



شبیه‌سازی و تحلیل نوع شکل صفحات انتهایی مخازن پلی‌اتیلنی روی زمین و مدفون در خاک

مهدی وقاری اسکویی^{۱*}، علی کاشی^۲

۱. کارشناس واحد تحقیق و توسعه، شرکت نشاگستر پردیس

۲. مدیر عامل، شرکت نشاگستر پردیس و آکو آب کاسپین

*نویسنده مسئول: mahdivaos@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

<https://doi.org/10.82385/jacms.2025.1199524>

چکیده

با توجه به کاربرد گسترده مخازن پلی‌اتیلنی برای نگهداری مایعات، طراحی مناسب آنها از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق، یافتن بهترین الگو برای کفه طرفین در مخازن پلی‌اتیلنی روی زمین و مدفون با مدل‌سازی نرم‌افزاری و تحلیل تنش و کرنش می‌باشد. این مخزن با استفاده از جنس پلی‌اتیلن تولید شده و حاصل پیچاندن یک پروفیل هندسی حول محور مخزن است. برای این موضوع، تاثیر شکل صفحات انتهایی مخازن پلی‌اتیلنی روی زمین و دفن شده بر میزان تنش و تغییر شکل مخزن و مناسب بودن هر یک در نرم‌افزار انسیس مورد بررسی قرار گرفته است. نوع کفه‌های در نظر گرفته شده برای انجام این پژوهش به صورت تخت و منحنی هستند و اعمال اثر خاک به صورت سه‌بعدی و با شبکه‌بندی خاک در نظر گرفته شده است. خواص مواد استفاده شده در این مقاله از نتایج آزمایشگاهی استخراج شده است. از جمله نتایج به دست آمده که نشان‌دهنده مناسب‌تر بودن استفاده از کفه منحنی است، کاهش میزان تغییر شکل بیشینه از ۶۸۱ میلی‌متر در کفه صاف به ۵۷/۶ میلی‌متر در کفه منحنی، بر روی زمین و در ضخامت یکسان بوده است، که کاهش قابل توجه نسبت به مقدار با کفه تخت را دارد.

کلمات کلیدی: مخازن پلی‌اتیلن، کفه طرفین، تحلیل تنش، مخازن روی زمین و دفن شده، خواص مواد

مقدمه

کفه‌های تخت معمولاً برای مخازن با ارتفاع کم و حجم بالا مناسب هستند. این نوع کفه‌ها به طور معمول در مخازن آب استفاده می‌شوند که نیاز به فشار داخلی کمی دارند. طراحی ساده و ساخت راحت‌تر آن‌ها به کاهش هزینه‌های تولید و نصب کمک می‌کند؛ همچنین این نوع کفه به نسبت کفه‌های انحنادار فضای کمتری را اشغال می‌کند. کفه‌های انحنادار به صورت منحنی طراحی می‌شوند و به طور خاص برای تحمل فشارهای داخلی بالا طراحی شدند. این نوع کفه‌ها، معمولاً در مخازن بزرگ و صنعتی استفاده می‌شوند، که نیاز به ذخیره‌سازی مایعات در شرایط فشار بالا دارند و معمولاً با توزیع بهتر فشار، خطر نشست را نیز کاهش می‌دهند.

مور و تاملینسون [۱] به بررسی چهار نوع کفه، برای یک هندسه با بدنه یکسان، در یک مخزن ذخیره با جنس Sa-516 70 پرداختند. در این مقاله نتایج استخراج شده از یک کد توسعه داده شده تجاری، با نتایج تحلیل المان محدود مقایسه شده است. با توجه به ضخامت بالاتر استفاده شده برای کفه تخت در تحلیل‌های انجام شده، تنش موضعی بالاتری به ویژه در نزدیکی نقاط اتصال بدنه به کفه‌های طرفین در مقایسه با موارد غیر تخت و انحنادار، حتی با ضخامت کمتر از خود نشان داده است. کیم و چو [۲] به بررسی رفتار مکانیکی مخازن پلیمری مدفون زیر زمین پرداختند. دو روش برای اعمال اثر خاک در این پژوهش استفاده شده که یکی شبکه‌بندی کامل سه‌بعدی خاک اطراف مخزن و دیگری استفاده از معادل فنریت در اطراف مخزن است. روش استفاده شده برای حل معادلات تنش در مسئله به روش المان محدود و در نرم‌افزار آباکوس بوده است. تیواری و هرا [۳] به بررسی تنش و کرنش در سازه یک مخزن نگهداری آب بر روی زمین به همراه سازه پشتیبان آن پرداختند. نرم‌افزار استفاده شده در این پژوهش انسیس بوده و مقادیر کرنش و تنش ون مایز به عنوان معیار بررسی رفتار ماده مورد تحقیق قرار گرفتند. در این پژوهش همچنین شرایط ارتعاشاتی سازه نیز بررسی شده است. وانگ و همکاران [۴] به بررسی تنش در ساختار یک مخزن با کفه‌های بیضوی شکل، برای یافتن یک فرمول تحلیلی جهت محاسبه تنش در نقطه اتصال بین کفه و بدنه اصلی مخزن

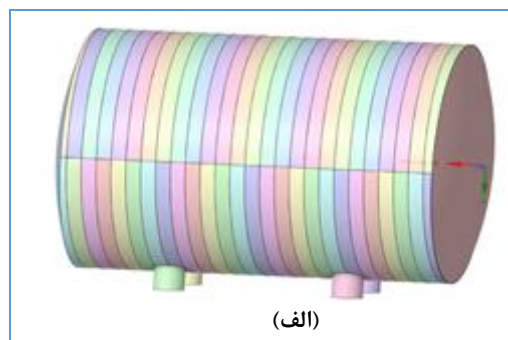
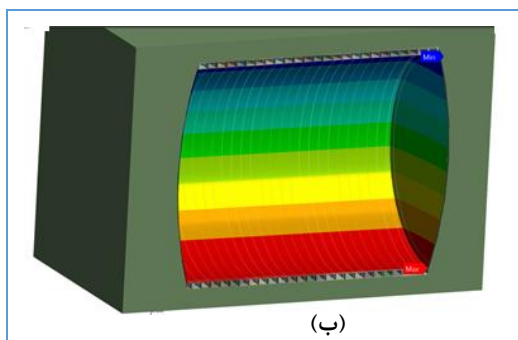


پرداختند. در این پژوهش برای بررسی روش‌های تحلیل از آزمایش استفاده شده و فرمول‌های حاصله تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشتند. تیاکانکو و همکاران [۵] به بهینه‌سازی هندسه یک مخزن پلی‌اتیلن ذخیره مایعات پرداختند. روش استفاده شده برای حل معادلات تنش و کرنش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس بوده است. تنش معادل در نظر گرفته شده بر روی سازه در این مقاله تنش ون مایرز بوده است. صابر و موسی [۶] با استفاده از یک روش عددی، به بررسی روش‌های برای کاهش تنش در یک مخزن نگهداری با کفه‌های مخروطی شکل پرداختند. برای حل معادلات حاکم بر تنش در این مقاله از روش المان محدود استفاده شده است. خروجی این مقاله کاهش میزان تنش در نقاط نزدیک به تماس بین بدنه استوانه‌ای شکل مخزن و نیز کفه، با استفاده از سازه‌های تقویت‌کننده بوده است.

هدف از انجام این پروژه یافتن بهترین الگو از بین دو الگوی صاف و منحنی برای کفه طرفین مخزن نگهداری آب، در سایر شرایط هندسی یکسان، برای استفاده در کارکردهای صنعتی می‌باشد. این مخازن با استفاده از جنس پلی‌اتیلن تولید شده و حاصل پیچاندن یک پروفیل هندسی، حول محور آن است. به دلیل نبودن معیار دقیق برای انتخاب کفه بر اساس ابعاد، برای استفاده‌ای خاص با کاربرد صنعتی لازم است تا با ثابت نگه‌داشتن ابعاد تنه استوانه‌ای میانی مخزن، بهترین شکل کفه از بین دو حالت ذکر شده انتخاب شوند. برای بررسی و تصمیم‌گیری بر روی این مسئله، از تحلیل نتایج تنش و تغییر شکل استفاده می‌گردد. همچنین از شبکه‌بندی سه بعدی و کامل خاک در نرم‌افزار انسیس استفاده می‌گردد.

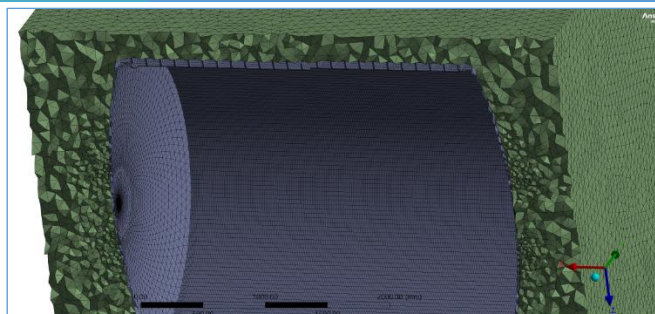
مدل‌سازی و شبیه‌سازی

هندسه مسئله با استفاده از کشیدن یک مستطیل با حاشیه ضخامت معین و چرخاندن آن حول یک محور ایجاد شده است. میزان طول، عرض و ضخامت پروفیل مستطیلی به ترتیب برابر با ۱۲۰ میلی‌متر، ۸۰ میلی‌متر و ۷ میلی‌متر هستند؛ همچنین قطر در نظر گرفته شده برای دوران هندسه برابر با ۲/۵ متر می‌باشد. برای ایجاد کفه طرفین این مخزن از دو الگوی تخت و انحنادار برای مقایسه و انتخاب طرح بهتر استفاده شده است. برای حل مخازن دفن شده در زیر خاک دامنه خاک ایجاد و ناحیه حضور خاک شبکه‌بندی شده است. در شکل (۱) نمونه هندسه رسم شده برای مخزن دارای کفه انحنادار بر روی زمین (الف) و مدفون به همراه خاک (ب) نشان داده شده است. میزان شکم‌دادگی کفه با هندسه انحنادار برابر با ۲۰ سانتی‌متر طراحی شده است.



شکل ۱: مخزن با کفه انحنادار بر روی زمین

برای اعمال بار وزن آب با اعمال شتاب گرانش و نیروی هیدرواستاتیکی با چگالی ماده معادل آب این کار صورت گرفته است. در شکل (۲) در ادامه نمونه شبکه بندی انجام شده بر روی مخزن و نیز خاک به صورت همزمان در یک برش از هر دو نشان داده شده است. شبکه‌بندی استفاده شده از نوع ترکیب مثلثی - مربعی بوده که در قسمت بدنه استوانه مخزن از نوع مربعی زده شده و در سایر نقاط به دلیل شرایط هندسه و به صورت اتوماتیک از شبکه‌بندی مثلثی استفاده شده است. جدول (۱) تعداد المان‌های شبکه‌بندی استفاده شده برای هر کدام از شرایط مورد مطالعه را ارائه می‌دهد.



شکل ۲: شبکه‌بندی انجام شده برای حل مسئله

جدول ۱: تعداد المان‌های شبکه استفاده شده برای هر کدام از شرایط مورد مطالعه

تعداد شبکه	مخزن مورد تحت مطالعه
۴۵۰۰۰	مخزن روی زمین با کفه صاف و ضخامت ۲۰ cm
۵۰۰۰۰	مخزن روی زمین با کفه صاف و ضخامت ۴۰ cm
۵۲۰۰۰	مخزن روی زمین با کفه منحنی
۸۷۳۰۰	مخزن مدفون با کفه صاف
۹۹۸۰۰	مخزن مدفون با کفه منحنی

برای اعمال خواص مواد خاک از موارد پیش فرض موجود در نرم‌افزار استفاده شده و برای پلی‌اتیلن مخزن موارد اعمال شده در جدول (۲) ذکر شدند. البته لازم به ذکر است که میزان مدول واکنشی خاک برابر با ۲۱۷۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: خواص استفاده شده برای مخزن پلی‌اتیلن

مقدار	واحد	خاصیت
۲۲	MPa	تنش تسلیم کششی
۷/۹۳	MPa	حد تسلیم فشاری
۰/۴۵	-	ضریب پواسون
۷۹۳	MPa	مدول یانگ
۲۰۰	MPa	مدول یانگ ۵۰ ساله
۹۵۰	Kg.m ⁻³	چگالی

میزان مدول یانگ ۷۹۳ مگاپاسکال بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از شرکت است که بسیار نزدیک به عدد ۸۰۰ مگاپاسکال ارایه شده در استاندارد ISO 9116-1 بوده و مدول یانگ ۲۰۰ مگاپاسکال برای شرایط گذر عمر ۵۰ سال از این ماده است. به دلیل هدف مقایسه بین شرایط عملکرد دو مخزن با کفه‌های منحنی و نیز صاف در این پروژه مدول‌های یانگ در موارد مقایسه یکسان هستند و تنها در شرایط مخزن با کفه انحنادار در زیر خاک، مدول با گذشت عمر برای حصول اطمینان در نظر گرفته شده است. در جدول (۳) برای اطمینان از عملکرد شبکه‌بندی انجام شده، نتایج مطالعه استقلال از شبکه در حالت مخزن مدفون با کفه‌های صاف، با بررسی خروجی تنش بیشینه به ازای تعداد شبکه‌های استفاده شده (برای مجموع خاک و مخزن) ارایه شده است؛ نتیجه حاصله نشان‌دهنده خطایی کمتر از یک درصد، در شرایط افزایش ۷۵ درصدی تعداد شبکه است.

جدول ۳: استقلال از شبکه بر حسب تغییر شکل بیشینه

تعداد شبکه	مقدار تغییر شکل (میلی‌متر)
۴۹۸۰۰	۱/۴۷۳۵
۸۷۳۰۰	۱/۴۷۳

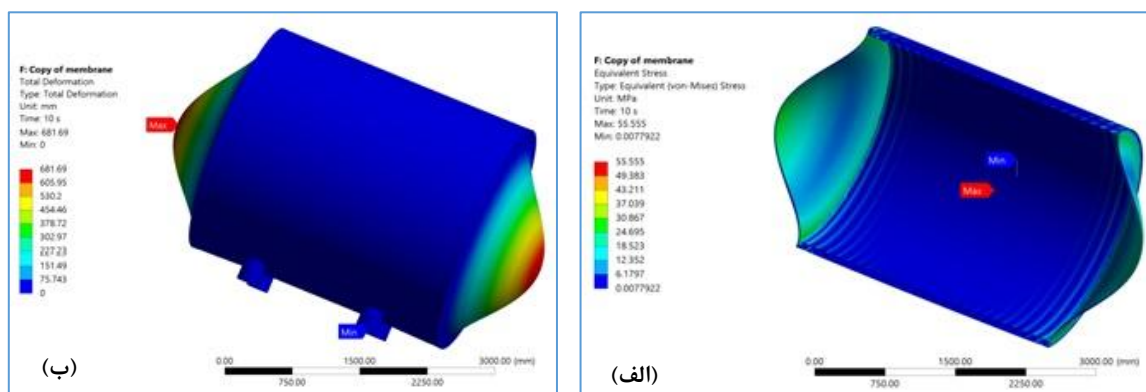


نتایج و بحث

نتایج به چهار بخش تقسیم خواهند شد. دو قسمت مربوط به مخزن دارای کفه تخت بر روی زمین و دفن شده و دیگری برای مخزن دارای کفه‌های انحنادار خواهد بود.

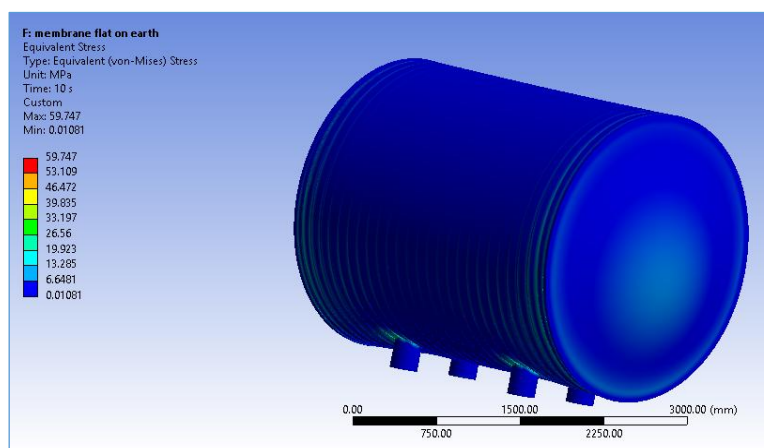
مخزن با کفه‌های صاف بر روی زمین

با توجه به مقادیر تنش به دست آمده، این مخزن کارایی لازم را برای نگهداری آب بر روی زمین را ندارد. در شکل (۳-الف) میزان تنش در نمای برش خورده مخزن و شکل (۳-ب) میزان تغییر شکل کل در مخزن بر روی سطح زمین با کفه‌های صاف را نشان می‌دهند.



شکل ۳: میزان تنش و تغییر شکل در مخزن با کفه‌های تخت با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر بر روی زمین

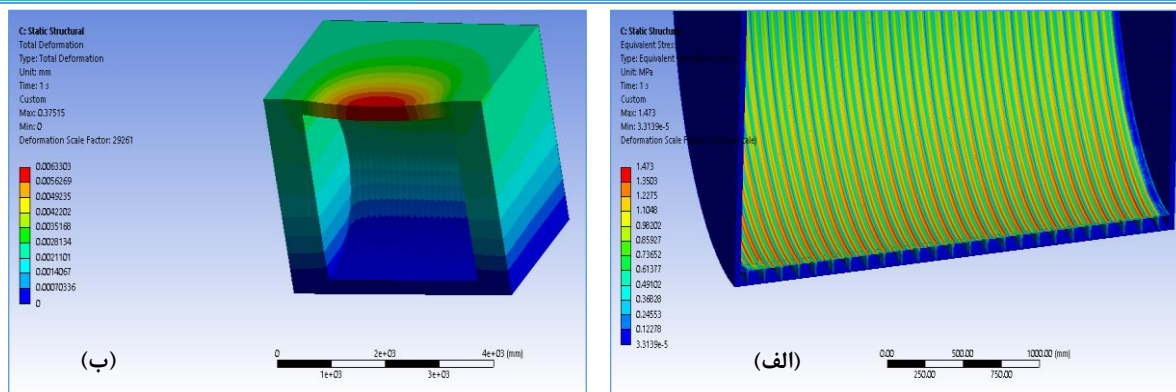
با دو برابر کردن میزان ضخامت کفه‌های مخزن این تحلیل مجدداً صورت گرفته است که این بار تنها در نقاط محدودی در اتصال پایه‌ها تنش از میزان مجاز تجاوز کرده است که به دلیل محدودیت مدل در نشان دادن شرایط دقیق ساخت و اتصال مواد به یکدیگر است. ولی با این حال هم‌چنان ضریب اطمینان طراحی در مخزن دارای مقدار کمی می‌باشد. شکل (۴) مقادیر تنش در این حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تنش در مخزن با کفه‌های تخت و ضخامت دو برابر برای کفه (۴۰ سانتی‌متر)

مخزن با کفه‌های صاف در زیر زمین

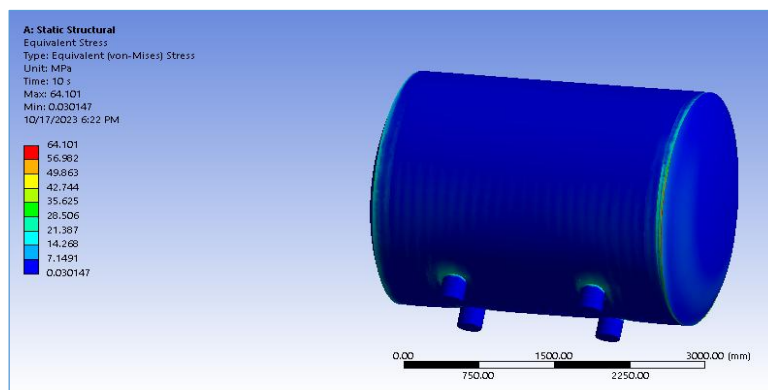
نتایج این حالت قابل قبول بوده و قابل استفاده خواهد بود و تنش بسیار کم است. شکل (۵-الف) میزان تنش در سازه مخزن را نشان می‌دهد و شکل (۵-ب) تغییر شکل ایجاد شده در خاک ناشی از تغییر شکل درون سازه مخزن می‌باشد.



شکل ۵: (الف) تنش درون مخزن با کفه‌های صاف در زیر خاک (ب) تغییر ابعاد خاک

نتایج مخزن با کفه‌های منحنی بر روی زمین

در مقایسه با مخزن بر روی زمین با کفه‌ها تخت با ضخامت یکسان، محدوده نقاط با تنش بالا در این مخزن کمتر است. اما تمرکز تنش بر روی نقاط اتصال بین کفه و بدنه و نیز بین پایه و بدنه مقدار بالایی را نشان می‌دهد. علت این مسئله می‌تواند عدم رعایت شرایط دقیق ساختی در نحوه اتصال بدنه با کفه‌ها در مدل‌سازی هندسی باشد. شکل (۶) توزیع تنش برای این مخزن را نمایش می‌دهد. از مقادیر به دست آمده برای ضریب اطمینان نیز مشخص گردید که تنها در نقاط اتصال بین کفه و بدنه و نیز پایه در پایین میزان این ضریب کاهش یافته است.



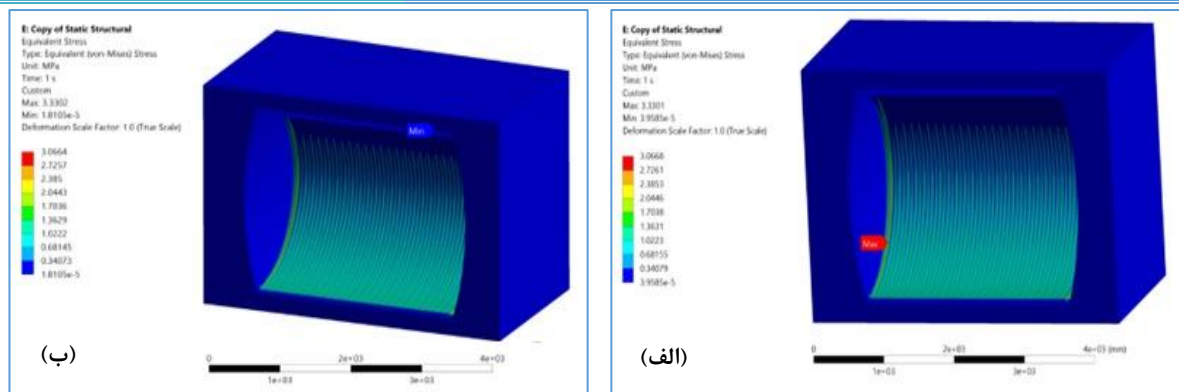
شکل ۶: توزیع تنش درون مخزن با کفه‌های منحنی بر روی زمین

نتایج مخزن با کفه‌های منحنی دفن شده زیر زمین

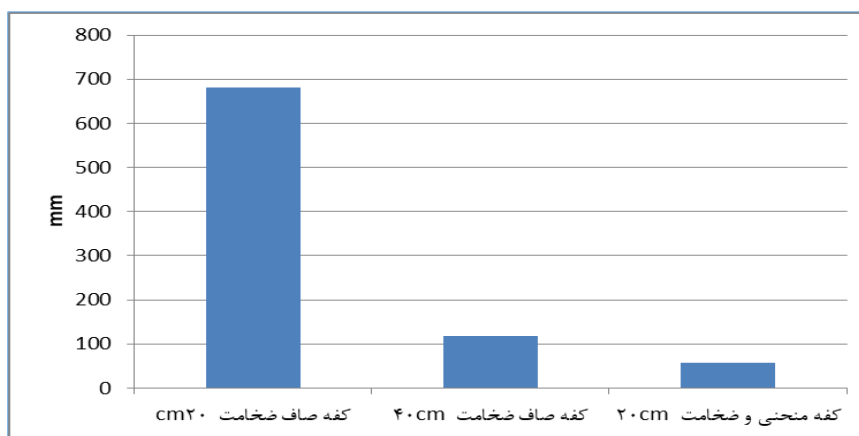
همانطور که از نتایج قابل مشاهده است میزان تنش حاصل شده بر روی مخزن پلی‌اتیلن بسیار پایین بوده و فاصله زیادی تا مقادیر حد تسلیم ماده دارد. در شکل (۷-الف) نتایج تنش وارد شده بر سازه برای مدول الاستیسیته ۷۹۳ مگاپاسکال ارایه شده است و سپس شکل (۷-ب) نتایج میزان تنش برای مدول الاستیسیته پلی‌اتیلن ۵۰ ساله برابر با ۲۰۰ مگاپاسکال سازه مخزن را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج برای دونوع کفه مخزن

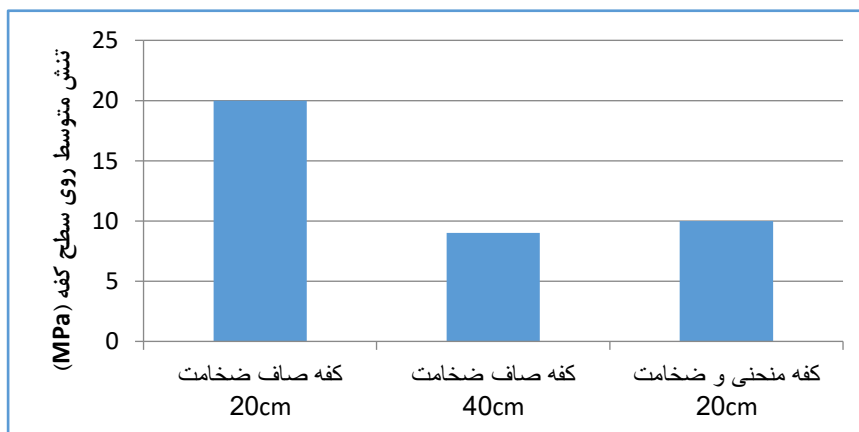
در ادامه مقایسه مقادیر تغییر شکل بیشینه و تنش متوسط بر روی سطح کفه‌ها، برای شرایط روی زمین در شکل‌های (۸) و (۹) ارایه می‌گردد؛ لازم به ذکر است که به دلیل کم بودن مقادیر تنش در شرایط مدفون و مطلوب بودن تمامی موارد، از مقایسه آن‌ها در این بخش صرف نظر شده است. از نتایج به دست آمده مشخص است، که در صورت استفاده از ضخامت برابر در کفه‌های تخت و منحنی شکل، تغییر شکل بیشینه در کفه منحنی شکل به نسبت تخت دارای کاهش چشمگیری می‌باشد.



شکل ۷: میزان توزیع تنش در مخزن با کفه منحنی مدفون (الف) مدول ۷۹۳ مگاپاسکال (ب) مدول ۲۰۰ مگاپاسکال



شکل ۸: مقادیر تغییر شکل بیشینه در موارد مطالعه بر روی سطح زمین



شکل ۹: مقادیر متوسط تنش در موارد مطالعه بر روی سطح زمین و بر روی کفه‌ها

نتیجه‌گیری

در مقایسه بین مخزن با کفه‌های صاف بر روی زمین و منحنی، مخزن با کفه منحنی تحمل بهتری داشته و علت آن داشتن تغییر شکل کمتر و نقاط کمتر با بیشینه تنش در شرایط برابر مدول الاستیسیته و ضخامت کفه بوده است. برای کفه منحنی بر روی زمین تنها در نقاط اتصال بین کفه و بدنه و نیز پایه و بدنه به دلیل عدم اعمال دقیق ملاحظات ساخت، نقاط با تنش بالا مشاهده گردید. حتی افزایش ضخامت برای مخزن با کفه صاف بر روی زمین با توجه به اعداد تنش حاصله، اصلاً توصیه نمی‌شود. ولی در مقایسه موارد مدفون، هر دو مخزن قابل استفاده هستند. لازم به ذکر است که کفه با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر ماده بیشتری



تا کفه منحنی استفاده می‌کند و به همین دلیل بهینه‌ترین پروفیل از بین موارد مطالعه شده از نظر مصرف مواد و با در نظر گرفتن پارامترهای تغییر شکل بیشینه و تنش متوسط، پروفیل منحنی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی برای حمایت از این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] Moore, C., Tomlinson, M., (2020). Comparison Between Head Types: Hemi, SE, F&D and Flat. PV Eng.
- [2] Kim, S. B., Cho, K. J., (2013). Parametric Analysis on Ultimate Behavior of Cylindrical GFRP Septic Tank. KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 33(4), pp 1337-1347.
- [3] Tiwari, N., Hora, M., (2015). Transient analysis of elevated intze water tank fluid soil system. Journal of engineering and applied sciences, 10, pp 869-882.
- [4] Wang, Z., Zhang, Z., Chen, J., Bai, J., (2021). Stress analysis and applicability analysis of the elliptical head. Scientific Reports, 11(1), 22900.
- [5] Tyukanko, V., Demyanenko, A., Dyuryagina, A., Alyoshin, D., Brilkov, S., Litvinov, S., Byzova, Y., (2024). Optimization of Polyethylene Rotomolded Tank Design for Storage of Liquid Mineral Fertilizers by The Taguchi Method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(1), pp 45-56.
- [6] Sabir, A. B., Mousa, A. I., (1995). Finite element analysis of cylindrical-conical storage tanks with girder stiffeners. Thin-walled structures, 21(3), pp 269-277.