

## Analysis of the behavior of type III composite pressure vessel under bullet impact

Meysam Shakouri<sup>1</sup>, Reza Bayat,<sup>2</sup>

1-Associate Professor, Department of Aerospace Structures, New Sciences and Technologies Campus, Faculty of Aerospace Engineering, Semnan University, Iran, [shakouri@semnan.ac.ir](mailto:shakouri@semnan.ac.ir)

2-Master of Aerospace Structures, New Sciences and Technologies Campus, Faculty of Aerospace Engineering, Semnan University, Iran

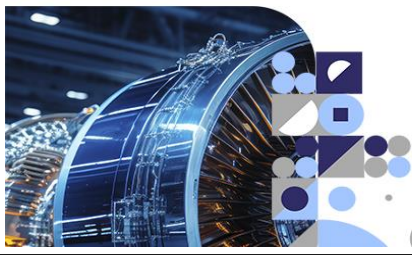
---

### Abstract

Pressure tanks are designed to store high pressure fluids and are widely used in various industries. One of the uses of these tanks is to use them as compressed natural gas tanks, which are widely used in transportation industries. Due to reduction of weight and increase of strength, composite materials is widely used in the construction of these tanks. In this thesis, the behavior of the pressure vessel structure against the impact caused by the bullet will be numerically analyzed. First, a standard composite tank is designed according to previous researches in Abaqus software, and then the impact caused by the bullet will be simulated. Finally the strength of this tank against changes in parameters such as winding angle, thickness of composite material, type of fibers and etc will be investigated .and an optimal mode for the construction of these tanks will be introduced. Through the investigations, it was found that the composite pressure tank made of CFRP material has more strength than other materials. In addition, it was determined that the composite tank should be made at the angle of 55 and -55 fibers along with the lining and the thickness of 1.524 mm. In fact, in this research, the effect of various variables such as thickness of composite layers, angle of fibers, type of fibers, and presence of lining was investigated simultaneously, and the effect of each of these variables on the strength of these tanks was investigated.

**Key words:** Composite tank, bullet, numerical solution, impact test.

---



## تحلیل رفتار مخازن نوع III تحت فشار ساخته شده از مواد مرکب در برابر ضربه ناشی از برخورد گلوله

میثم شکوری<sup>۱\*</sup>، رضا بیات<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه آموزشی سازه های هوافضایی، پردیس علوم و فناوری های نوین، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه سمنان، ایران

shakouri@semnan.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد سازه های هوایی، پردیس علوم و فناوری های نوین، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه سمنان، ایران

### خلاصه

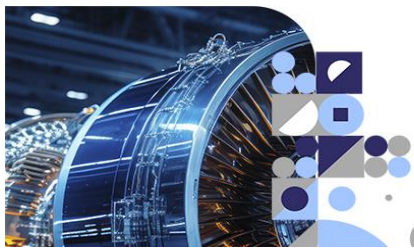
مخازن تحت فشار برای نگهداری سیالات با فشار بالا طراحی و به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از موارد استفاده از این مخازن، استفاده به عنوان مخزن گاز طبیعی فشرده است که کاربرد فراوانی در صنایع حمل و نقل دارد. همچنین برای کاهش وزن و افزایش استحکام این مخازن، استفاده از مواد مرکب در ساخت این مخازن به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق رفتار سازه مخازن تحت فشار در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله مورد تحلیل عددی قرار گرفت. در ابتدا یک مخزن کامپوزیتی استاندارد مطابق با پژوهش های پیشین در نرم افزار آباکوس طراحی و سپس ضربه ناشی از برخورد گلوله شبیه سازی شد. در انتها استحکام این مخزن در برابر تغییرات پارامترهایی مانند زاویه الیاف، ضخامت ماده مرکب، جنس الیاف و ... مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی های انجام شده، مشخص شد که مخزن کامپوزیتی تحت فشار ساخته شده از جنس CFRP دارای استحکام بیشتری نسبت به سایر جنس ها است. علاوه بر آن مشخص شد که مخزن کامپوزیتی باید در زاویه الیاف +۵۵ و -۵۵ به همراه آستری و ضخامت ۱.۵۲۴ میلی متری ساخته شود. در واقع در این تحقیق به بررسی همزمان اثر متغیرهای مختلفی مانند ضخامت لایه های کامپوزیتی، زاویه الیاف، جنس الیاف و حضور آستری پرداخته شد و تاثیر تک تک این متغیرها بر استحکام این مخازن مورد بررسی قرار گرفت.

**کلمات کلیدی:** آزمون ضربه، حل عددی، گلوله، مخزن کامپوزیتی

### ۱. مقدمه

مخازن تحت فشار معمولاً استوانه ای یا کروی هستند و برای نگهداری مایعات یا گازها در فشاری غیر از فشار اتمسفر استفاده می شوند. مخازن تحت فشار کامپوزیتی مخازن تحت فشاری هستند که از مواد مرکب ساخته می شوند. این نوع مخازن به دلیل استحکام کششی بالای الیاف کربن در عین سبکی، قادر به تحمل فشار بسیار بالا هستند. البته فرایند ساخت مخازن تحت فشار کامپوزیتی مستلزم استفاده از فناوری های گران قیمت است.

مخازن کامپوزیتی تحت فشار دارای انواع مختلفی هستند. نوع اول از این مخازن رایج ترین مخازن گاز طبیعی فشرده هستند و به صورت کامل از فلز ساخته می شوند. مخازن نوع ۲ معمولاً از جنس آلومینیوم یا فولاد هستند که با روکش کامپوزیت الیاف شیشه پوشیده می شوند. هزینه ساخت مخازن نوع ۲ تقریباً ۵۰ برابر بیشتر از مخازن نوع اول هستند اما وزنی حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد کمتر دارند. نوع سوم دارای آستری فلزی و روکش تمام کامپوزیتی می باشند. مخازن نوع ۴ ساختار تمام کامپوزیتی همراه با پوشش پلیمری دارند و تمام بارهای ساختاری را تحمل می کنند.

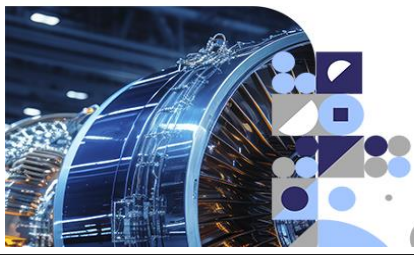


این روزها مخازن تحت فشار کامپوزیتی در صنایع مختلف مانند پتروشیمی، هوافضا، آب آشامیدنی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. مخازن تحت فشار کامپوزیتی فارغ از محل به‌کارگیری، می‌توانند تحت ضربه قرار بگیرند. همین مسئله سبب می‌شود که انجام آزمون ضربه در تهیه و ساخت مخازن کامپوزیتی تحت فشار از اهمیت زیادی برخوردار باشد.

موضوع مخازن تحت فشار توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. ماسکیویچ [۱] تحلیلی عددی از رفتار تنش کرنش یک مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی انجام می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان دهنده تأثیر انتشار عیوب اولیه در پوسته کامپوزیتی و اندازه بحرانی ترک سطحی است. وانگ [۲] یک مخزن کامپوزیتی از جنس اپوکسی فیبر کربن را در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی نمود و تحلیل شکست انجام داد. سولایمن [۳] یک مخزن تحت فشار کامپوزیتی از جنس آلومینیوم را مدل‌سازی کرد که با پلیمر تقویت شده اپوکسی فیبر کربن پوشانده شده است. او تحلیل المان محدود برای بررسی تأثیرات زاویه سیم‌پیچ روی پارامترهای مختلف انجام داد. پاراناس [۴] یک روش تحلیلی برای طراحی و پیش‌بینی رفتار مخازن تحت فشار کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف توسعه داد. او پس از طراحی مخزن آن را تحت بارگذاری‌های مختلفی قرار داد. دمیر [۵] تأثیر بار عرضی مکرر را روی فشار ترکیدگی مخازن کامپوزیتی تحت فشار بررسی می‌کند. او در این پژوهش از کامپوزیت اپوکسی فیبر شیشه (GFR) استفاده می‌کند. لانگشی [۶] طراحی و ساخت مخازن CNG ساخته شده از مواد مرکب را بررسی نموده است. نیرهای و همکاران [۷] به تحلیل مخازن CNG ساخته شده از مواد مرکب با استفاده از روش اجزا محدود پرداخته است. برای این منظور یک روش مدل‌سازی جامع برای پیش‌بینی رفتار خرابی مخازن در شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از نرم‌افزار ANSYS توسعه داده شده است. سینگ و آواشتی [۸] موضوع بهینه‌سازی وزن این مخازن را مورد بررسی قرار داده‌اند. رادهیکا و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی به طراحی و ساخت مخازن تحت فشار ساخته‌شده توسط مواد کامپوزیتی مبتنی بر اپوکسی تقویت‌شده با فیبر کربن با آستر فلزی نازک می‌پردازد. علیخانی و همکاران [۱۰] اثر خزش در مخازن CNG را با استفاده از روش اجزا محدود بررسی کرده‌اند و معتقدین و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر خطای زاویه الیاف و عدم یکنواختی در توزیع رزین بر رفتار کمانشی لوله و مخازن کامپوزیتی تحت فشار خارجی هیدرو استاتیک یکنواخت پرداخته است. در این پژوهش، کمانش لوله و مخزن کامپوزیتی تحت فشار خارجی به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا از لوله و مخزن کامپوزیتی به قطرهای ۱۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر و طول ۱/۵ متر از جنس E-glass/Epoxy استفاده شده است. سیدی [۱۲] به مطالعه‌ی عددی، تجربی و بهینه‌سازی مخازن کامپوزیتی با آستری غیرفلزی (CNG نوع چهارم) پرداخت. هدف از انجام این پژوهش، بررسی رفتار سازه مخزن تحت فشار در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله است. در ابتدا یک مخزن تحت فشار به‌صورت عددی مدل‌سازی شد و افت استحکام سازه در مقابل ضربه ناشی از گلوله مورد بررسی قرار گرفت. پس از مدل‌سازی و تحلیل عددی به متغیرهای مؤثر بر خواصی مانند استحکام، وزن، هزینه و غیره پرداخته شد. پس از دستیابی به مدلی دارای خواص موردنظر، می‌توان از این پژوهش برای ساخت مخازن کامپوزیتی تحت فشار در صنایع هوافضا استفاده کرد. این مخازن دارای استحکام بالا و وزن پایین هستند و کاربرد زیادی در صنایع هوایی و فضایی خواهند داشت.

## ۲. هندسه مساله و روش مدل سازی

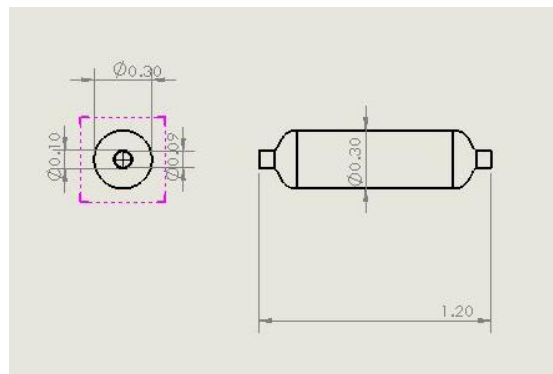
در مرحله‌ی اول از طراحی یک مخزن کامپوزیتی تحت فشار لازم است که ابعاد و مواد مورد استفاده برای ساخت آن انتخاب شود. در این تحقیق از ابعاد استاندارد موجود برای ساخت مخازن کامپوزیتی تحت فشار در مرجع [۳] استفاده شد. این مخزن از نوع مخازن کامپوزیتی نوع سوم می‌باشد و دارای یک لایه آستری از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ است. روکش کامپوزیتی نیز متشکل از ۶ لایه با جنس کامپوزیت فیبر کربن و زمینه اپوکسی است. کلیه ابعاد و ویژگی‌های هندسی در جدول ۱ آورده شده است.



جدول ۱- ابعاد مخزن مورد استفاده [۳]

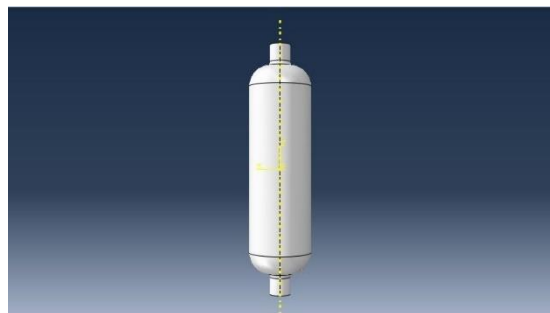
شعاع خارجی مخزن (mm)	شعاع داخلی مخزن (mm)	تعداد لایه‌های کامپوزیتی	ضخامت لایه آستری (mm)	قطر (mm)	طول (mm)
۱۵۴.۸۷۲	۱۵۰	۳-۳۰	۰.۳	۳۰۰	۱۲۰۰

در این تحقیق قرار است که آزمون شلیک روی این مخزن کامپوزیتی تحت فشار انجام شود. بنابراین لازم است که مشخصات گلوله نیز در این بخش مشخص شود. گلوله مورد استفاده در این بخش مشابه گلوله‌های مورد استفاده در تست‌های استاندارد است. طبق استاندارد موجود [۱۳ و ۱۴] گلوله باید دارای قطر ۷.۶۲ میلی‌متر و طول ۵۱ میلی‌متر باشد. گلوله باید با سرعت استاندارد ۸۲۱ متر بر ثانیه و زاویه ۴۵ درجه به مخزن نوع سوم برخورد کند [۱۴]. پس از مشخص شدن ابعاد و جنس مواد مورد استفاده برای شبیه‌سازی، مرحله مدل‌سازی آغاز شد. برای مدل‌سازی مخزن کامپوزیتی مطابق با شکل ۱، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. برای شروع مدل‌سازی ابتدا نوع مدل در محیط Part این نرم‌افزار مشخص شد. مدل در فضای ۳ بعدی، نوع تغییرشکل پذیر با شکل پوسته طراحی شد.

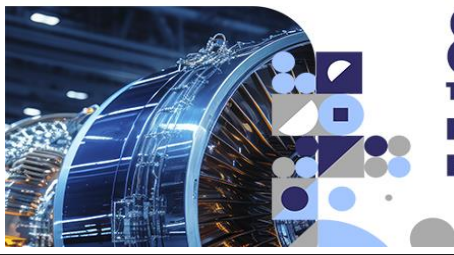


شکل ۱- ابعاد مخزن (متر)

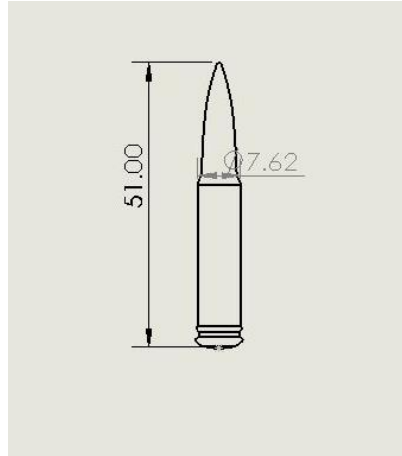
در مرحله اول لازم است که نمای کلی مخزن تحت فشار در محیط دوبعدی این نرم‌افزار ترسیم شود. در این مرحله فضای sketch محیط part انتخاب شده و مخزن کامپوزیتی تحت فشار با ابعاد مشخص ترسیم شده است. پس از تکمیل ترسیم نمای مخزن کامپوزیتی، این مرحله به پایان رسید و مدل مخزن کامپوزیتی تحت فشار به صورت سه‌بعدی (شکل ۲) آماده شد.



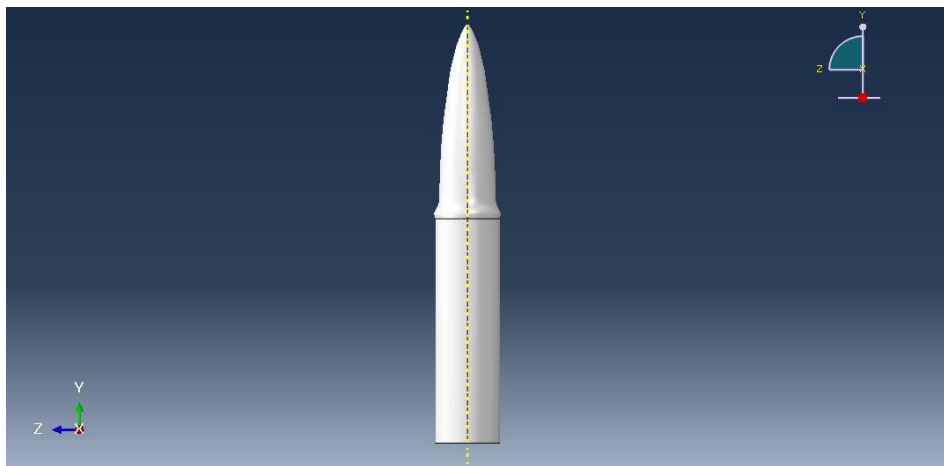
شکل ۲- مدل سه بعدی مخزن کامپوزیتی



همانند مراحل طی شده در مدل سازی مخزن، گلوله نیز به شیوه‌ای مشابه و مطابق شکل ۳، مدل سازی شده است. ابتدا باید نوع مدل در محیط Part مشخص شود. گلوله در فضای ۳ بعدی از نوع پوسته مدل سازی شده است. در ادامه نمای گلوله در محیط Sketch ترسیم شده و مدل سه بعدی گلوله (شکل ۴) آماده شده است.

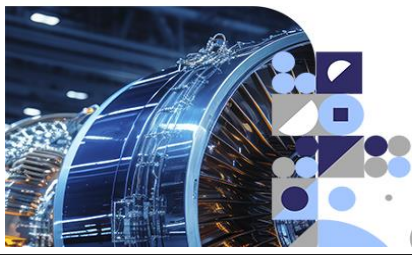


شکل ۳- ابعاد گلوله (میلی متر)



شکل ۴- مدل سه بعدی گلوله

در این مرحله مدل سازی گلوله نیز به صورت کامل به پایان می‌رسد. در ادامه باید خواص مربوط به جنس مواد را مطابق جدول های ۲ و ۳ مشخص نمود. برای انجام این مرحله بخش Property باز و خواص تک تک مواد به ترتیب وارد شده است. در مرحله اول خواص مربوط به کامپوزیت فیبر کربن با زمینه اپوکسی شامل چگالی، خواص الاستیک و تنش های شکست وارد شد. کامپوزیت فیبر کربن، ایزوتروپ عرضی می‌باشد، به همین دلیل خواص در جهت ۲ و ۳ با هم برابر هستند. ایزوتروپ به معنای ساختاری است که خواص آن به جهت وابستگی ندارد. ایزوتروپ عرضی نیز به معنای ماده‌ای است که خواص آن در دو جهت با هم برابر می‌باشد. در مرحله بعد خواص مربوط به آلومینیوم ۶۰۶۱ شامل چگالی و خواص الاستیک تعریف شد. تعریف آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش مشابه کامپوزیت صورت گرفته است تا مواد در مراحل بعدی مدل سازی (تعریف لایه‌های کامپوزیتی) هماهنگ باشند. خواص مربوط به گلوله سربی نیز به شکل ساده تعریف شده است.



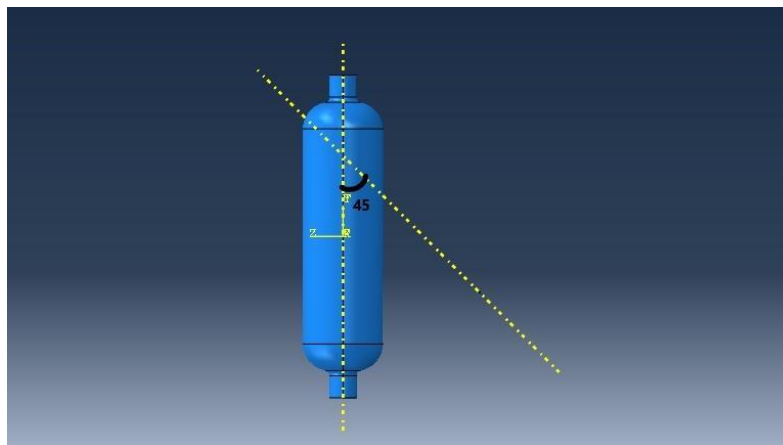
جدول ۲- خواص مکانیکی AI-6061، CFRP، GFRP و AFRP [۳]

نام ماده	چگالی ( $kg/m^3$ )	$E_1$ (Gpa)	$E_2, E_3$ (Gpa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}, \nu_{23}$	$G_{12}$ (Gpa)	$G_{13}, G_{23}$ (Gpa)
Al 6061	۲۷۵۰	۷۰	۷۰	۰.۳	۰.۳	۲۷	۲۷
CFRP	۱۵۷۰	۱۳۵	۸	۰.۲۷	۰.۳۹	۳.۸	۱.۹
AFRP	۱۳۸۰	۸۷	۵.۵	۰.۳۴	۰.۰۲	۲.۲	۵.۵
GFRP	۲۱۰۰	۳۶.۳	۱۰.۸	۰.۲۸	۰.۰۶	۴	۷.۶

جدول ۳- خواص استحکامی AI-6061، CFRP، GFRP و AFRP [۳]

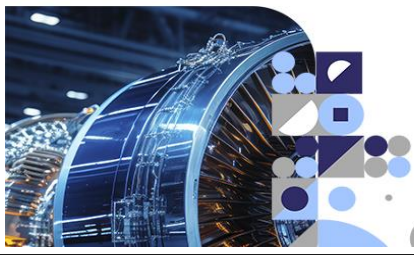
نام ماده	$X_t$ (MPa)	$X_c$ (MPa)	$Y_t$ (MPa)	$Y_c$ (MPa)	S (MPa)
CFRP	۱۸۶۰	۱۴۷۰	۷۶	۸۵	۹۸
AFRP	۱۲۸۰	۳۳۵	۳۰	۱۵۸	۴۹
GFRP	۵۹۶	۵۵۰	۵۵	۱۲۰	۸۶

برای تعریف لایه‌های کامپوزیتی از بخش Create Composite Layup موجود در نرم‌افزار استفاده شده است. در این بخش تعداد لایه‌های کامپوزیتی روی عدد ۷ قرار داده شد (۶ لایه کامپوزیت فیبر کربن و یک لایه آستری). در ادامه ضخامت و زاویه الیاف لایه‌های مختلف تعریف و جنس به آن‌ها نسبت داده شد. در ادامه وارد بخش Assembly شده و دو محیط پارت موجود در این محیط بارگذاری شده است. گلوله با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به افق و به سمت مخزن تنظیم شده است (شکل ۵).

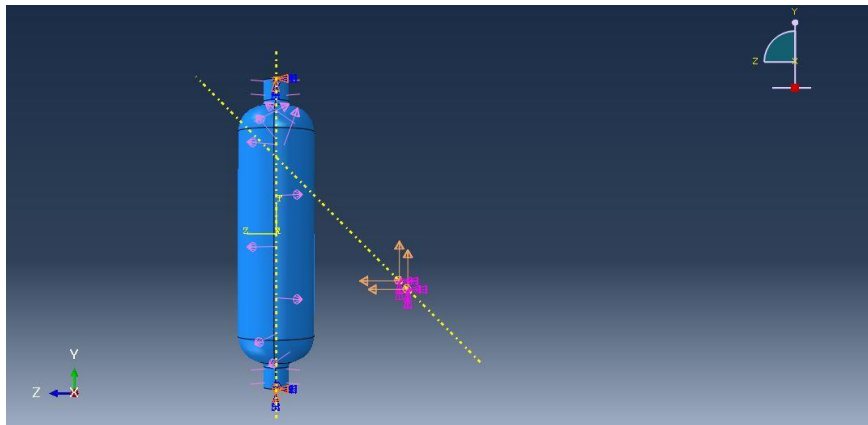


شکل ۵- نمایی از گلوله و مخزن در محیط Assembly

پس از بخش Assembly، برای تعیین حلگر آباکوس از ماژول Step استفاده شده است. نوع حلگر مورد استفاده در این پروژه Dynamic Explicit است. برای مشاهده‌ی نتایج در بازه‌ی زمانی مورد نظر، پارامترهای Time period و Time Scaling Factor به ترتیب برابر ۰.۱ و ۱۰۰ تنظیم شده اند. پس از ورود به بخش Interaction، در قسمت Interaction manager ارتباط بین گلوله و مخزن تعریف می‌شود. در بخش First Surface پوسته‌ی گلوله انتخاب شده است. به همین شکل Second Surface نیز پوسته‌ی مخزن خواهد بود. در این بخش از روش تماس سینماتیک

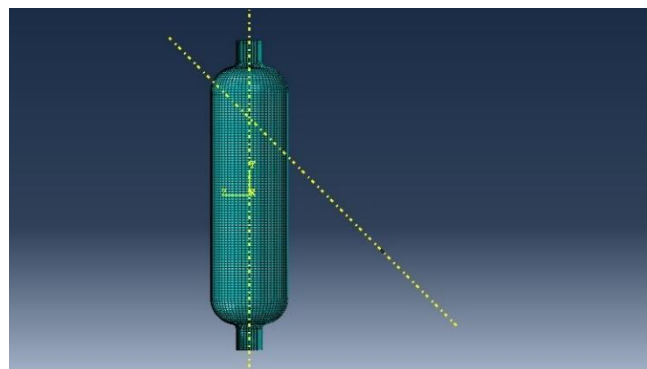


استفاده شده است. در ادامه در بخش خواص تماس، یک رفتار مماسی و یک رفتار عمود تعریف می شود. در قسمت رفتار مماسی ضریب اصطکاک مساوی ۰.۲ تعیین شده است. در بخش رفتار عمودی تماس نیز نوع فشار از نوع سخت بوده است. فشار داخلی در بخش Load از نوع فشاری با اندازه ی ۱۵ مگاپاسکال تعریف شده است. به همین ترتیب در بخش Create Boundary Condition، برای انجام آزمون استاندارد دو سر بالا و پایین مخزن، مقید شده است. برای گلوله در بخش شرایط مرزی یک سرعت عمودی و یک سرعت افقی تعریف شده است و باقی جهات مقید است (شکل ۶).

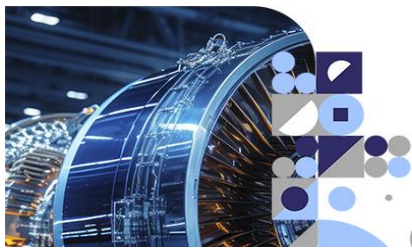


شکل ۶- نمای کلی مخزن و گلوله به همراه نیروها و شرایط مرزی

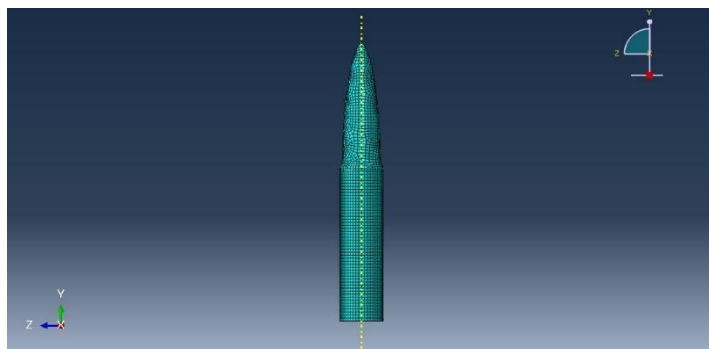
در نهایت مدل به صورت کامل مانند شکل ۷ المان بندی شد. از آن جایی که مدل مخزن به کمک فرایند Revolving ساخته شده است، المان بندی کل مخزن به صورت ثابت انجام شده است. مش استفاده شده برای مخزن از نوع مش چهار وجهی است. دلیل آن که از یک نوع مش استفاده می شود، آن است که مخزن مدل سازی شده یک پارچه است. همان طور که در مقاله مرجع [۳] مشاهده می شود و به پیروی از آن، از مش با اندازه ۰.۰۱ استفاده شده است. البته برای اثبات نوع و ابعاد مش به بررسی نتایج با اندازه المان ۰.۰۴ - ۰.۰۱ پرداخته شد. هنگامی که اندازه مش بیش از ۰.۰۱ انتخاب شد، نرم افزار برخورد و کانتورهای مربوط به آن را نشان نداد. با انتخاب اندازه مش مساوی ۰.۰۱ کانتورهای تنش و جابجایی هنگام برخورد به درستی نمایش داده شد. با انتخاب اندازه مش کمتر از ۰.۰۱، علیرغم تغییرات کم نتایج (تغییرات در حد ۰.۰۰۱) زمان تحلیل بسیار طولانی تر از حالت عادی می شد. همین مسئله سبب شد که اندازه مش مساوی ۰.۰۱ به عنوان بهترین و بهینه ترین حالت مش برای مخزن تحت فشار انتخاب شود. تعداد المان های مخزن مساوی ۷۸۷۲ و تعداد گره ها مساوی ۴۲۹۰ است.



شکل ۷- المان بندی مدل مخزن



به طور مشابه بررسی نوع و اندازه المان ها در گلوله نیز انجام شد. از آن جایی که مدل گلوله نیز به کمک فرایند Revolving ساخته شده است، المان بندی کل گلوله به صورت ثابت انجام می شود. مش استفاده شده برای گلوله از نوع مش چهار وجهی است. دلیل آن که از یک نوع روش مش استفاده می شود، آن است که گلوله مدل سازی شده یک پارچه است. پس از آزمون و خطاهای مشابه با روش مخزن، اندازه المان گلوله ۰.۰۰۰۵ تعیین شد (شکل ۸).



شکل ۸- المان بندی مدل گلوله

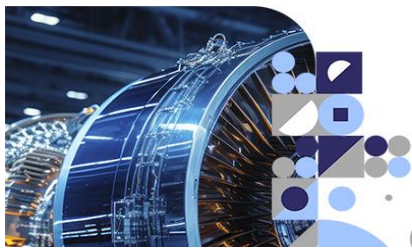
### ۳. تحلیل عددی

همان طور که می دانید مهم ترین متغیر در طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی، استحکام فشاری آن ها است. استحکام فشاری این مخازن باعث می شود که در مقابل ضربه های با سرعت بالا مقاومت داشته باشند و در اثر ضرباتی مانند شلیک دچار تغییر شکل های شدید و ترکیدن نشوند. برای بررسی استحکام فشاری باید میزان جابجایی و تنش این مخازن در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله در نرم افزار آباکوس بررسی شود. تنش و جابجایی کمتر نشان دهنده استحکام فشاری بیشتر می باشند. برای آن که حالت بهینه طراحی مخزن کامپوزیتی تحت فشار که بتواند در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله مقاومت کند، پیدا شود باید تأثیر چندین متغیر در تحلیل بررسی شود. متغیرهایی که در استحکام مخزن کامپوزیتی تحت فشار در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله این مقاله بررسی می شود، شامل زاویه ی الیاف، جنس الیاف و ضخامت لایه ی کامپوزیتی می باشد. در انتها یک حالت بهینه با توجه به استحکام مخزن، وزن و هزینه ی ساخت انتخاب می شود. برای این حالت یک تحلیل مجدد صورت می گیرد تا اثر آستری موجود در آن نیز بررسی گردد.

### ۳-۱. اثر جنس

برای بررسی استحکام سه جنس کامپوزیت CFRP، AFRP و GFRP در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. این سه ماده کامپوزیتی با زمینه اپوکسی بیشترین کاربرد را در زمینه طراحی و ساخت مخازن کامپوزیتی دارند و این به دلیل استحکام کششی است که آن ها می توانند تحمل کنند. در ادامه به استفاده FRP ها در صنعت پرداخته شد. FRP به معنی پلیمرهای تقویت شده با فیبر است و کاربردهای متفاوتی در صنایع مختلف و ساختمان دارد. بیشترین کاربرد این مصالح در مقاوم سازی سازه ها، جهت ترمیم، تقویت و مقاوم سازی ساختمان های بتنی بوده و در صنعت کامپوزیت جهت ساخت قطعات صنایع مختلف است. الیاف FRP با قرار گرفتن و نصب بر روی سطوح بتنی از قبیل دال ها، تیرها، ستون ها، دیوارهای بتنی و فونداسیون بتنی می تواند باعث افزایش مقاومت بتن شوند. همچنین این الیاف می تواند در ساختمان هایی با کاربری مسکونی، تجاری، اداری، صنعتی، تکیه گاه ماشین آلات و تأسیسات سنگین و همچنین سازه های آبی و دریایی مانند سد و کانال نیز





کاربرد داشته باشند. علاوه بر این از الیاف FRP می توان در مقاوم سازی زیرساخت های مهندسی از قبیل پل های جاده ای و ریلی، مخازن آب و مواد شیمیایی، سیلوها و برج های خنک کننده نیز استفاده نمود. کامپوزیت فیبر کربن از انواع کامپوزیت FRP است که برای مقاوم سازی و تعمیر سازه ها و ساختمان به کار می رود. وزن پایین، چگالی کم، رسانایی الکتریکی و گرمایی، ضریب انبساط حرارتی کم و حفظ استحکام در دمای بالا از جمله ی مهم ترین خواص کامپوزیت های فیبر کربن می باشند. کامپوزیت شیشه را با نام GFRP شناخته می شود که به معنی پلیمر اصلاح شده با الیاف شیشه است. کامپوزیت شیشه یا فایبرگلاس نوعی پوشش شیمیایی است که از مواد نفتی (پلیمری) مختلف و الیاف شیشه تولید می شود. رسانای الکتریکی و حرارتی، حفظ استحکام در دمای بالا، چگالی و وزن کم و غیره از جمله خواص این نوع کامپوزیت ها هستند. الیاف کولار سبک تر از الیاف کربن و الیاف شیشه بوده و بیشترین مقدار مقاومت کششی نسبت به وزن را در میان آن ها داراست. فیبر این الیاف تقریباً ۴۳ درصد سبک تر از الیاف شیشه و ۲۰ درصد سبک تر از الیاف کربن می باشد. وزن مخصوص کم و مقاومت کششی بالای این الیاف، سبب تشکیل یک ساختار چقرمه و مقاوم به ضربه با سفتی حدود نصف الیاف کربن می شود. جلیقه ضد گلوله از موفقیت آمیزترین کاربردهای الیاف آرامید می باشد.

### ۳-۲. اثر زاویه الیاف

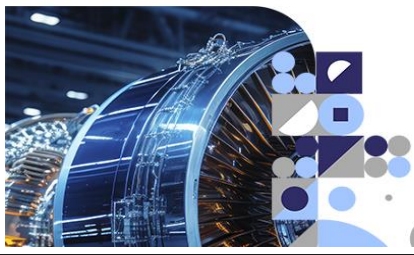
فرایند رشته پیچی یکی از روش های مکانیزه برای تولید قطعات کامپوزیتی که تقارن محوری دارند می باشد. لوله ها و قطعات استوانه ای شکل ساده ترین قطعاتی هستند که با این روش تولید می شوند. در این فرآیند دسته ای از الیاف پیوسته پس از آغشته شدن به رزین به طور منظم و کنترل شده ای، با آرایشی خاص که توسط مهندس طراح تعیین می گردد، به دور یک مندرل دوار پیچیده می شوند. در این روش معمولاً پس از پخت قطعه، مندرل از آن خارج شده و محصول آماده استفاده می باشد. در این پژوهش، مطابق پژوهش های انجام شده توسط محققان پیشین، استحکام مخزن تحت فشار کامپوزیتی تحت زاویه الیاف مختلف بین ۰ تا ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۳. اثر ضخامت الیاف

همان طور که پیش تر بیان شد، پارامتر دیگری که بر استحکام یک مخزن کامپوزیتی تحت فشار در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله تأثیر می گذارد، ضخامت لایه های کامپوزیتی است. بنابراین این پایان نامه با تغییر تعداد لایه های کامپوزیتی به بررسی تأثیر ضخامت بر استحکام مخزن می پردازد.

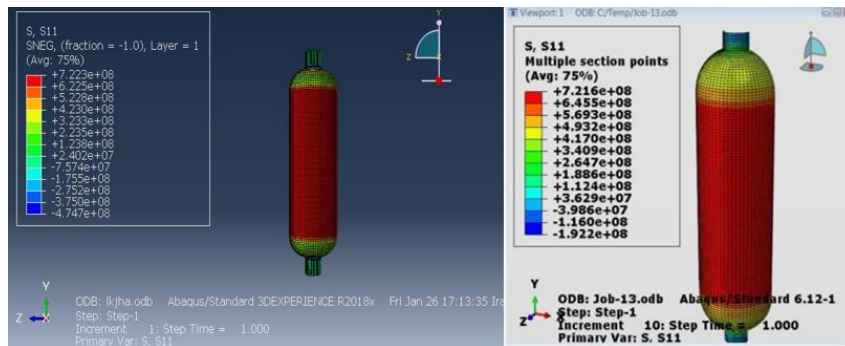
### ۳-۴. اثر آستری

همان طور که پیش تر ذکر شد، آستری یکی از عوامل دیگری است که می تواند روی استحکام مخازن تحت فشار در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله، تأثیرگذار باشد. آستری لایه نازکی از جنس آلومینیوم یا فولاد است که سبب استحکام این دسته از مخازن می گردد. در این تحقیق مخزن کامپوزیتی نوع سوم ابتدا از نظر زاویه الیاف، جنس الیاف و ضخامت لایه کامپوزیتی مورد بررسی قرار بگیرد. در ادامه و پس از تعیین مستحکم ترین مخزن کامپوزیتی تحت فشار، به بررسی اثر آستری روی استحکام پرداخته شد. در این مرحله بهینه ترین حالت ممکن از نظر استحکام بدون حضور آستری نیز مورد تحلیل قرار گرفت تا اثر آستری روی استحکام به صورت مستند بررسی شود.

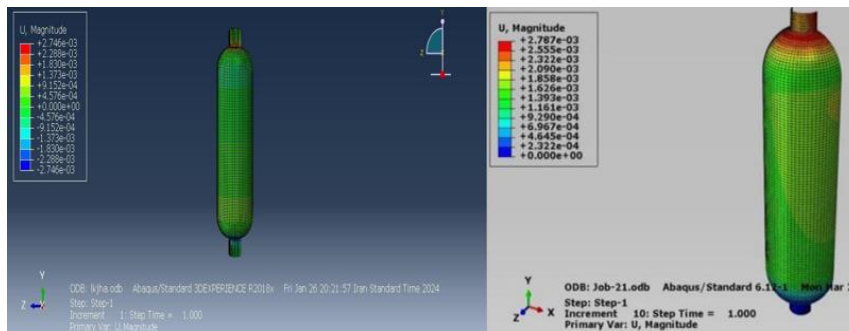


#### ۴. صحت سنجی

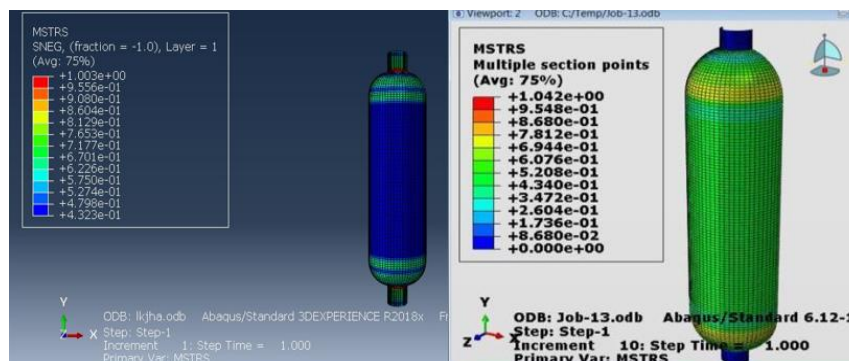
در جهت صحت سنجی نتایج به دست آمده به بررسی تنش، جابجایی و معیار شکست با مقاله مرجع [۳] پرداخته شد. همان طور که در شکل های ۹-۱۱ مشاهده می شود، تنش، جابجایی و معیار شکست بر اساس نظریه حداکثر تنش مخزن تحت فشار کامپوزیتی در حالت بدون گلوله به ترتیب برابر با  $7.223 \times 10^8$  پاسکال،  $2.7464 \times 10^{-3}$  متر و  $1.042 \times 10^0$  می باشد. بر اساس معیار تنش ماکزیمم، در صورتی که تنش اصلی ماکزیمم از مقاومت کششی تک محوری بیشتر باشد، ماده مورد نظر دچار شکست می شود. با مقایسه این مقادیر با تنش و جابجایی به دست آمده در مقاله مرجع، اعتبار سنجی این تحقیق و استحکام مخزن تحت فشار کامپوزیتی به صورت کامل تأیید می شود. در واقع در مقاله مرجع میزان تنش مساوی  $7.216 \times 10^8$  پاسکال، میزان جابجایی مساوی  $2.78 \times 10^{-3}$  متر و  $1.003$  به دست آمده است [۳].



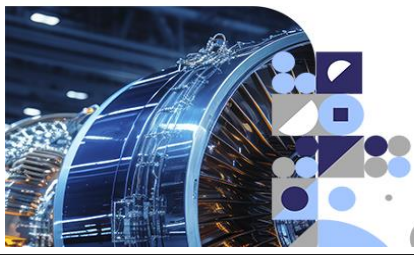
شکل ۹- مقایسه نتایج تنش در تحلیل و مقاله مرجع [۳]



شکل ۱۰- مقایسه جابجایی در تحلیل و مقاله مرجع [۳]



شکل ۱۱- مقایسه معیار شکست بر اساس نظریه حداکثر تنش در تحلیل و مقاله مرجع [۳]



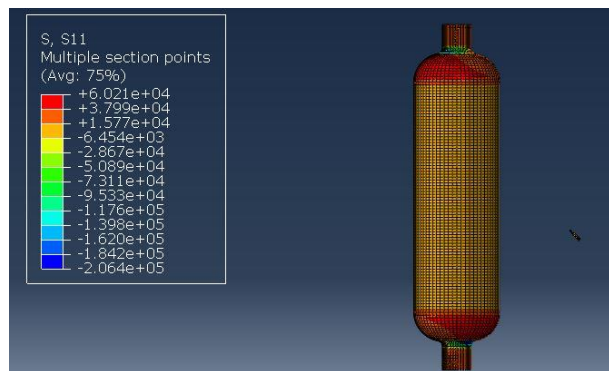
همان طور که مشاهده می شود درصد خطا برای پارامترهای مقایسه شده به ترتیب برابر ۰.۰۹۷ درصد، ۱.۲ درصد و ۰.۹۶ درصد است و در جدول ۴ مشاهده می شود. در واقع این مقادیر نشان می دهند که مخزن کامپوزیتی تحت فشار طراحی شده از استحکام کافی برخوردار است و تحت فشار نمی ترکد.

جدول ۴- صحت سنجی نتایج

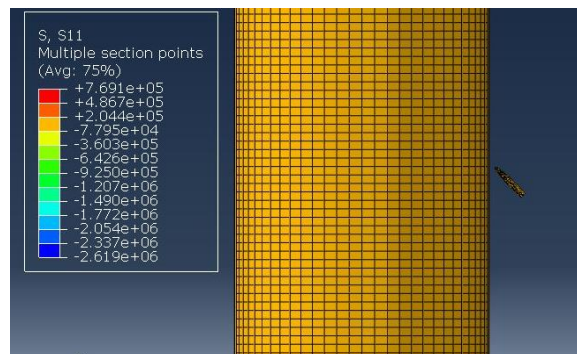
متغیر	نتایج تحلیل	نتایج مرجع [۳]	درصد خطا (%)
تنش (پاسکال)	$7.223 \times 10^8$	$7.216 \times 10^8$	۰.۰۹۷
جابجایی (متر)	$2.7464 \times 10^{-3}$	$2.78 \times 10^{-3}$	۱.۲
معیار شکست بر اساس نظریه حداکثر تنش	۱.۰۴۲	۱.۰۰۳	۰.۹۶

## ۵. بحث و نتایج

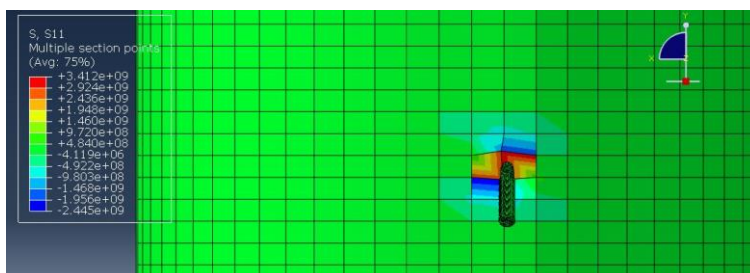
برای مشاهده نتایج تحلیل عددی، لازم است که ماژول Job با موفقیت به پایان برسد. پس از پایان این ماژول، باید بخش نتایج انتخاب شود. در این بخش می توان رفتار مخزن کامپوزیتی تحت فشار را در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله مشاهده کرد و کانتورهای مختلف تنش و جابجایی را مشاهده نمود. در شکل های ۱۲ الی ۱۷ نتایج یکی از تحلیل ها به عنوان نمونه آورده شده است.



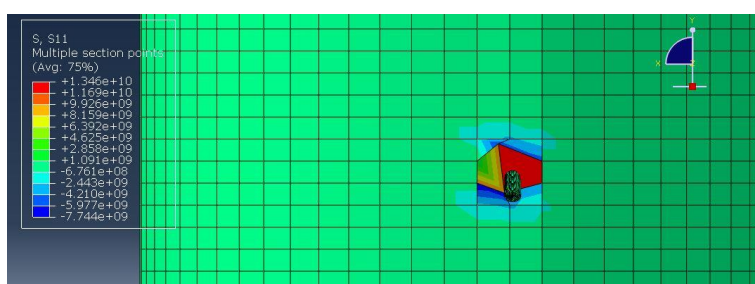
شکل ۱۲- کانتور تنش در آغاز آزمون شلیک



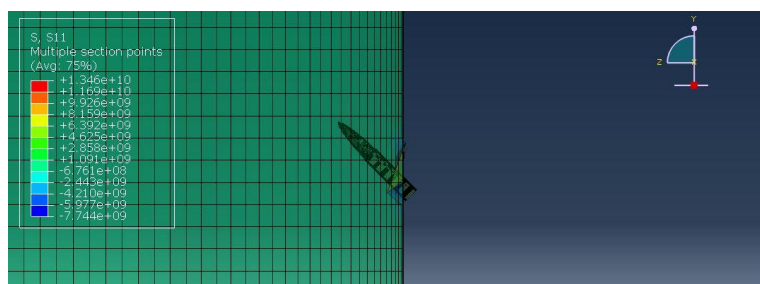
شکل ۱۳- کانتور تنش در میانه آزمون شلیک



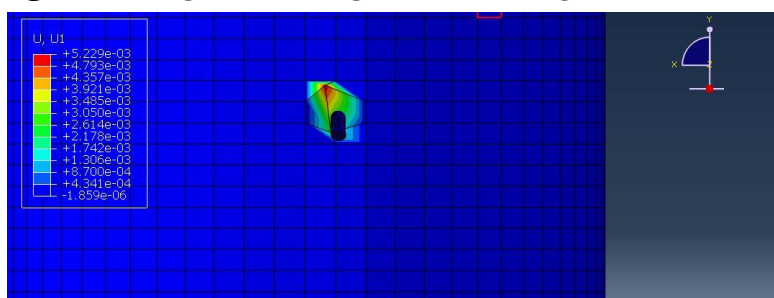
شکل ۱۴- کانتور تنش در لحظه برخورد گلوله



شکل ۱۵- کانتور تنش در لحظه گیر کردن گلوله در مخزن از نمای روبرو



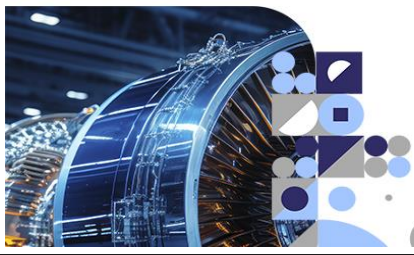
شکل ۱۶- کانتور تنش در لحظه گیر کردن گلوله در مخزن از نمای جانبی



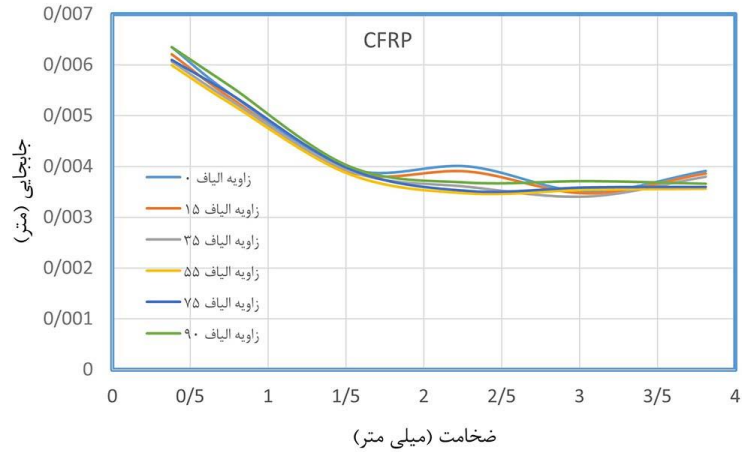
شکل ۱۷- کانتور جابجایی در زمان برخورد گلوله به مخزن

#### ۵-۱. تاثیر ضخامت بر استحکام مخزن تحت فشار کامپوزیتی

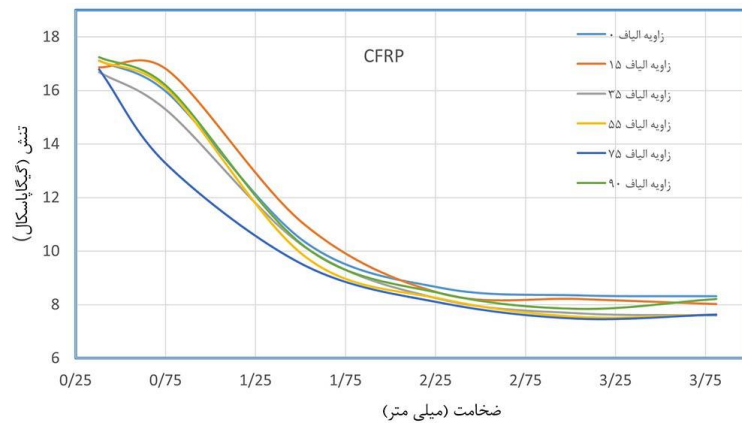
رفتار مخزن تحت فشار کامپوزیتی در مقال ضربه ناشی از برخورد گلوله با تعداد لایه‌های مختلف بررسی شد. در این پژوهش تعداد لایه‌های کامپوزیتی بین ۳ تا ۳۰ متغیر بود و تنش و جابجایی این مخزن به ازای این لایه‌ها به دست آمد. در واقع در این تحقیق اثر تعداد لایه‌ها در حضور زاویه الیاف مختلف بررسی شد تا تعداد لایه بهینه و در نتیجه ضخامت بهینه



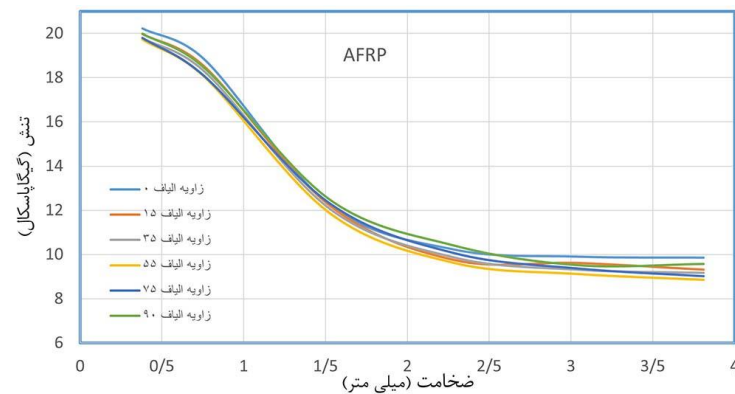
انتخاب شود. لازم به ذکر است که بررسی اثر تعداد لایه‌ها و در نتیجه ضخامت در حضور زاویه الیاف مختلف برای سه ماده CFRP، AFRP و GFRP تکرار شد. نتایج این تحلیل‌ها در شکل‌های (۱۸) الی (۲۳) ارائه شده‌اند.



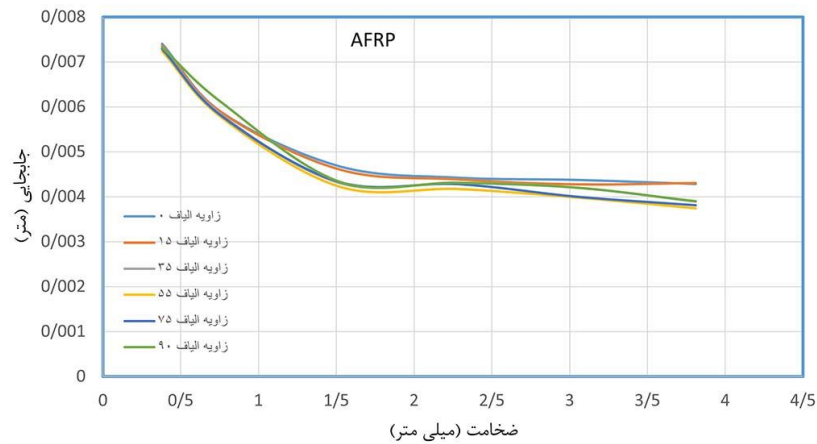
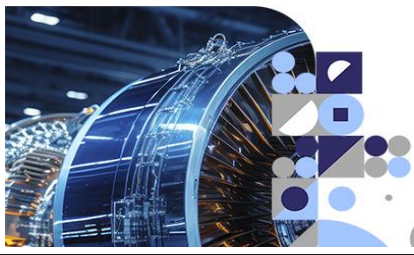
شکل ۱۸- نمودار تغییرات جابجایی بر حسب ضخامت برای الیاف CFRP



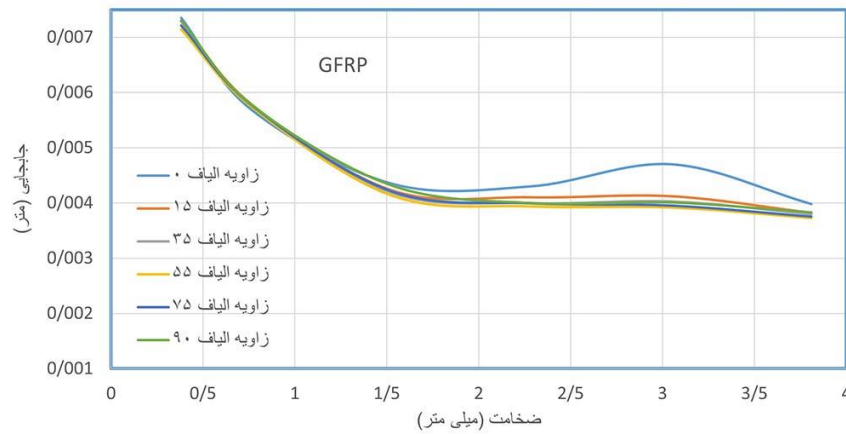
شکل ۱۹- نمودار تغییرات تنش بر حسب ضخامت برای الیاف CFRP



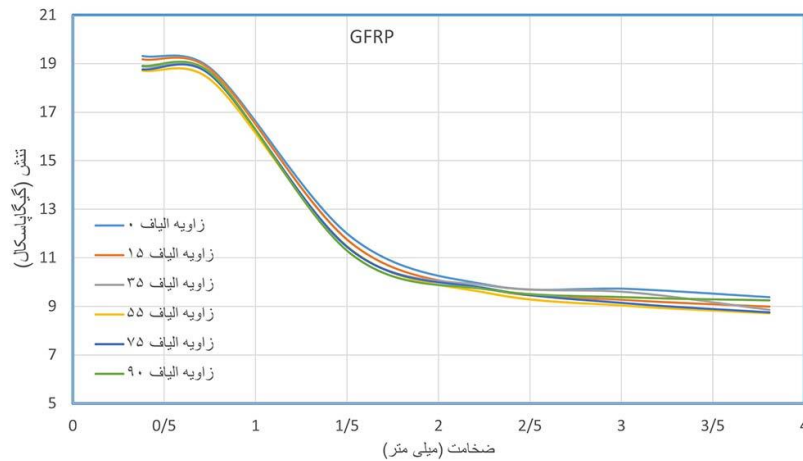
شکل ۲۰- نمودار تغییرات تنش بر حسب ضخامت برای الیاف AFRP



شکل ۲۱- نمودار تغییرات جابجایی بر حسب ضخامت برای الیاف AFRP

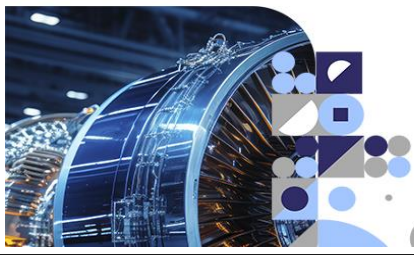


شکل ۲۲- نمودار تغییرات جابجایی بر حسب ضخامت برای الیاف GFRP



شکل ۲۳- نمودار تغییرات تنش بر حسب ضخامت برای الیاف GFRP

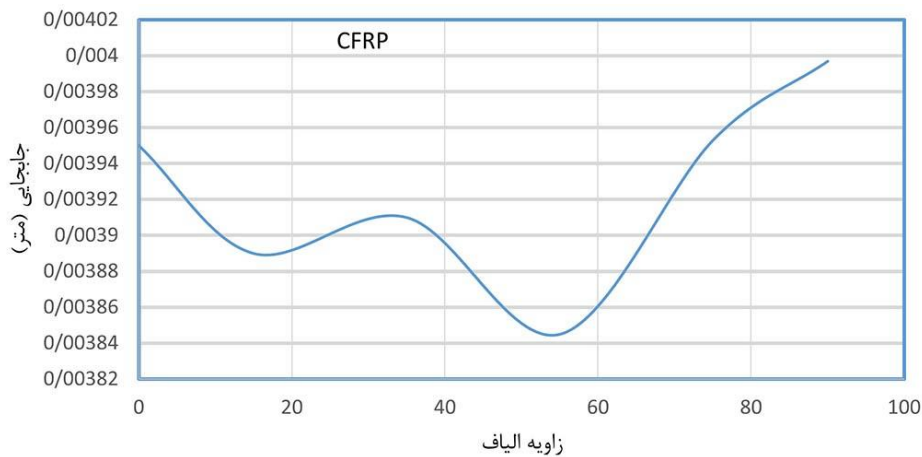
نمودارهای تنش و جابجایی بر حسب ضخامت برای هر سه ماده‌ی AFRP، GFRP و CFRP روندی مشابه را نشان می‌دهد. این نمودارها برای هر سه ماده موجود در تحلیل، دارای روندی نزولی می‌باشد. در واقع به ازای افزایش ضخامت، میزان جابجایی و تنش نیز کاهش می‌یابد. البته شیب تغییرات تنش و جابجایی بر حسب ضخامت، از ضخامت ۱.۵۲۴ میلی‌متری کم می‌شود و روند از این ضخامت به بعد، کندتر پیش می‌رود. بدیهی است که با افزایش ضخامت، وزن سازه نیز



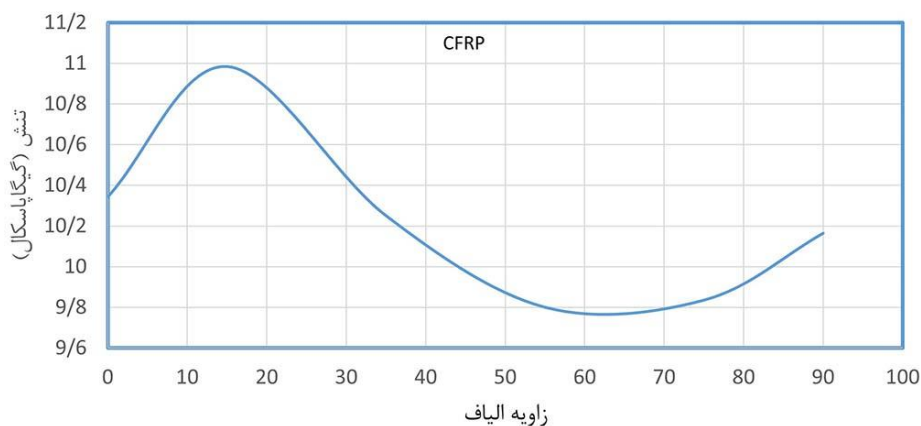
افزایش می‌یابد و هزینه‌های ساخت نیز بالاتر می‌رود. به همین دلیل ضخامت ۱.۵۲۴ که دارای تنش و جابجایی کمتری نسبت به سایر ضخامت‌ها است و از نظر هزینه ساخت و وزن نیز مقرون به صرفه می‌باشد، برای ادامه کار این تحقیق انتخاب می‌شود.

## ۵-۲. تاثیر زاویه الیاف بر استحکام مخزن تحت فشار کامپوزیتی

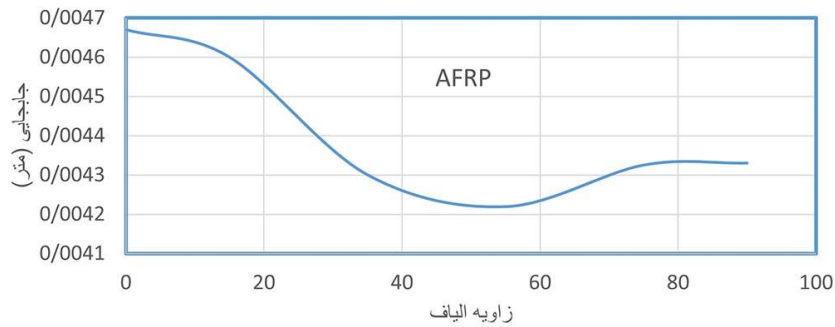
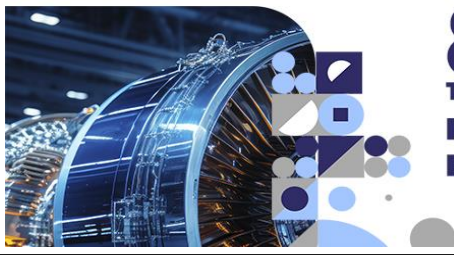
همان‌طور که در بخش قبل این تحقیق مشخص شد، ضخامت ۱.۵۲۴ میلی‌متری برای ساخت این مخازن تحت فشار کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه برای این ضخامت، نمودارهای تنش و جابجایی برحسب زاویه الیاف ترسیم شد. نمودارهای تنش و جابجایی برای هر سه نوع الیاف CFRP، GFRP و AFRP در شکل‌های ۲۴ الی ۲۹ ارائه شده‌اند. طبق مراجع [۳ و ۴]، چینش الیاف با زاویه +۵۵ و -۵۵ بهترین چینی می‌باشد که وجود دارد. طبق تئوری کلاسیک مواد مرکب با استفاده از محاسبات ریاضی، عدد ۵۴.۷ بهترین زاویه چینش لایه‌ها برای اشکال استوانه‌ای به دست آمده است.



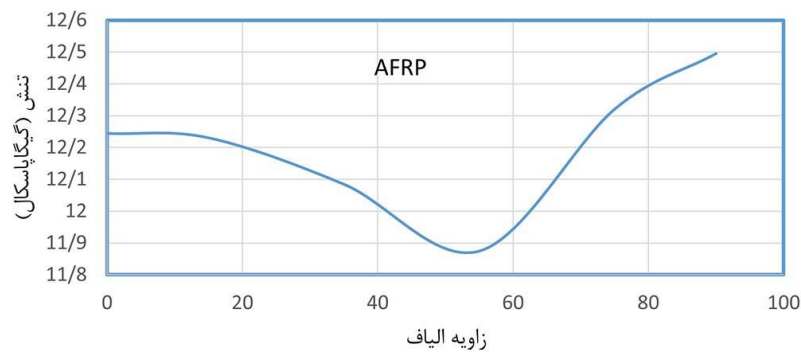
شکل ۲۴- نمودار تغییرات جابجایی برحسب زاویه الیاف برای الیاف CFRP



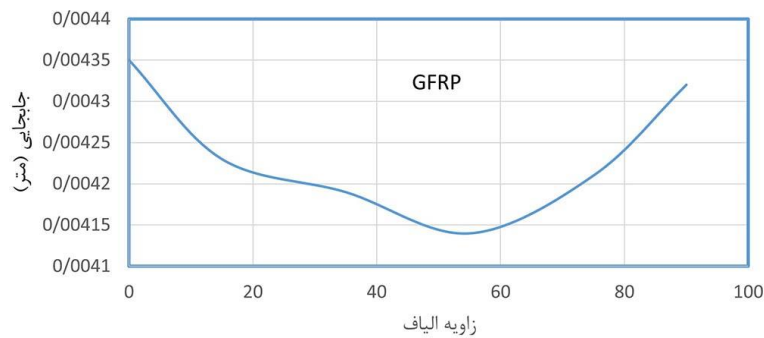
شکل ۲۵- نمودار تغییرات تنش برحسب زاویه الیاف برای الیاف CFRP



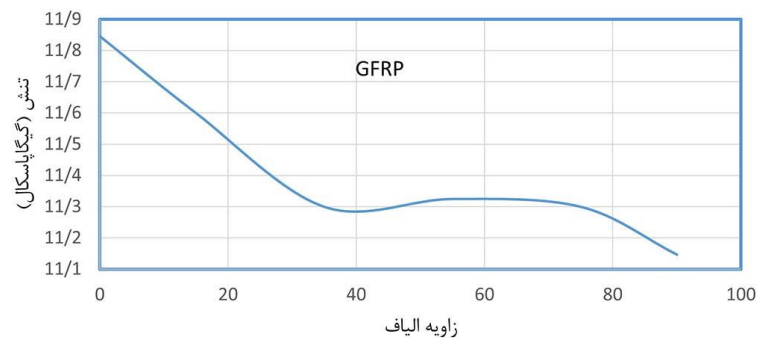
شکل ۲۶- نمودار تغییرات جابجایی بر حسب زاویه الیاف برای الیاف AFRP



شکل ۲۷- نمودار تغییرات تنش بر حسب زاویه الیاف برای الیاف AFRP

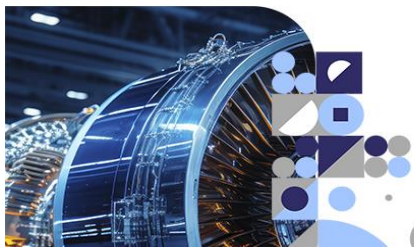


شکل ۲۸- نمودار تغییرات جابجایی بر حسب زاویه الیاف برای الیاف GFRP



شکل ۲۹- نمودار تغییرات تنش نرمال بر حسب زاویه الیاف برای الیاف GFRP

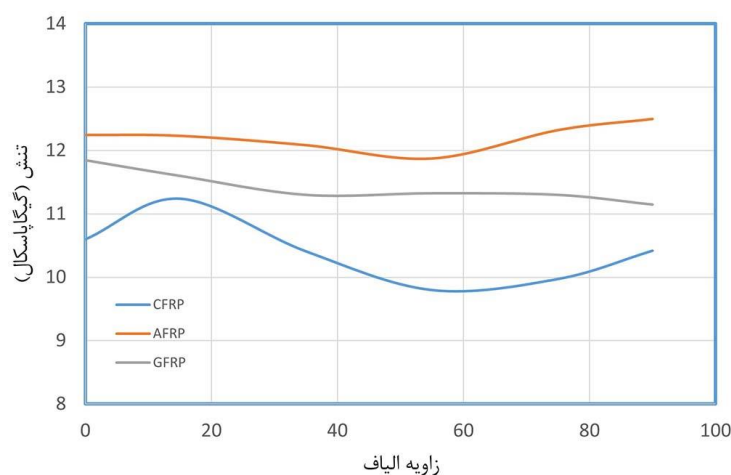




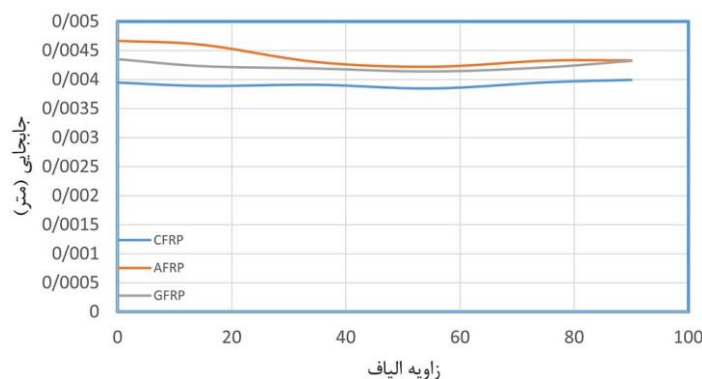
همان طور که مشاهده می شود، روند تغییرات تنش و جابجایی برحسب زاویه الیاف به گونه ای است که در زاویه الیاف ۵۵ درجه به کمترین مقدار خود می رسد. در واقع جابجایی در ابتدا زیاد است و با افزایش زاویه الیاف، کاهش می یابد. این مقدار در زاویه ۵۵ درجه به کمترین مقدار خود رسیده و پس از آن دوباره افزایش می یابد. روند تغییرات تنش نیز به گونه است که تنش در ابتدا کمی افزایش می یابد و پس از آن وارد روند نزولی می شود و در زاویه الیاف ۵۵ درجه به کمترین مقدار خود می رسد. پس از عبور از زاویه الیاف ۵۵ درجه، روند تنش نیز دوباره تغییر خواهد کرد و صعودی خواهد شد. این مشاهدات سبب می شود که زاویه الیاف ۵۵ درجه به عنوان زاویه الیاف بهینه برای طراحی این نوع مخزن انتخاب شود.

### ۳-۵. تاثیر جنس الیاف بر استحکام مخزن تحت فشار کامپوزیتی

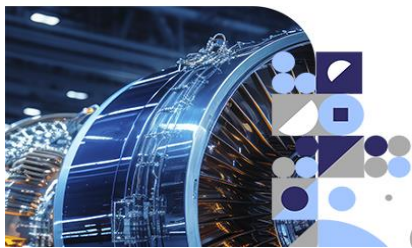
در این تحقیق جنس الیاف مختلفی مانند الیاف شیشه، کربن و آرامید مورد بررسی قرار گرفتند تا اثر آنها روی استحکام مخازن تحت فشار کامپوزیتی بررسی شود. در ادامه اثر جنس الیاف روی تنش و جابجایی مخزن تحت فشار کامپوزیتی مورد بررسی قرار می گیرد و روند تغییرات این پارامترها در قالب دو نمودار ترسیم خواهد شد. نمودارهای تنش برحسب زاویه الیاف و جابجایی بر حسب زاویه الیاف برای جنس های CFRP، AFRP و GFRP در شکل های ۳۰ و ۳۱ نشان داده شده است.



شکل ۳۰- تنش برحسب زاویه الیاف برای CFRP، AFRP و GFRP



شکل ۳۱- جابجایی برحسب زاویه الیاف برای CFRP، AFRP و GFRP



همانطور که مشاهده می‌شود الیاف CFRP نسبت به AFRP و GFRP دارای تنش و جابجایی کمتری است. همین مسئله سبب می‌شود که استفاده از الیاف CFRP استحکام بیشتری را به مخزن تحت فشار کامپوزیتی بدهد. استحکام بالای CFRP، سبب نادیده گرفتن مزیت‌های الیاف دیگر مانند الیاف شیشه می‌شود. الیاف شیشه دارای قیمت پایین تری نسبت به الیاف دیگر دارد. از طرف دیگر الیاف آرامید دارای قیمت بالایی هستند.

#### ۴-۵. تاثیر آستری بر استحکام مخزن تحت فشار کامپوزیتی

در این تحقیق پس از معرفی حالت بهینه طراحی مخزن تحت فشار کامپوزیتی در مقابل ضربه ناشی از برخورد گلوله از نظر پارامترهایی مانند زاویه الیاف، جنس الیاف و ضخامت، اثر آستری نیز بررسی شد. همان‌طور که می‌دانید این تحقیق ابتدا یک آستری آلومینیومی را در طراحی خود در نظر گرفت و میزان استحکام آن را سنجید. در ادامه تحلیل انجام شده روی حالت بهینه (ماده CFRP، با ضخامت ۱.۵۲۴ میلی‌متر و زاویه الیاف  $\pm 55$  درجه) بدون حضور آستری نیز انجام شد. در حالت بدون آستری، مخزن دارای جابجایی ۵.۷۴ میلی‌متری است. این میزان جابجایی نسبت به جابجایی ۵.۲۲۹ میلی‌متری در حالت دارای آستری، افزایش یافته است. این مسئله نشان می‌دهد که افزودن آستری اثر مثبتی بر استحکام این نوع مخازن دارد.

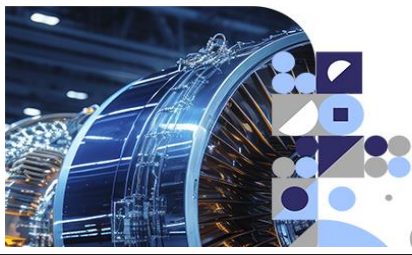
#### ۶. نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا یک مخزن تحت فشار کامپوزیتی مطابق با نمونه‌ای استاندارد از پژوهش‌های پیشین در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. در ادامه اعتبار و درستی مدل شبیه‌سازی با مقایسه نتایج با پژوهش‌های پیشین اعتبارسنجی شد و اعتبار نتایج این پایان‌نامه تأیید گشت. در نهایت نیز آزمون ضربه ناشی از برخورد گلوله روی مخزن تحت فشار کامپوزیتی در نرم‌افزار انجام شد.

همان‌طور که مشاهده شد، ضربه ناشی از برخورد گلوله بر استحکام این دسته از مخازن تأثیر گذار است. در واقع این ضربه می‌تواند با افزایش تنش و جابجایی ایجاد شده روی پوسته مخزن، سبب کاهش استحکام این دسته از مخازن شود. پس از مشاهده و بررسی تأثیر ضربه ناشی از برخورد گلوله بر استحکام این مخازن، به بررسی اثر متغیرهای مختلف روی استحکام این دسته از مخازن پرداخته شد. اولین پارامتر مؤثر تعداد لایه‌های کامپوزیتی و در نهایت ضخامت کلی آن‌ها است. طبق نتایج تحلیل‌های این پایان‌نامه، افزایش تعداد لایه‌های کامپوزیتی و ضخامت کلی آن‌ها سبب کاهش تنش و جابجایی ایجاد شده در پوسته این مخازن می‌شود و استحکام سازه مخزن را افزایش می‌دهد. اما افزایش ضخامت باید با توجه به وزن و هزینه ساخت صورت گیرد.

متغیر مؤثر دیگر زاویه الیاف می‌باشد. طبق نتایج این پایان‌نامه با افزایش زاویه الیاف تا ۵۵ درجه، تنش و جابجایی ایجاد شده در پوسته مخزن کاهش می‌یابد و پس از ۵۵ درجه روند افزایشی می‌شود. این مسئله سبب شد که زاویه الیاف ۵۵ درجه به عنوان زاویه الیاف بهینه برای ساخت این دسته از مخازن تحت فشار استفاده شود.

جنس الیاف نیز متغیر دیگری است که می‌تواند روی استحکام این دسته از مخازن تحت فشار کامپوزیتی در برابر ضربه ناشی از برخورد گلوله، اثر گذار باشد. در این پایان‌نامه جنس الیاف مختلفی مانند الیاف کربن، الیاف شیشه و الیاف کولار مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به عواملی مانند استحکام، هزینه ساخت و وزن سازه، الیاف کربن برای ساخت این دسته از مخازن انتخاب شد.



در پایان نیز متغیر آستری مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که ملاحظه شد مخزن تحت فشار کامپوزیتی در برابر ضربه ناشی از برخورد گلوله، در حضور آستری جابجایی کمتری نشان می‌دهد که این مسئله به معنای تأثیر مثبت آستری بر استحکام این دسته از مخازن است.

## ۷. مراجع

1. Moskvichev E (2016) Numerical modeling of stress-strain behavior of composite overwrapped pressure vessel. *Procedia Struct Integr* 2: 2512-2518.
2. Wang L, Zheng C, Luo H, Wei S, Wei Z (2015) Continuum damage modeling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel. *Compos Struct* 134: 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.107>.
3. Sulaiman S, Borazjani S, Tang SH (2013) Finite element analysis of filament-wound composite pressure vessel under internal pressure. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 50. doi:10.1088/1757-899X/50/1/012061
4. Parnas L, Katirci N (2002) Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions. *Composite Structures* 58:83-95.
5. Demir I, Sayman O, Dogan A, Arıkan V, Arman Y (2015) The effects of repeated transverse impact load on the burst pressure of composite pressure vessel. *Compos B Eng* 68:121-125. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.038>.
6. Shi Gao L (2014) Design and Manufacture of Composite CNG Cylinders. *Appl Mech Mater* 670-671:955-959.
7. Nirbhay M, Juneja S, Dixit A, Misra RK, Sharma S (2015) Finite Element Analysis of All Composite CNG Cylinders. *Procedia Mater Sci* 10:507-512
8. Chauhan GS, Awasthi A (2018) Design and Analysis of high pressure composite vessels. *Int J Latest Eng Manag Res* 3(6): 96-102.
9. Radhika M, Chandra Shekar K, Rao GV (2014) Design, Fabrication and Testing of Composite Overwrapped Pressure Vessel for CNG Storage. *Int J Eng Res Technol* 3(12):136-138.
۱۰. علیخانی زهرا (۱۳۹۹) بررسی خزش در مخازن کامپوزیتی تحت فشار برای خودرو. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، دانشکده فنی و مهندسی.
۱۱. معتضدیان مهدی (۱۳۹۹) طراحی عددی مخزن کامپوزیتی تحت معیارهای شکست. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارسنجان، دانشکده فنی و مهندسی.
۱۲. سیدی سیدمهدی (۲۰۲۰) مطالعه تجربی، عددی و بهینه سازی مخازن کامپوزیتی با آستری غیرفلزی (CNG نوع چهارم). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ایوان کی، دانشکده برق، کامپیوتر و مکانیک.
13. Seiff H. Natural Gas Vehicle Cylinder Safety, Training and Inspection Project. Clean Vehicle Education Foundation. 2009.
14. Runefors M, Egardt E. Tactical depressurization of hydrogen and CNG tanks using rifles and other projectiles. Sweden: International Conference on Hydrogen Safety. 2021. 1-12.