵]

σ_Y (MPa)	E (GPa)	ν	σ_{tu} (MPa)	ρ (Kg/m ³)
۵۵/۲	۶۸/۹	۰/۳۳	۱۲۴	۲۷۰۰

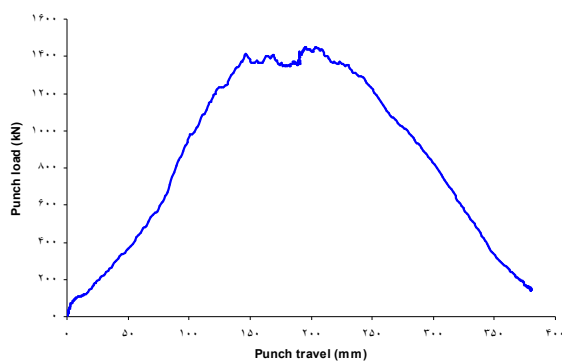
مواد، ماکزیمم نیروی لازم، نحوه توزیع تنش-کرنش و شکل هندسی قالبها از جمله این پارامترها می‌باشند. برای شبیه‌سازی کلیه فرایندها از کد ABAQUS/Explicit استفاده شده است. دلیل استفاده از Explicit نرم به علت توانایی تحلیل مسائل دینامیکی با سرعت بالا و تغییر شکل‌های بزرگ و سطوح تماسی پیچیده است. در تمامی شبیه‌سازیها، اجزای قالب و ورقگیر و سنبه به صورت صلب در نظر گرفته شدند و بلانک به صورت تغییر شکل پذیر در نظر گرفته شد [۵]. برای مش بندی بلانک اولیه به علت متقارن بودن کلیه پارامترها مانند نیرو و شرایط مرزی و هندسه مدل، از ۶ المان در المان CAX۴R تقارن محوری استفاده شد. از ۶ المان در جهت ضخامت و ۵۷۵ المان در جهت شعاع بلانک استفاده شد. پس از شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق، از مدل تغییر شکل یافته در مرحله کشش عمیق که فرایند آنیل تنش‌زدایی روی آن انجام شده است برای فرایند بازکشش و نازک‌کاری به صورت پیوسته و همراه با دو فرایند آنیل تنش‌زدایی دیگر، یکی پس از بازکشش سرد و دیگری بعد از نازک‌کاری مرحله اول استفاده شد، شکل (۴) را ببینید.



شکل (۴) مراحل شبیه‌سازی از چپ به راست: کشش عمیق سرد، بازکشش سرد، نازک‌کاری مرحله اول، نازک‌کاری مرحله دوم

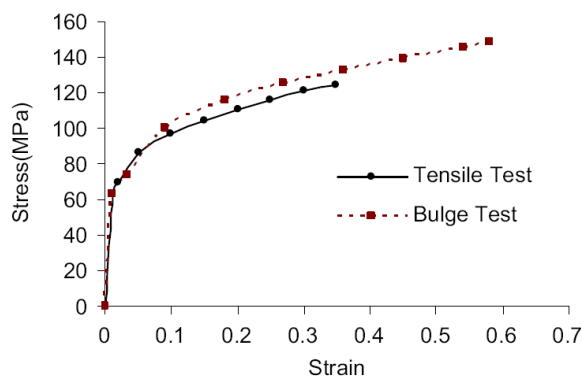
سطح مقطع برش خورده همراه با ابعاد هندسی مخزن فلزی در شکل (۵) و مدل سه بعدی مخزن فلزی در شکل (۶) نشان داده شده است [۵]. حداقل ضخامت دیواره مخزن پس از دو مرحله نازک‌کاری نباید کمتر از ۵ میلی‌متر باشد. حجم کلی مخزن، ۱۳۷ لیتر می‌باشد و انتهای مخزن شکل

۱۴۸۷/۷۵ کیلونیوتن است. در این منحنی نیرو در ابتدا با شیب تندی افزایش می‌یابد که علت آن مراحل مربوط به خم کاری اولیه دور سنبه و غلبه بر اصطکاک ایستایی می‌باشد. با ادامه حرکت سنبه، نیرو پس از افزایش اولیه به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسد. علت این ثابت بودن نیرو به دلیل ماهیت مراحل شکل دهی میانی می‌باشد. در واقع همزمان با کاهش مساحت بلانک زیر ورقگیر و در نتیجه کاهش اثر نیروی ورقگیر بر نیروی کل کشش، افزایش نیروی کشش به دلیل کارسختی فلز، کاهش قبلی را جبران می‌کند و بنابراین نیروی کشش تا کورس ۲۲۰ میلیمتری سنبه، تقریباً ثابت می‌ماند. پس از آن به علت این که بلانک از زیر ورقگیر در می‌آید، نیرو به تدریج کاهش می‌یابد و این کاهش تا طول کورس ۳۸۰ میلیمتری که عملیات کشش به پایان می‌رسد ادامه خواهد داشت.



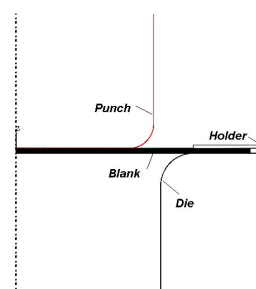
شکل (۹) منحنی نیرو-جاب‌جایی سنبه در مرحله کشش عمیق (نسبت کشش ۱/۷)

در شکل (۱۰)، تغییر ضخامت بلانک در حین عملیات کشش عمیق سرد آورده شده است. مقایسه نمودارها در شکل (۱۰)، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی مرجع [۵] و شبیه سازی حاضر را نشان می‌دهد. در مرحله بعد، برای شبیه سازی فرایند باز کشش سرد مخزن CNG، از ظرف تولید شده در مرحله کشش عمیق سرد که ارتفاع تقریبی آن ۳۲۴ میلیمتر و قطر داخلی آن ۶۷۶/۵ میلیمتر بود (نسبت کشش ۱/۷) به عنوان مدل اولیه استفاده شد. در این مرحله بر روی ظرف حاصل از مرحله قبل ابتدا یک فرایند آنیل تنش زدایی صورت گرفت تا کلیه تنشها و کرنشهای ایجاد شده در مرحله کشش عمیق سرد از بین برود.



شکل (۷) منحنی تنش- کرنش حقیقی بلانک آلومینیومی [۵]

در مرحله اول، به منظور به دست آوردن بیشترین نسبت کشش، چندین شبیه سازی با نسبتهای کشش مختلف مطابق شکل (۸) انجام گرفت. در تمامی این شبیه‌سازیها اندازه شعاع لبه سنبه برابر ۶۰ میلیمتر و اندازه شعاع لبه ماتریس برابر ۸۰ میلیمتر و مقدار لقی برابر ۱۶/۸ میلیمتر در نظر گرفته شدند. همچنین مقادیر ضرایب اصطکاک برای سطوح تماسی سنبه و بلانک برابر ۰/۱ و برای سطوح تماسی ماتریس و ورقگیر و بلانک برابر ۰/۰۲۸ در نظر گرفته شدند [۵]. مقدار نیروی ورقگیر در مرحله کشش عمیق سرد نیز برابر ۹۰ کیلو نیوتن در نظر گرفته شد. در نهایت با انجام چندین شبیه سازی، ماکزیمم نسبت کشش مجاز در مرحله کشش عمیق سرد برابر ۱/۷ به دست آمد، بنابراین نسبت قطر بلانک اولیه به قطر سنبه برابر ۱/۷ در نظر گرفته شد.

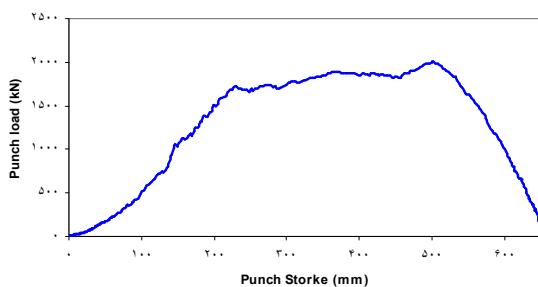


شکل (۸) مدل تقارن محوری برای شبیه سازی فرایند کشش عمیق سرد

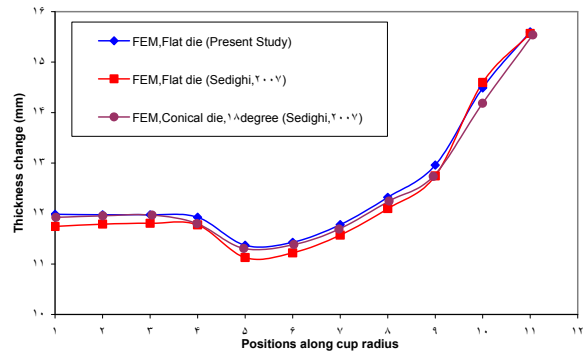
در شکل (۹)، منحنی نیرو بر حسب جاب‌جایی سنبه برای شکل‌دهی مخزن در مرحله کشش عمیق سرد ارائه شده است. همان طور که در شکل (۹) مشخص شده است ماکزیمم نیروی کشش به دست آمده از شبیه‌سازی برابر

در شکل (۱۲)، منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی سنبه نشان داده شده است. در مقایسه با شکل (۹)، مشاهده می‌شود که در این مرحله به علت افزایش طول کورس سنبه، کار سختی بیشتر در طول کورس سنبه، افزایش نیروی ورقگیر، نازک شدن بیشتر ضخامت بلانک و همچنین کاهش شعاع لبه ماتریس از ۸۰ میلی‌متر به ۲۵/۲ میلی‌متر، مقدار نیروی بازکشش سرد افزایش پیدا کرده است. ماکزیمم نیروی کشش در مرحله کشش عمیق سرد مطابق شکل (۱۳)، ماکزیمم نیروی بازکشش سرد به حدود ۲۰۰۰ کیلو نیوتن می‌رسد، جدول (۲) را ببینید. همچنین در مرحله بازکشش سرد ضخامت لبه بلانک به ۱۷/۵۲ میلی‌متر می‌رسد که موجب افزایش نیروی بازکشش، هنگام عبور لبه مخزن از زیر ورقگیر در کورس ۵۰۰ میلی‌متری سنبه خواهد شد.

پس از بازکشش سرد شکل (۱۳)، در مرحله بعد جهت یکنواخت کردن ضخامت دیواره مخزن و رسیدن به ضخامت مطلوب، دو مرحله نازک کاری بر روی دیواره مخزن، شبیه‌سازی شد. این فرایند می‌تواند همزمان با مرحله کشش عمیق یا بازکشش و یا بعد از آن انجام شود. معمولاً برای رسیدن به ضخامت نهایی، یک یا چند مرحله نازک کاری انجام می‌شود که بسته به میزان پذیرش کرنشها در هر مرحله دارد. بین هر مرحله از نازک کاری، قطعه تحت عملیات حرارتی آنیل تنش زدایی قرار می‌گیرد. فاکتور کرنش آبرونینگ از رابطه زیر به دست می‌آید که در آن t_0 ضخامت اولیه ورق و t_1 ضخامت پس از اولین فرایند آبرونینگ است.

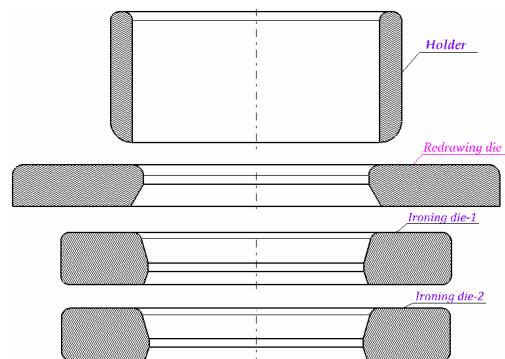


شکل (۱۲) منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی سنبه در بازکشش سرد



شکل (۱۰) مقایسه نتایج شبیه‌سازی تغییر ضخامت ورق در پایان کشش عمیق سرد

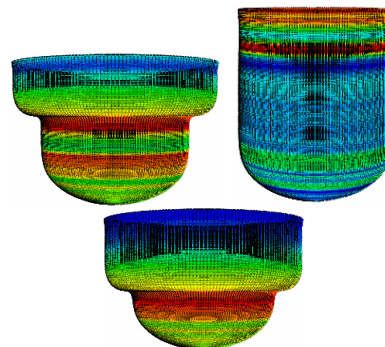
در این مدل اولیه مطابق شکل (۱۱)، کلیه تنشها و کرنشهای پسماند حذف شده‌اند و تنها مشهای تغییر شکل یافته از مرحله قبل بر روی مدل باقی مانده‌اند. برای به دست آوردن قطر نهایی مخزن، نسبت کشش نهایی برابر با ۱/۴۱ در نظر گرفته شد تا در مرحله بازکشش سرد به قطر نهایی مخزن یعنی ۴۸۶ میلی‌متر برسیم [۵]. ضرایب اصطکاکی بین سطوح تماسی در این مرحله مانند قبل در نظر گرفته شدند. مقدار نیروی ورقگیر در این مرحله ۹۲ کیلو نیوتن در نظر گرفته شد که نسبت به مرحله کشش عمیق سرد ۲ کیلو نیوتن بیشتر است. علت این امر به خاطر کاهش جزئی ضخامت ورق در مرحله کشش عمیق و همچنین طول کورس بیشتر نسبت به مرحله کشش عمیق سرد می‌باشد که باعث می‌شود تمایل بلانک به چین خوردگی افزایش یابد [۱۱].



شکل (۱۱) مدل شماتیک قالبهای مراحل بازکشش و نازک کاری دیواره مخزن

جدول (۲) مقایسه عملیات کشش عمیق و بازکشش سرد

مشخصات عملیات	بازکشش سرد	کشش عمیق سرد
نیروی ورقگیر (kN)	۹۲	۹۰
نسبت کشش	۱/۴۱	۱/۷
مقدار لقی (mm)	۱۸	۱۶/۸
شعاع لبه ماتریس (mm)	۲۵/۲	۸۰
ماکزیم نیروی سنبه (kN)	۲۰۰۰	۱۴۸۷/۷۵
مینیم ضخامت بلاتک (mm)	۱۰/۵۱۳	۱۱/۴۶۲۳
ماکزیم ضخامت بلاتک (mm)	۱۷/۵۲	۱۵/۷
ارتفاع نهایی مخزن (mm)	۶۳۱/۷۵۵	۳۲۳/۱۳۸

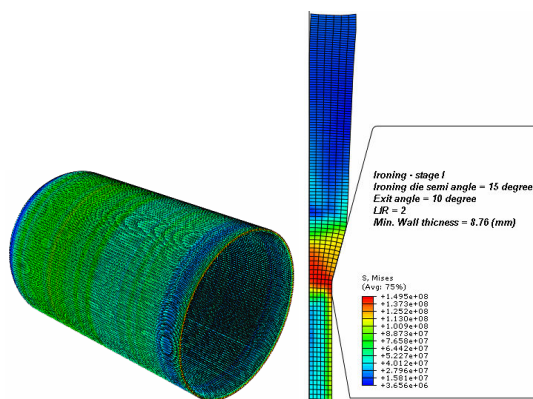


شکل (۱۳) مراحل میانی بازکشش سرد مخزن CNG

با توجه به داده‌های جدول (۳)، و شبیه سازی مراحل بازکشش و نازک کاری مراحل اول و دوم مطابق شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی سنبه در مراحل شکل دهی مخزن در شکل (۱۶)، نشان داده شده است. این منحنی شامل سه منطقه است. قسمت اول مربوط به مرحله بازکشش سرد می‌باشد. پس از انجام عملیات بازکشش سرد، نیرو به صفر می‌رسد که مربوط به انجام عملیات آنیل تنش زدایی می‌باشد. پس از انجام آنیل، سنبه بلافاصله به حرکت خود ادامه می‌دهد و مخزن وارد قالب نازک کاری مرحله اول می‌شود. بنابراین نیرو با افزایش طول کورس سنبه به تدریج افزایش می‌یابد.

جدول (۳) مقایسه مشخصات عملیات مراحل نازک کاری دیواره مخزن

مشخصات عملیات	نازک کاری دوم	نازک کاری اول
نیم زاویه مخروط قالب	۱۰°	۱۵°
فاکتور کرنش ضخامت	۱/۷۵۱	۲
مینیم ضخامت دیواره (mm)	۵	۸/۷۶
ارتفاع نهایی مخزن (mm)	۱۳۷۶/۲۱	۸۴۵/۴۲
درصد کاهش ضخامت	۴۲/۹۲	۵۰



شکل (۱۴) عبور مخزن از قالب نازک کاری مرحله اول

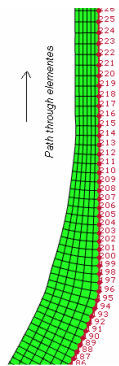
$$E_i = \frac{t_o}{t_i} \quad (1)$$

$$E_{ii} = E_{i1} \times E_{i2} \times \dots \times E_{in} \quad (2)$$

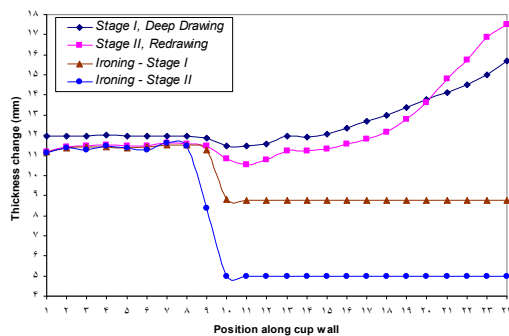
$$\frac{t_o}{t_n} = \frac{t_o}{t_1} \times \frac{t_1}{t_2} \times \dots \times \frac{t_{n-1}}{t_n}$$

فاکتور کرنش برای مواد مختلف در جداول استاندارد داده شده است و بر مبنای آن می‌توان کاهش ضخامت ماکزیم قبل از هر مرحله از بازپخت را به دست آورد. در شبیه‌سازی فرایند نازک کاری، شرایط اصطکاکی مانند قبل در نظر گرفته شدند. همچنین بین دو مرحله نازک کاری یک مرحله آنیل تنش زدایی نیز انجام شده است. در این شبیه‌سازی، ماکزیم ضخامت لبه بلاتک در مرحله بازکشش سرد به ۱۷/۵۲ میلیمتر رسید. با استفاده از رابطه (۱) و ضخامت نهایی لازم برای دیواره مخزن که حداقل برابر ۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است، فاکتور کرنش آبرونینگ برابر $(E = \frac{17/52}{5} = 3/504)$ به دست می‌آید که این نسبت ضخامت با توجه به ضرایب اصطکاکی و حداکثر کاهش ضخامت در هر مرحله از نازک کاری و کرنش مجزا، با استفاده از دو مرحله نازک کاری به دست خواهد آمد [۵]. در شبیه سازی مراحل نازک کاری از دو قالب استفاده شد. در قالب اول مینیم ضخامت دیواره مخزن پس از خروج از قالب به ۸/۷۶ میلیمتر می‌رسد. با در نظر گرفتن ماکزیم ضخامت لبه بلاتک که ۱۷/۵۲ میلیمتر می‌باشد، درصد کاهش ضخامت در قالب اول برابر ۵۰٪ و فاکتور آبرونینگ برای قالب اول برابر $(E_{i1} = \frac{17/52}{8/76} = 2)$ خواهد بود. در قالب دوم ضخامت بلاتک از ۸/۷۶ میلیمتر به حداقل ۵ میلیمتر می‌رسد، در نتیجه درصد کاهش ضخامت برابر ۴۲/۹۲٪ و فاکتور آبرونینگ برای قالب دوم برابر $(E_{i2} = \frac{8/76}{5} = 1/752)$ خواهد بود.

تغییر ضخامت بلانک ثبت می‌شود. در شکل (۱۸)، مقایسه تغییر ضخامت بلانک در مراحل کشش عمیق سرد و بازکشش سرد و مراحل نازک کاری دیواره مخزن، آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مراحل شکل‌دهی کشش عمیق و بازکشش سرد، ضخامت دیواره مخزن غیر یکنواخت است. با انجام دو مرحله نازک کاری دیواره مخزن، دارای ضخامت یکنواخت و ثابت می‌شود که در مقایسه با مراحل کشش و بازکشش این یکنواختی ضخامت قابل مشاهده است. در مراحل بازکشش و نازک کاری مراحل اول و دوم، تغییر ضخامت بلانک بر روی مسیر مشخص شده در شکل (۱۸) تا تغییر مکان در فاصله ۸ اندک و قابل چشم‌پوشی است. در واقع پس از فرایند بازکشش سرد، در مراحل اتوکاری، به دلیل در نظر گرفتن لقی کمتر از ضخامت بلانک، تغییر شکل و کاهش ضخامت، به صورت موضعی و تنها در منطقه بین سنبه و قالب انجام می‌شود. بنابراین در قسمت کف مخزن، تقریباً نیرویی که منجر به کاهش ضخامت کف مخزن شود، وارد نمی‌شود. در نتیجه ضخامت کف مخزن از مراحل بازکشش سرد تا انتهای شکل‌دهی، تقریباً ثابت می‌ماند.

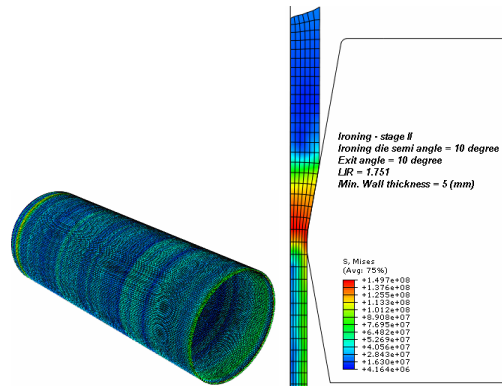


شکل (۱۷) مسیر تعریف شده جهت بررسی تغییر ضخامت دیواره مخزن

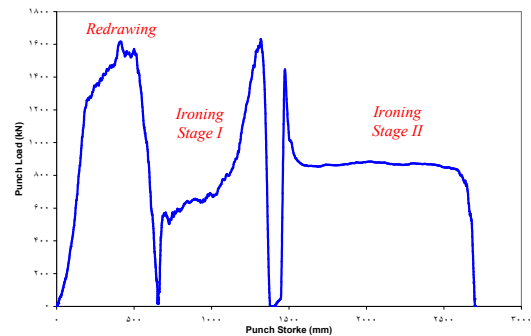


شکل (۱۸) مقایسه تغییر ضخامت دیواره مخزن در مراحل مختلف

شکل‌دهی مخزن



شکل (۱۵) عبور مخزن از قالب نازک کاری مرحله دوم



شکل (۱۶) منحنی نیرو - جابه‌جایی سنبه در بازکشش و نازک کاری مراحل اول و دوم

در واقع در نازک کاری مرحله اول، به دلیل عدم یکنواختی ضخامت بلانک کشیده شده در مرحله بازکشش سرد و افزایش ضخامت بلانک در لبه، با حرکت بیشتر سنبه به سمت پایین و عبور لبه بلانک از قالب مرحله اول برای یکنواختی ضخامت، نیرو به صورت صعودی و پیوسته افزایش خواهد یافت. پس از عبور کامل لبه بلانک از قالب مرحله اول و رسیدن نیرو به ماکزیمم مقدار خود در این مرحله، نیروی سنبه مجدداً به صفر می‌رسد که مربوط به آنیل دوم می‌باشد. پس از انجام آنیل دوم، سنبه به حرکت خود به سمت پایین ادامه می‌دهد و مخزن که در مرحله قبل ضخامت دیواره اش یکنواخت شده است وارد قالب نازک کاری دوم می‌شود و نیرو مجدداً افزایش می‌یابد. در این مرحله به علت یکنواختی ضخامت دیواره که از مرحله نازک کاری اول حاصل شده است، نیروی سنبه تقریباً ثابت و یکنواخت خواهد ماند.

بررسی تغییر ضخامت بلانک از مسیر تعریف شده مطابق شکل (۱۷)، انجام می‌شود. در ۲۴ نقطه از این مسیر که از نقطه مرکزی بلانک شروع و به نقطه بیرونی ختم می‌شود

۳- نتیجه گیری

در این مقاله، با هدف آشنایی با مراحل ساخت و بررسی پارامترهای مؤثر بر فرایند شکل دهی مخازن CNG، مراحل اولیه شکل دهی یک مخزن CNG آلومینیومی که شامل فرایندهای کشش عمیق سرد، بازکشش سرد و مراحل نازک کاری دیواره بود، با نرم افزار المان محدود [۱۲] شبیه سازی شد و نتایج زیر به دست آمد:

۱- نتایج اولیه این شبیه سازی و تحلیل به طراح این امکان را می دهد که مراحل آزمون و خطا و هزینه های تولید را کاهش دهد و امکان بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر فرایند را برای طراح فراهم سازد. در هر مرحله از فرایند ساخت مخزن، پارامترهای مختلفی می تواند مورد مطالعه قرار گیرد. چگونگی جریان مواد، ماکزیم نیروی لازم، نحوه توزیع تنش - کرنش و شکل هندسی قالب از جمله این پارامترها می باشند.

۲- نتایج شبیه سازی فرایند بازکشش سرد نشان داد که در بازکشش سرد به علت افزایش طول کورس سنبه و نیز کار سختی بیشتر در طول کورس سنبه و نیز افزایش نیروی ورقگیر و نازک شدگی بیشتر ضخامت بلانک و همچنین کاهش شعاع لبه قالب از ۸۰ میلیمتر به ۲۵/۲ میلیمتر، مقدار نیروی بازکشش سرد افزایش پیدا کرده است.

۳- ماکزیم نیروی کشش در مرحله کشش عمیق سرد ۱۴۸۷/۷۵ کیلو نیوتن بود که در مرحله بازکشش سرد ماکزیم نیروی بازکشش سرد به حدود ۲۰۰۰ کیلو نیوتن رسید. همچنین در مرحله بازکشش سرد ضخامت لبه بلانک به ۱۷/۵۲ میلیمتر رسید که موجب افزایش نیروی بازکشش، هنگام عبور لبه مخزن از زیر ورقگیر در کورس ۵۰۰ میلیمتری سنبه شد.

۴- فرایند نازک کاری دیواره، جهت رسیدن به ضخامت نهایی ۵ میلیمتر، در دو مرحله و همراه با یک آنیل تنش زدایی انجام شد.

۵- نتایج شبیه سازی نشان داد که در نازک کاری مرحله اول به دلیل عدم یکنواختی ضخامت مخزن کشیده شده در مرحله بازکشش سرد و افزایش ضخامت مخزن در قسمت بالای دیواره، با حرکت بیشتر سنبه به سمت پایین و عبور لبه مخزن از قالب، همراه با یکنواختی

ضخامت، نیرو به صورت صعودی و پیوسته افزایش خواهد یافت. پس از عبور کامل لبه مخزن از قالب مرحله اول و رسیدن نیرو به ماکزیم مقدار خود در این مرحله، نیروی سنبه مجدداً به صفر می رسد که مربوط به آنیل تنش زدایی دوم می باشد.

۴- مراجع

- [۱] WWW.ENGINEERING AND TECHNOLOGY.COM
 [۲] Choi Chul Kim J.C., Jung S.Y., Development of an automated design system of a CNG composite vessel using a steel liner manufactured using the DDI process. *Int. J. Adv. Mfg. Tech.*, Vol. ۲۴, , ۲۰۰۴, pp. ۷۸۱-۷۸۸.
 [۳] Vardga L., Nagy A., Kovacs A., Design of CNG tank made of Aluminum and Reinforced Plastic, *Composites*, Vol. ۲۶, Issue ۶, , ۱۹۹۵, pp. ۴۵۷-۴۶۳.
 [۴] Allen S.j., Mahdavian S.M., The effect of lubrication on die expansion during the deep drawing of axisymmetrical steel cups, *J. Material Processing Technology*, Vol. ۱۹۹, ۲۰۰۸, pp. ۱۰۲-۱۰۷.
 [۵] Sedighi M. & Rasti M. , An investigation on manufacturing process parameters of CNG pressure vessels, *Int. J. Adv. Mfg. Tech.*, Vol. ۳۸, No. ۹-۱۰, ۲۰۰۸, pp. ۹۵۸-۹۶۴.
 [۶] Hrivnak A., Sobotova L., The influence of the deformation aging and the conditions of stress on the properties of the deep drawing steel sheet, *J. Material Processing Technology*, Vol. ۳۴, ۱۹۹۲, pp. ۴۲۵-۴۳۰.
 [۷] Date P.P., Padmanabhan K.A., On the prediction of the forming limit diagram of sheet metals, *Int. J. Mechanical Science* , Vol. ۳۴ (۵), ۱۹۹۲, pp. ۳۶۳-۳۷۴.
 [۸] Yossifon S., Tirosh J., On the dimensional accuracy of deep drawing products by hydroforming processes, *Int. J. Mech. Sci.* ۳۳ (۴), pp. ۲۷۹-۲۹۵, ۱۹۹۱
 [۹] Thiruvarduchelvan S., N.H. Loh, Drawing of cylindrical and hemispherical cups using an improved tooling for friction-actuated blank holding, *J. Material Processing Technology*, Vol. ۳۷, pp. ۲۶۷-۲۸۰, ۱۹۹۳
 [۱۰] WWW.MATWEB.COM
 [۱۱] NAM J. & Seop HAN K., Finite Element Analysis of deep Drawing and Ironing Process in the Steel D&I Canmaking, *ISIJ*.
 [۱۲] ABAQUS Version ۶.۷ Documentation, ABAQUS Analysis User's Manual, ۲۰۰۷.