

طراحی و ساخت مجموعه شاسی اتاق تراکتور با دامنه توانی ۴۰ تا ۶۰ اسب بخار بخش اول: طراحی سه‌بعدی و تحلیل استاتیکی سازه محافظ واژگونی

سجاد کیانی^{*۱}

چکیده

در این پژوهش طراحی، استخراج دانش فنی و ساخت یک مجموعه شاسی اتاق کامل برای تراکتورها با دامنه توانی ۴۰ تا ۶۰ اسب بخار با وزن بیشینه ۲۴۵۰ کیلوگرم و همچنین تحلیل استاتیکی سازه محافظ واژگونی (ROPS) آن انجام شد. شاسی اتاق شامل شاسی اصلی، شاسی ستون فرمان، گل‌گیرهای راست و چپ، ROPS و سایر متعلقات اتصالی است. شاسی اصلی به گونه‌ای طراحی شده که در برگیرنده کلیه اهرم‌ها و پدال‌های کنترلی، صندلی راننده، داشبورد و سامانه فرمان باشد. سازه ROPS به‌منظور محافظت از راننده در زمان واژگونی تراکتور از جنس فولاد آلیاژی ST44 (پروفیل با ابعاد ۸×۶ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر) توسط نرم افزار CATIA طراحی و بر روی شاسی اصلی نصب گردید. بارگذاری استاتیکی و مقاومت مکانیکی آن مطابق با استاندارد ISO 5700 بررسی شد. نتایج نشان داد بیشینه تنش استاتیکی به دست آمده در آزمون تخریبی در سازه ROPS در مقایسه با استحکام کششی فولاد ST44 (استحکام نهایی ۵۸۰ MPa و مدول کشسانی ۲۱۰۰۰۰) برای تراکتورهای یوروپارس مدل RK404-A (مدل شالیزاری/باغی) و RK604-A (مدل باغی/زراعی) در محدوده ایمن بوده است و از نظر مقاومت مکانیکی استحکام لازم را دارا است. همچنین بیشینه انحراف ROPS در بارگذاری‌ها، محدوده ایمن راننده را نقض نکرد. در نهایت دانش فنی قطعات طراحی شده استخراج، نمونه‌های شاسی اتاق تولید و بر روی دو مدل تراکتور نصب و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مجموعه شاسی اتاق طراحی و تولید شده از نظر ابعادی، محل نصب پدال‌ها و سامانه‌های کنترلی و همچنین نمای ظاهری مناسب برای استفاده در تولید تراکتورهای مذکور است.

واژه‌های کلیدی: ایمنی راننده، بارگذاری استاتیکی، شاسی اتاق، تراکتور، واژگونی.

ارجاع: کیانی س. ۱۴۰۲. طراحی و ساخت مجموعه شاسی اتاق تراکتور با دامنه توانی ۴۰ تا ۶۰ اسب بخار (بخش اول: طراحی سه‌بعدی و تحلیل استاتیکی سازه محافظ واژگونی). نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۶-۱۳: ۲۶-۱۳. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.13843.585>

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

* نویسنده مسئول: s.kiani@sanaru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶

مقدمه

آنها که بیشترین ارتباط با این پژوهش را دارند مرور می‌شوند.

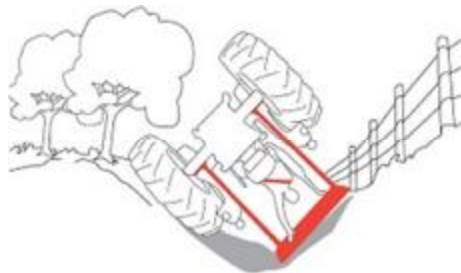
در پژوهشی (Hamzehnejad *et al.*, 2013) طراحی و تحلیل استاتیکی یک تریلر چهار چرخ پشت تراکتوری را توسط نرم‌افزار CATIA به منظور به دست آوردن بیشترین تنش اعمال شده به پیچ‌های اتصال و همچنین بیشترین تغییر شکل فنر و مخزن در حداکثر بار پخشی اعمال شده (۱۶ تن) را انجام دادند. نتایج به دست آمده آنها از تحلیل نرم افزاری با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های عملی تطابق مناسبی نشان داد و کاربردی بودن روش تحلیل استاتیکی نرم‌افزاری را تایید کردند. در پژوهشی دیگر، (Byat & Zehsaz I., 2017) تجزیه و تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه شاسی یک خودرو سنگین تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی را بررسی کردند. ابتدا مدل سه بعدی از سازه شاسی خودرو سنگین را مدل‌سازی و سپس بارهای وارده به سازه شاسی اعم از استاتیکی و دینامیکی که شامل وزن اجزای شاسی و ناهمواری‌های جاده‌ای بودند را اعمال کردند. مدل‌سازی تحت شرایط مرزی مشخص انجام گرفت. نتایج آنها نشان داد که در جاده ناهموار بر اساس استاندارد ISO8608 شاسی متحمل تنش‌های بزرگ خطرناکی شده که مکان آن نزدیک محور چرخ‌های عقب است. در یک بررسی، (Naderlu *et al.*, 2018) نیروهای وارد بر پین بریده شونده گاوآهن برگرداندار را با استفاده از نرم افزار CATIA تجزیه و تحلیل کردند. آنها بیشترین و کمترین تنش Von Mises را در محل پین بریده شونده و وسط صفحه برگردان به دست آوردند. در پژوهشی دیگر (Ramezani *et al.*, 2019) طراحی و تحلیل استاتیکی شاسی و مخزن یک ماشین خودکار جمع آوری کشمش از سطح زمین را بررسی کردند. شاسی و مخزن، در نرم‌افزار Solidworks 2013 طراحی و تحلیل‌های استاتیکی انجام شد. آنها مقدار نیروی‌های وارد شده به قسمت‌های مختلف شاسی را بر اساس نیروهای اعمال شده از طرف وزن مخزن، وزن کشمش، تسمه نقاله، موتورها و سایر اجزاء محاسبه و پس از تجزیه و تحلیل قسمت‌های مختلف، حداکثر تنش در شاسی و مخزن، بیشترین تغییر طول روی شاسی و همچنین متوسط ضریب اطمینان شاسی و مخزن (۳/۰۸) را به دست آوردند.

تراکتور یکی از ابتدایی‌ترین و قدیمی‌ترین ماشین‌های مولد نیرو در کارهای کشاورزی است. روز به روز سازه این ماشین کشاورزی تکمیل‌تر شده و امروزه متناسب با هر کاری، تراکتور مناسب آن ساخته شده است. از تراکتور در بسیاری از کارهای کشاورزی مانند شخم زدن، تسطیح، نرم کردن خاک، بذر افشانی، سم پاشی، درو کردن، بارکشی و ... استفاده می‌شود. به طور کلی یک تراکتور را می‌توان به چهار قسمت اصلی بخش‌بندی کرد: ۱) سامانه محورهای انتقال قدرت (مجموعه جعبه‌دنده‌ها، دیفرانسیل، محورهای عقب و مجموعه اتصال سه نقطه) ۲) مجموعه موتور و اتصالات آن، ۳) مجموعه محور و براکت جلو و ۴) مجموعه شاسی اتاق (در برگیرنده کلیه سامانه‌های کنترلی، محافظتی و ایمنی). سازه شاسی اتاق (یا قاب شاسی) یکی از مهم‌ترین قسمت‌های هر تراکتور است که می‌بایست در درجه اول استحکام و مقاومت کافی در برابر نیروهای خارجی به خصوص در زمان واژگونی تراکتور و در درجه دوم دسترسی راننده به سامانه‌های کنترلی تراکتور را به بهترین حالت ممکن مهیا سازد. این سازه ترکیبی از عناصر طولی و عرضی است که اجزای مختلف کنترلی تراکتور روی آن نصب می‌شوند. شکل ۱ چگونگی محافظت سازه محافظ واژگونی^۱ (ROPS) از راننده تراکتور در مواقع واژگونی و غلتیدن را نشان می‌دهد.

این پژوهش در مراحل زیر انجام گرفت:

۱) طراحی یک شاسی اتاق تراکتور که در برگیرنده کلیه اهرم‌ها و پدال‌های کنترلی، صندلی راننده، ROPS، داشبورد و سامانه فرمان، سامانه الکتریکی و ... باشد، ۲) تحلیل استاتیکی ROPS و بررسی مقاومت مکانیکی آن در زمان واژگونی تراکتور مطابق با استاندارد ISO 5700، ۳) استخراج دانش فنی ایجاد شده (نقشه‌های سه بعدی و دو بعدی شامل ابعاد کلیه قطعات و اتصالات و آلیاژهای استفاده شده) و ۴) ساخت نمونه اولیه مجموعه شاسی اتاق طراحی شده.

تحلیل رایانه‌ای در طراحی یک سازه فلزی از اهمیت خاصی برخوردار است. در دهه‌های گذشته مطالعات متعددی در زمینه طراحی و تحلیل سازه‌های خودروها و ماشین‌های کشاورزی انجام شده است. در ادامه تعدادی از



(ب)



(الف)

شکل ۱- الف) تراکتور واژگون شده و ب) عملکرد ROPS در جلوگیری از آسیب دیدن راننده

به وزن و ابعاد تراکتور کشاورزی مورد نظر (Allis Chalmers 5040) از روش طراحی و تحلیل نرم‌افزاری یک ROPS طراحی و تحلیل کردند. این ROPS طراحی شده با موفقیت آزمون‌های استاتیکی طولی، عرضی و عمودی ذکر شده در استاندارد SAE J2194 را پشت سر گذاشت. همچنین آنها مدلی برای تعیین ارتفاع بحرانی ROPS بر اساس ابعاد و ارتفاع مرکز ثقل^۲ (CG) تراکتور تهیه و ارزیابی کردند. در جدیدترین مطالعه (Sakthivel *et al.*, 2021) توزیع تنش و تغییر شکل ROPS در شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از روش طراحی و تحلیل رایانه‌ای با دقت بالا تعیین شد.

مواد و روش‌ها

طراحی سه بعدی

در این پژوهش بر اساس ابعاد مجموعه انتقال قدرت مورد استفاده برای تراکتوری که در گروه نوع ۲ از تراکتورها قرار می‌گیرد (ISO 730) و همچنین بر اساس پیشینه پژوهش، ابعاد و اندازه‌های شاسی اتاق مناسب برای تراکتور با وزن حداکثری ۲۴۵۰ کیلوگرم استخراج و کلیه مراحل طراحی مدل سه بعدی مجموعه قطعات در محیط نرم‌افزار CATIA انجام شد. این گروه از تراکتورها با موتور ۴۰ اسب بخار، بدون وزنه‌های سنگین کننده و با چرخ‌های شالیزایی دارای وزن حداقلی ۱۸۵۰ کیلوگرم و با موتور ۶۰ اسب بخار، وزنه‌های سنگین کننده و لاستیک‌های رادیال زراعی دارای وزن حداکثری ۲۴۵۰ کیلوگرم است. نرم‌افزار CATIA یکی از نرم‌افزارهایی است که علاوه بر داشتن امکانات مفید طراحی سه‌بعدی قطعات، از روش اجزاء محدود برای تجزیه و تحلیل قطعات طراحی شده استفاده می‌کند. تمامی قطعات

سازه محافظ تراکتور یا ROPS یک ساختار مکانیکی است که وظیفه جذب و تحمل انرژی ضربه ناشی از وزن تراکتور در حوادث واژگونی را دارد. سازه ROPS با ایجاد یک فضای امن برای محافظت از راننده احتمال صدمات شدید انسانی را کاهش می‌دهد. استاندارد ISO 5700 و SAE J2194 الزامات طراحی ROPS و استانداردهای آزمون را تعیین می‌کند. این سازه برای جذب انرژی وزن تراکتور حین واژگونی و قبل از اینکه راننده در معرض خطر قرار گیرد طراحی شده است. در صورت عدم وجود ROPS این خطر به شکل قرار گرفتن راننده در سطح زمین و واژگونی تراکتور بر روی آن ایجاد می‌شود. در فرآیند طراحی ROPS عوامل جرم تراکتور، ابعاد و نقاط نصب آن تأثیر گذار هستند. انرژی‌ای که باید توسط ROPS جذب شود ارتباط مستقیم با جرم تراکتور دارد و این انرژی بر اساس روابط تنش-کرنش یا نیرو-تغییر شکل محاسبه می‌شود (Mangado *et al.*, 2007). در دهه‌های اخیر این سازه یک قطعه اجباری از تراکتور شده است و تولید کنندگان به منظور اخذ تأییدیه نوع^۱ تولید تراکتور باید این قطعه را بر روی شاسی اتاق آن نصب کنند. در دهه گذشته مطالعات متعددی در خصوص طراحی و تحلیل نرم‌افزاری ROPS که روشی سریع و کم هزینه است برای چندین مدل تراکتور زراعی با وزن‌های مختلف انجام شده است (Alfaro *et al.*, 2010, Ayers *et al.*, 2016, Shende *et al.*, 2016, Ayers *et al.*, 2018). آنها طراحی نرم‌افزاری را در نرم‌افزارهای CATIA یا ANSYS انجام و به روش اجزاء محدود بعد از تحلیل استاتیکی سازه بر اساس وزن تراکتور، بهترین نوع سازه از نظر ابعاد، شکل و جنس را برای تراکتور مورد مطالعه مشخص کردند. در پژوهشی (Ayers *et al.*, 2018) با توجه

روشی عددی برای حل معادلات دیفرانسیلی جزئی تعریف شده بر اساس یک یا دو متغیر مکانی است (Strang, 2005). روش حل اجزاء محدود، تقسیم مسائل بزرگ به بخش‌های کوچک‌تر و ساده‌تری به نام اجزاء محدود است. این جداسازی مکانی با تعریف جسم به صورت یک شبکه یا در اصطلاح مش^۲ بیان می‌شود. در واقع شبکه از مجموعه‌ای از نقاط گسسته برای تبدیل محیط مسئله به محدوده عددی برای حل مسئله است. در مرحله بعد، معادلات ساده‌ای که معرف این اجزای محدود هستند، در یک دستگاه معادلات بزرگ‌تر که کل محدوده مسئله را در بر می‌گیرد، در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و فرم کلی مسئله اصلی را تشکیل می‌دهند. در نهایت با استفاده از حساب تغییرات یا حساب وردشی^۳ جوابی برای مسئله با به حداقل رساندن یک تابع خطا یافته می‌شود. با این وجود روش اجزاء محدود را می‌توان در پنج بخش کلی که عبارتند از: الف) پیش پردازش (تقسیم دامنه مسئله به اجزای محدود یا گسسته سازی)، ب) رابطه‌سازی جزء (فرض یک تابع که شرایط مرزی را ارضا کند)، پ) سوار کردن (از کنار هم قرار دادن معادله‌های حاکم بر هر جزء، مجموعه معادلات حاکم بر کل دامنه مسئله تعیین می‌گردد)، ت) حل عددی معادلات (روش‌های تفاضل محدود، روش وارسیون و روش‌های باقیمانده وزنی) و ث) پس پردازش (پس از به دست آمدن مجهولات اولیه، پارامترهای ثانویه‌ای تنش، فشار، سرعت و ... تعیین می‌شود) بیان کرد.

قیدگذاری

در ابتدا از قیدگذاری ایزواستاتیک^۴ به منظور قیدگذاری اولیه کلیه قطعات مجموعه شاسی اتاق استفاده شد. با این روش قیدگذاری از انتقال و چرخش جسم صلب، بدون محدود کردن بیش از حد آن، جلوگیری می‌شود. از قیدگذاری کلمپ^۵ برای اتصال دائم قطعات پایه اتصال شاسی اتاق و از قید گذاری پین اتصال (پیوت^۶) و صفحه مهارکننده^۷ برای اتصال ROPS به پایه شاسی اتاق استفاده شد.

شاسی اتاق به‌گونه‌ای که در برگزیده کلیه اهرم‌ها، پدال‌ها، داشبورد و سامانه‌های الکتریکی باشد در محیط Part design نرم افزار طراحی و در محیط Assembly در کنار هم قرار داده شدند. سازه ROPS با استفاده از ابعاد تراکتور و داده‌های پژوهش (Ayers et al., 2018) طراحی و بر روی شاسی اصلی به صورت جدا شونده نصب شد. تحلیل استاتیکی ROPS وقتی که تکیه‌گاه‌های آن بر روی شاسی به صورت پین در نظر گرفته شده‌اند، انجام شد.

آلیاهای مورد استفاده

با توجه به مطالعات انجام شده و در حال حاضر برای تولید سازه بدنه و شاسی خودروهای راه‌سازی، شاسی اتاق تراکتور و اتوبوس‌ها از پروفیل‌های فولادی ST37 و ST44 با مشخصات جدول ۱ استفاده می‌شود.

این فولادها از پرکاربردترین انواع فولاد در رده فولاد با کربن ملایم است و غالباً در ساخت پروفیل‌های صنعتی و ساختمانی استفاده می‌شوند (Shende et al., 2016). برای ساخت قطعه ROPS به دلیل نیاز به مقاومت بیشتر در مقابل تغییر شکل ناشی از نیروهای خارجی به صورت پیش فرض از پروفیل فولادی ST44 با ابعاد ۶×۸ سانتی‌متر و سایر پروفیل‌های مورد استفاده در بدنه شاسی اتاق از فولاد ST37 با ابعاد ۳×۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. بعد از مشاهده نتایج تحلیل استاتیکی می‌توان تغییرات مورد نیاز (استفاده از فولاد با درجه مقاومتی بالاتر و یا پایین‌تر) در جنس فولادهای مصرفی را به دلیل اطمینان از مقاومت کافی سازه و همچنین صرفه‌جویی اقتصادی اعمال نمود. از ورق فولادی ST37 با ضخامت ۳ میلی‌متر برای پوشش کف و دیواره‌های شاسی اتاق استفاده شد (جدول ۱). علاوه بر استحکام خوب برای این فولادها می‌توان به اتصال دائم آنها از طریق جوشکاری نیز اشاره کرد.

تحلیل با روش اجزاء محدود (FEM)

برای حل مسائلی که قابلیت حل با روش‌های تحلیلی (دیفرانسیلی) ندارند، روش تحلیل اجزاء محدود^۱ روش حل است که برای حل مسائل مهندسی و مدل‌های ریاضی از جمله تحلیل سازه‌ها، انتقال گرما، انتقال جرم و پتانسیل الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. این روش،

2- Mesh
3- Calculus of Variations
4- Isostatic Restraint
5- Clamp
6- Pivot
7- Surface Slider

1- Finite Element Method (FEM)

مش‌بندی

زمانی که بر روی شاسی اتاق قرار گرفته شده است انجام شد.

بارگذاری طولی

بار باید به صورت افقی و موازی با صفحه وسط و طولی تراکتور اعمال شود. اگر بار از عقب اعمال شود، بار طولی و بار جانبی باید در طرف‌های مختلف صفحه طولی میانه ROPS اعمال شود. اگر بار طولی از جلو اعمال شود، باید در همان سمت بار جانبی باشد. بارگذاری از عقب در تراکتورهایی که ۵۰ درصد یا مقدار بیشتری از وزن تراکتور (بدون وزنه‌های سنگین کننده) روی چرخ‌های جلو است، لازم نیست. نقطه اعمال بار باید در یک ششم عرض بالای ROPS از گوشه بیرونی به سمت داخل قرار گیرد. طول توزیع بار نباید کمتر از یک سوم عرض سازه ROPS و همچنین نباید بیش از ۴۹ میلی‌متر بیشتر از یک سوم عرض سازه باشد. انرژی که باید در این بارگذاری توسط ROPS جذب (E_{IL}) شود $1/4$ برابر وزن تراکتور بارگذاری نشده (m_t) و نیروی اعمالی ($F_{max.L}$) از معادله (۱) و (۲) به دست می‌آید (ISO 5700).

$$E_{IL} = 1.4m_t \quad (1)$$

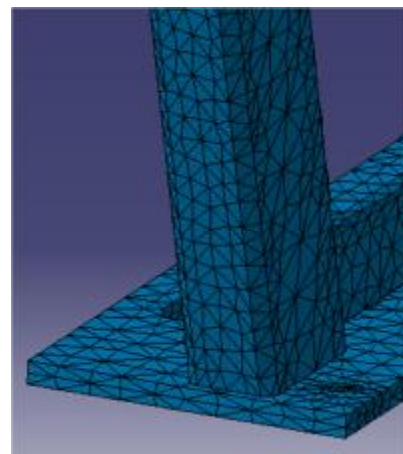
$$F_{maxL} = \frac{E_{IL}}{f \cdot RAD_L} \quad (2)$$

در این معادله F_{maxL} حداکثر نیرو در بارگذاری طولی (N)، RAD_L حداکثر جابجایی طولی ROPS در بارگذاری طولی و f ضریب روانی^۷ بین ناحیه زیر منحنی نیرو-تغییر شکل و حاصل ضرب حداکثر نیرو و حداکثر تغییر شکل با مقدار 0.7 است.

بارگذاری عرضی

بار جانبی باید به صورت افقی و در زاویه ۹۰ درجه به صفحه میانی طولی در بالاترین عضو سازه اعمال شود. اگر اطمینان حاصل شود که هنگام واژگونی تراکتور قسمت خاصی از ROPS ابتدا زمین را لمس می‌کند، بارگذاری باید در آن نقطه اعمال شود. توزیع بار باید حداکثر ۷۰۰ میلی‌متر باشد. انرژی‌ای که باید در این بارگذاری توسط ROPS جذب شود، $1/7 m_t$ و نیروی اعمالی ($F_{max.S}$) از

از روش مش‌بندی هوشمند Octree Tetrahedron Mesh برای ایجاد مش‌های سه بعدی المان محدود استفاده شد. شکل ۲ این روش مش‌بندی را با ابعاد سراسری^۱ برابر با 0.1 متر را نشان می‌دهد. این روش، مش‌های به صورت یک چهار وجهی دارای ۴ رأس^۲ و ۶ یال^۳ ایجاد می‌کند. ابعاد مش‌بندی بر اساس مطالعه (Khorsandi et al., 2017) انجام شده است. آنها در مطالعه‌ای که انجام دادند با اندازه مش برابر با 0.1 نزدیک‌ترین نتایج به آزمون‌های آزمایشگاهی را به دست آوردند.



شکل ۲- روش مش‌بندی Octree Tetrahedron Mesh انجام شده برای پایه شاسی اصلی و سازه ROPS

بارگذاری استاتیکی

در بررسی سازه‌ها، به خصوص در مواردی که ایمنی کاری کاربر مهم است، با استفاده از تحلیل استاتیکی می‌توان از مقاوم بودن سازه تحت بارهای ساکن یا استاتیکی اطمینان حاصل نمود. با استفاده از یک تحلیل استاتیکی می‌توان نقاط بحرانی را به دست آورد و با ضریب اطمینان مناسب سازه‌های مقاوم از لحاظ استاتیکی و دینامیکی طراحی نمود. این روش مرسوم و در بسیاری از آیین‌نامه‌ها از این روش استفاده می‌شود. در این پژوهش بارگذاری‌ها بر اساس استاندارد ISO 5700 به صورت عرضی^۴، طولی^۵ و به صورت عمودی^۶ بر روی ROPS

- 1- global size
- 2- Vertices
- 3- Edges
- 4- Transverse
- 5- Longitudinal
- 6- Vertical

۷- جرم تراکتور بدون وزنه‌های سنگین کننده در حالت کارکرد با مخزن سوخت و رادیاتور پر. کاربرد، تجهیزات اتصال اختیاری، وزنه‌های سنگین کننده اختیاری، تجهیزات چرخ اضافی و سایر تجهیزات ویژه شامل نمی‌شوند.

سازه و H ارتفاع سازه بر حسب m بر روی محور عقب است. مقدار جابجایی ROPS در بارگذاری جانبی (RAD_S) نباید به اندازه‌ای باشد که ROPS با صفحه عمودی که در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری صفحه مرجع عمودی است برخورد کند (شکل ۳-ب) (Mangado et al., 2006). این مقدار از معادله (۷) به دست می‌آید.

$$RAD_S = \frac{W_N}{2} - \frac{d}{2} - 0.1 \quad (7)$$

که در این معادله W_N عرض ROPS در قسمت فوقانی به متر است. حداکثر مقدار مجاز تغییر شکل عمودی ROPS در بارگذاری تخریبی عمودی (RAD_V) بر اساس ارتفاع کلی سازه ROPS و ارتفاع ناحیه راننده از نقطه SRP به دست می‌آید. شکل ۳ ناحیه راننده و اندازه‌های استاندارد این ناحیه را نشان می‌دهد. در جدول ۲ مشخصات ناحیه راننده آورده شده است.

ساخت نمونه شاسی اتاق

بعد از اطمینان از استحکام کافی قطعه ROPS طراحی شده در تحلیل بارگذاری استاتیک، به خصوص در بارگذاری تخریبی، دانش فنی آن به همراه دانش فنی مجموعه شاسی اتاق (نقشه‌های دو و سه بعدی) استخراج و نسبت به تولید آن اقدام شد.

برشکاری قطعات ورقی با استفاده از برش CNC و قطعات پروفیل شکل با برش فرز انجام شد. برای اتصال قطعات شاسی اتاق پس از ایجاد اسباب ثابت مناسب از جوشکاری CO₂ استفاده شد. اتصال سازه ROPS نیز با استفاده از ۸ پین (۱۶×۱۴۰ میلی‌متر) انجام گرفت. تولید گل‌گیرهای شاسی اتاق با روش قالب‌سازی فایبرگلاس و تولید قطعه فایبرگلاس انجام شد.

معادله (۳) و (۴) به دست می‌آید (ISO 5700; Mangado et al., 2006).

$$E_{IS} = 1.75m_t \quad (3)$$

$$F_{maxS} = \frac{E_{IS}}{f \cdot RAD_S} \quad (4)$$

در این معادلات:

F_{maxS} حداکثر نیرو و RAD_S حداکثر جابجای عرضی ROPS در بارگذاری عرضی هستند.

بارگذاری تخریبی عمودی^۱

قطعه ROPS باید در سرتاسر بالاترین عضو سازه تحت بارگذاری تخریبی عمودی قرار گیرد و نیروهای حاصل باید در صفحه مرجع عمودی قرار گیرند. نیروی بارگذاری تخریبی عمودی (Fc) باید ۲۰ برابر عدد جرم تراکتور به نیوتن (معادله (۵)) در نظر گرفته شود (ISO 5700).

$$F_c = 20 m_t \quad (5)$$

معیارهای پذیرش

سازه ROPS باید تغییر شکلی در محدوده تغییر شکل مجاز^۲ (RAD) را جذب و تحمل کند به طوری که ناحیه راننده^۳ توسط ROPS یا سطح زمین نقض نشود و انحراف ROPS در زمان انجام بارگذاری‌ها باید از این مقدار کمتر باشد. شکل ۳ منطقه یا ناحیه راننده را نشان می‌دهد. در بارگذاری طولی، RAD نباید به اندازه‌ای باشد که وارد صفحه عمودی که شامل خط I₁-I₂ شود. این خط در فاصله ۲۲۸ میلی‌متری پشت نقطه مرجع صندلی^۴ (SRP) و ۸۱۰ میلی‌متری بالای آن قرار دارد. محدوده RAD در بارگذاری طولی (RAD_L) با معادله (۶) به دست می‌آید (Mangado et al., 2006).

$$RAD_L = \frac{X_{SRP} - d/2 - 0.0225}{Z_{SRP} + 0.81} H \quad (6)$$

در این معادله X_{SRP} فاصله افقی بر حسب متر بین موقعیت SRP و صفحه عمودی شامل قسمت عقب سازه است، Z_{SRP} فاصله عمودی بر حسب متر بین SRP و صفحه افقی است که شامل محور عقب است، d ضخامت تیرهای

1- Crushing Force

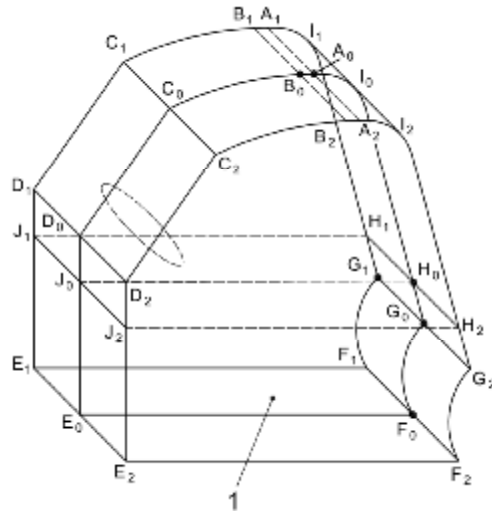
2- ROPS Allowable Deflection (RAD)

3- Clearance Zone

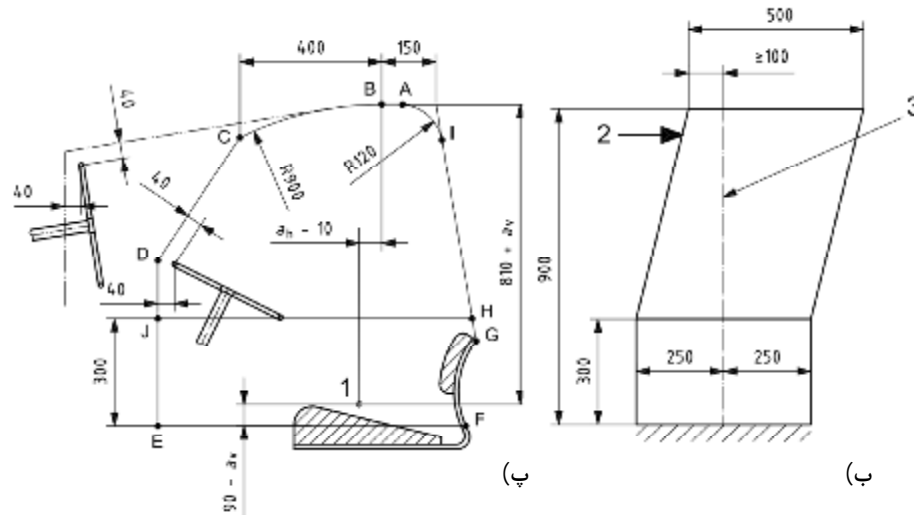
4- Seat Reference Point (SRP)

جدول ۱- نوع فولاد مصرفی در تولید شاسی اتاق و ROPS تراکتور

نسبت پواسون ^۴	مدول یانگ ^۳ (MPa)	استحکام کششی ^۲ (MPa)	استحکام تسلیم ^۱ (MPa)	چگالی (kg/m ³)	ابعاد (W×L×t, cm)	مواد
۰/۳	۲۰۶۰۰۰	۳۶۰-۴۶۰	۲۳۵	۷۸۴۵	۲×۳×۰/۳ ۳×۵×۰/۳	پروفیل ST37 ورق ST37
۰/۳	۲۱۰۰۰۰	۵۸۰	۲۷۵	۷۸۰۰	۰/۳ ۶×۸×۰/۴	پروفیل ST44



(الف)



(ب)

(ب)

شکل ۳- ابعاد و اندازه‌های ناحیه راننده مطابق با استاندارد ISO 5700 (mm) SRP: 1) نیرو در بارگذاری جانبی (N) و 3) صفحه عمودی مرجع^۵

- 1- Yield Stress
- 2- Ultimate Tensile Strength
- 3- Young's Modulus
- 4- Poisson's Ratio
- 5- Vertical Reference Plane

جدول ۲- اندازه‌ها و توضیحات مرتبط با شکل ۳- الف

اندازه	توضیحات	مشخصه
۰	نیمی از جابجایی عرضی مجاز صندلی	a_h
۴۰	نیمی از جابجایی عمودی مجاز صندلی	a_v
۳۳۸	فاصله افقی بین موقعیت SRP و صفحه عمودی شامل قسمت عقب سازه	X_{SRP}
۵۳۵	فاصله عمودی بین SRP و صفحه افقی شامل محور عقب	Z_{SRP}
۱۰۰	A_1A_0, B_1B_0	
۵۰۰	$A_1A_2, B_1B_2, C_1C_2, D_1D_2, E_1E_2, F_1F_2, G_1G_2, H_1H_2, I_1I_2, J_1J_2$	اضلاع استاندارد ناحیه راننده
۲۵۰	E_1E_0, E_2E_0	
۳۰۰	J_0E_0	

نتایج و بحث

طرح سه بعدی، ابعاد و اندازه‌ها

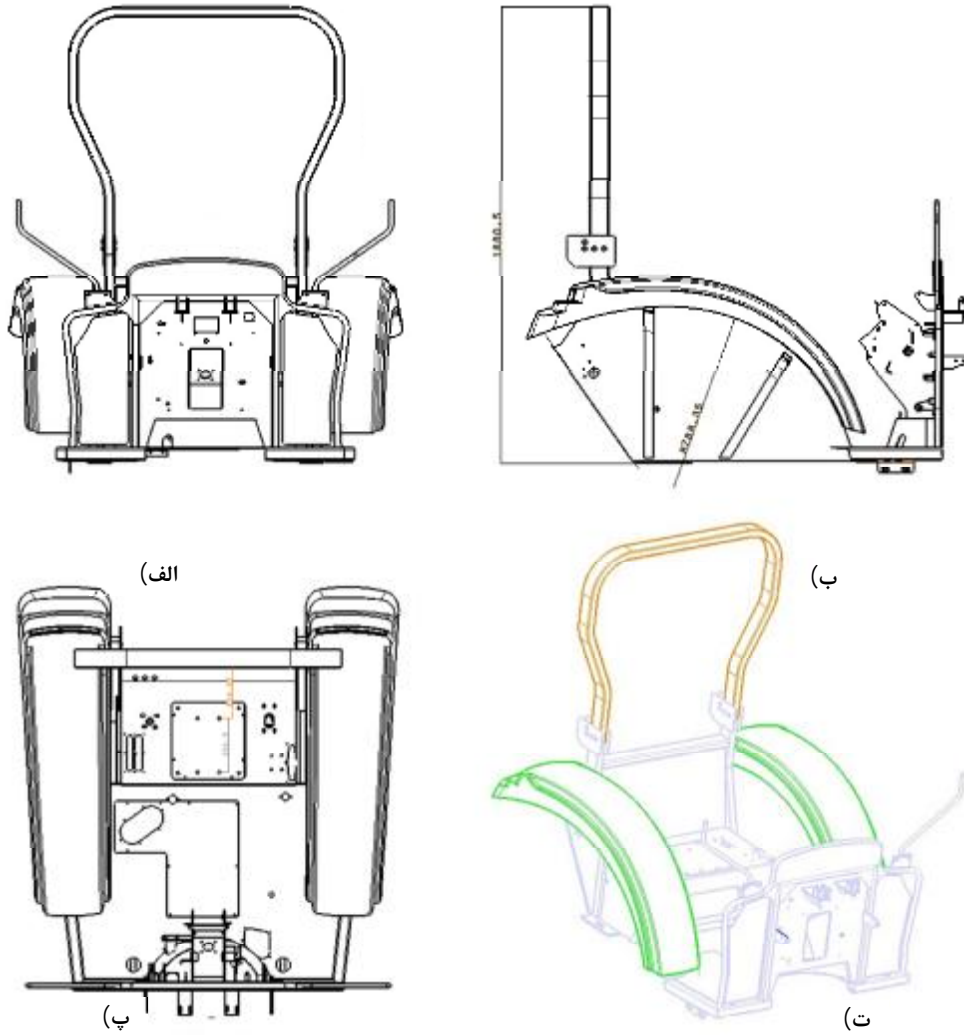
طرح نهایی و سه بعدی شاسی اتاقشاسی اتاق کامل طراحی شده در شکل ۴ و ابعاد و اندازه‌های ROPS در شکل ۵ به صورت جداگانه آورده شده است.

تحلیل بارگذاری استاتیک

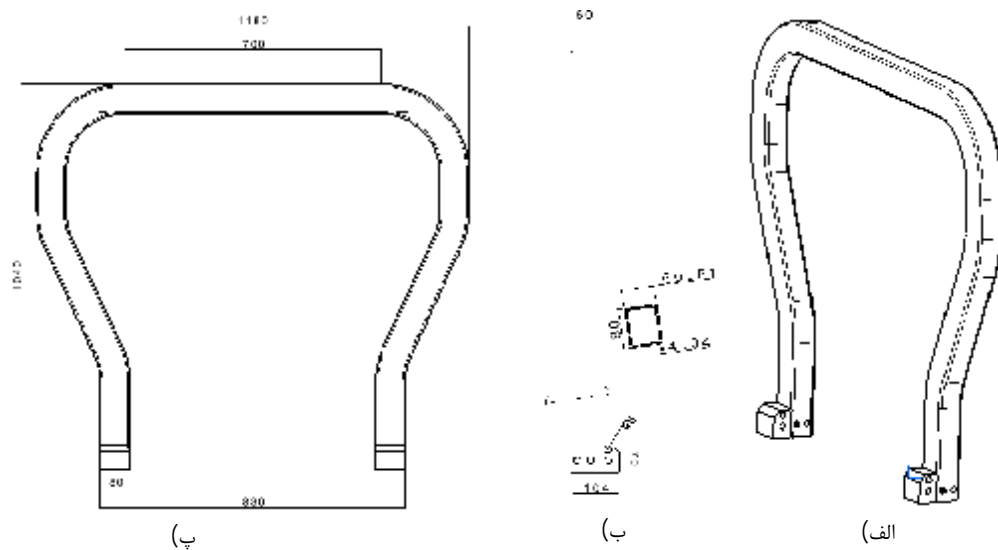
جدول ۳ نیروها، انرژي‌ها و تغییر اندازه‌های مجاز ROPS را تحت بارگذاری طولی، جانبی و عمودی بر اساس جرم و ابعاد برای هر تراکتور و محاسبه شده با معادلات ۱ تا ۷ را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که شاسی اتاق طراحی شده برای هر دو مدل تراکتور با دامنه وزنی ۱۸۰۰ تا ۲۴۵۰ کیلوگرم استفاده خواهد شد، بارگذاری‌ها و تحلیل تنش بر اساس سنگین‌ترین تراکتور (تراکتور یوروپارس مدل ۶۰۴) انجام گردید. نتایج بارگذاری طولی (با حداکثر نیرو) بر روی ROPS نصب شده بر روی شاسی اتاق طراحی شده در شکل ۶ آورده شده است. حداکثر تنش محاسبه شده در این بارگذاری ۱۰۲ MPa به دست آمد. این تنش کمتر از تنش تسلیم فولاد ST44 مورد استفاده است و سازه در این بارگذاری مقاومت کافی را دارا بود.

حداکثر انحراف محاسبه شده در این بارگذاری ۲/۹ میلی‌متر به دست آمد که این عدد نیز بسیار کوچک‌تر از RAD_L است و نشان می‌دهد ROPS طراحی شده با مشخصات معین بار طولی استاتیک را در محدوده ایمن تحمل می‌کند. شکل ۷ نتایج بارگذاری عرضی (با حداکثر نیرو) بر روی ROPS را نشان می‌دهد. حداکثر تنش محاسبه شده در این بارگذاری ۱۸۸ MPa و کمتر از

تنش تسلیم فولاد ST44 به دست آمد. همچنین بیشینه انحراف جانبی محاسبه شده ۱/۵۴ mm محاسبه شد که بسیار کمتر از معیار RAD_S است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که ROPS طراحی شده در آزمون بارگذاری عرضی مقاومت لازم را نیز دارا است. شکل ۸ نتایج آزمون بارگذاری عمودی و تخریبی اعمال شده بر روی ROPS با نیروی حداکثری ۴۹۰۰۰ N را نشان می‌دهد. حداکثر تنش محاسبه شده در این بارگذاری ۵۳۴ MPa به دست آمد. این تنش بیشتر از تنش تسلیم و کمتر از استحکام نهایی یا کششی فولاد استفاده شده است و نشان می‌دهد که در این بارگذاری سازه ROPS تغییر شکل دائمی (۶/۱۵ mm) خواهد داشت ولی کمتر از مقدار RAD_V است و ناحیه راننده را نقض نمی‌کند. شاسی اصلی در بارگذاری سازه ROPS بررسی شده و به همراه این قطعه در بارگذاری‌ها وارد شده است. باتوجه به اینکه قطعه ROPS یک سازه یا ستون میله‌ای شکل است، تنش‌های ماکزیمم و محدودیت‌ها در این قطعه به وجود می‌آیند و نه در پایه‌های اصلی شاسی. شاسی ستون فرمان و گل-گیرهای راست و چپ در هیچ بارگذاری وارد نمی‌شوند و از نظر ارگونومی و زیبایی ظاهری بررسی می‌شوند. این نتایج نشان می‌دهد ROPS طراحی شده آزمون‌های استاتیک بر اساس استاندارد ISO 5700 را با موفقیت پشت سر می‌گذارد. شکل ۹ نمودار نیرو-انحراف و شکل ۱۰ نمودار تنش-انحراف در بارگذاری‌های عمودی، طولی و عرضی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- الف) نمای جلو، ب) نمای جانبی، پ) نمای بالا و ت) طرح سه‌بعدی شاسی اتاق طراحی شده برای تراکتورهای مدل یوروپارس ۴۰ و ۶۰ اسب بخار

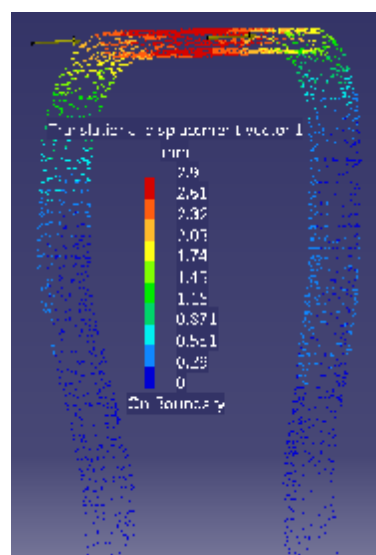
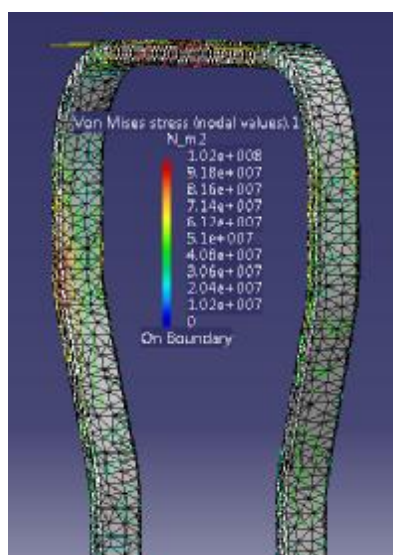


شکل ۵- ابعاد و اندازه‌های سازه ROPS الف) نمای سه‌بعدی، ب) نمای جانبی و پ) نمای روبرو

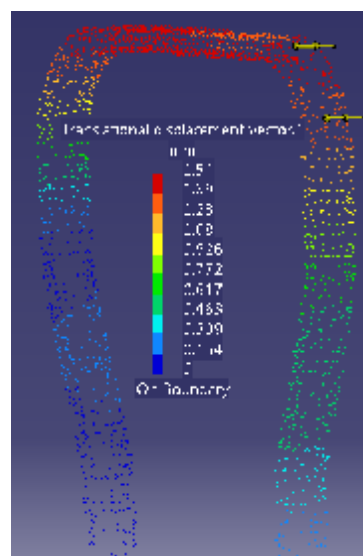
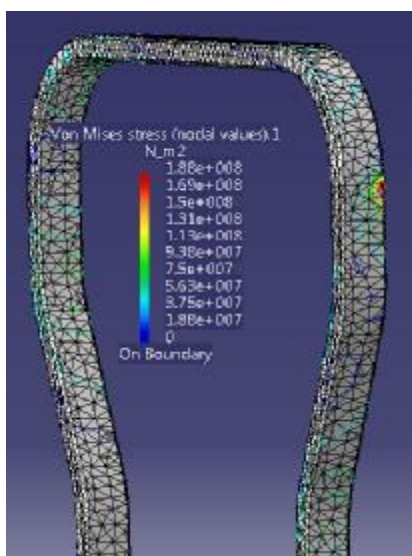
جدول ۳- نیروهای اعمال شده، تغییرات ابعادی مجاز ROPS و جذب انرژی مورد نیاز به عنوان تابعی از جرم و ابعاد تراکتور بر اساس

استاندارد ISO5700

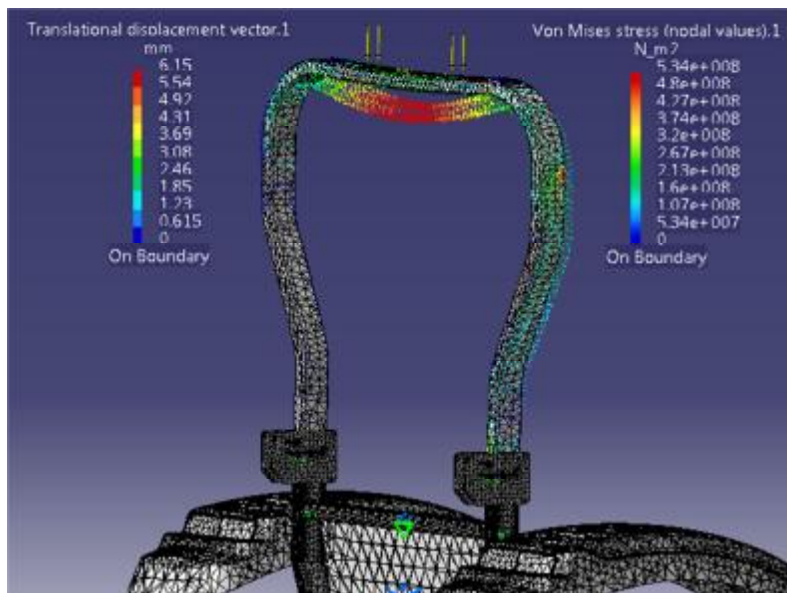
تراکتور یوروپارس مدل ۶۰۴	تراکتور یوروپارس مدل ۴۰۴	جرم تراکتور (kg)	
۲۴۵۰	۱۸۰۰		
۱۰۴۲۵	۷۶۶۰	$F_{max.L}$ (N)	بارگذاری طولی
۳۲۹۰	۲۵۲۰	E_{IL} (J)	
۴۷۰	۴۷۰	RAD_L (mm)	
۱۳۹۵۲	۱۰۲۵۰	$F_{max.S}$ (N)	بارگذاری عرضی
۴۲۸۷	۳۱۵۰	E_{IS} (J)	
۴۳۹	۴۳۹	RAD_S (mm)	
۴۹۰۰۰	۳۶۰۰۰	F_C (N)	بارگذاری عمودی
۴۲۰	۴۲۰	RAD_V (mm)	



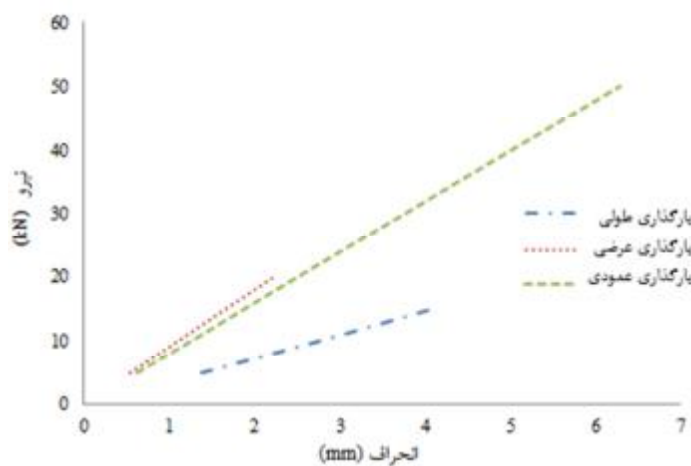
شکل ۶- راست) حداکثر انحراف (RAD_L) و چپ) حداکثر تنش Von Mises در بارگذاری طولی



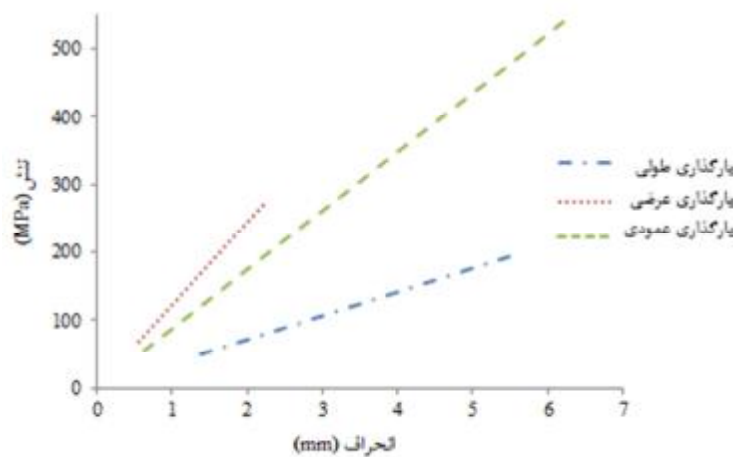
شکل ۷- راست) حداکثر انحراف (RAD_S) و چپ) حداکثر تنش Von Mises در بارگذاری جانبی



شکل ۸- حداکثر جابجایی و حداکثر تنش Von Mises در بارگذاری عمودی تخریبی



شکل ۹- نمودار نیرو-انحراف در بارگذاری عمودی، طولی و عرضی سازه ROPS



شکل ۱۰- نمودار تنش-انحراف در بارگذاری عمودی، طولی و عرضی سازه ROPS

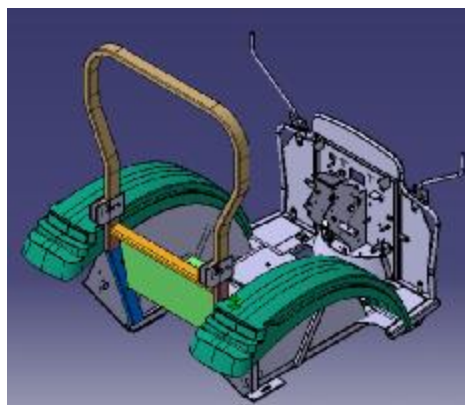
ساخت و ارزیابی

بعد از تأیید استحکام قطعه ROPS و پایه‌های اصلی شاسی در تحلیل رایانه‌ای، دانش فنی آن و سایر قطعات شاسی اتاق به صورت نقشه‌های دو بعدی استخراج و برای تولید نمونه در کارگاه آهنگری اقدام شد. محل ستون فرمان و صندلی به گونه‌ای انتخاب و مشخص شد که هم فرمان در موقعیت مناسبی قرار گیرد و هم محل نصب صندلی قابل تغییر و تنظیم باشد. نمونه‌هایی از شاسی اتاق طراحی شده (شکل ۱۱- الف)، ساخته (شکل ۱۱- ب)، نصب شده بر روی تراکتور مدل یوروپارس مدل ۶۰۴

زراعی (شکل ۱۱- پ) و نصب شده بر روی تراکتور مدل یوروپارس ۴۰۴ شالیزاری/باغی (شکل ۱۱- ت) نشان داده شده‌اند. نمای گل‌گیرها با توجه به محدودیت استفاده از یک مدل چراغ خطر عقب تولید داخل (دارای نشان استاندارد) انجام شد. شاسی اتاق بر روی محور انتقال قدرت به صورت اتصال پیچ و مهره (۱۶ عدد) متصل شد. محل نصب اهرم‌های کنترلی (دسته دنده‌ها، پدال‌ها، گاز دستی و ...) به گونه‌ای بر روی شاسی اتاق جانمایی و تدارک دیده شد که عملیات هر اهرم به درستی انجام شود.



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۱- الف) مجموعه شاسی اتاق طراحی شده، ب) مجموعه شاسی اتاق ساخته شده، پ) نصب شده بر روی تراکتور یوروپارس زراعی ۶۰ اسب بخار و ت) نصب شده بر روی تراکتور یوروپارس شالیزاری/باغی ۴۰ اسب بخار

نتیجه‌گیری

روش طراحی رایانه‌ای روش بسیار سریع، کم هزینه و دقیق برای طراحی محصول قبل از سرمایه‌گذاری برای تولید است. با این روش یک شاسی اتاق مناسب تراکتور با دامنه توانی ۴۰ تا ۶۰ اسب بخار و با وزن حداکثر ۲۴۵۰

کیلوگرم طراحی، تحلیل استاتیکی و ساخته شد. طراحی سه بعدی شاسی اتاق با توجه به گروه تراکتور (Cat.2)، ابعاد و اندازه‌های مجموعه انتقال قدرت تراکتور و موقعیت‌های مناسب برای اهرم‌های کنترلی در محیط‌های طراحی قطعه و مونتاژ نرم‌افزار CATIA انجام گرفت.

- Bayat, SH., & Zehsaz, M. (2017). Static and dynamic analysis of heavy vehicle chassis structures. *The Third National Conference on Mechanical and Electrical Engineering Knowledge and Technology of Iran*. <https://civilica.com/doc/726166>. (In Persian).
- HamzehNejad, I., Fazli, S., & Shahgholi, Gh.H. (2013). Static and dynamic design and analysis of a four-wheel trailer behind a tractor using CATIA and ADAMS software. *The Second National Congress of Organic and Conventional Agriculture*. Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. (In Persian).
- ISO 730: 2009(en). Agricultural wheeled tractors — Rear-mounted three-point linkage — Categories 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N and 4.
- ISO 5700 . (2006). Tractors for agriculture and forestry — Rollover protective structures (ROPS)-Static test method and acceptance conditions. ICS > 65 > 65.060 > 65.060.10.
- Khorsandi, F., Ayers, P., & Truster, T. J. (2017). Developing and evaluating a finite element model for predicting the two-post rollover protective structure nonlinear behavior using SAE J2194 static test. *Biosystems Engineering*, 156: 96-107.
- Mangado, J., Arana, J. I., Jaren, C., Arazuri, S., & Arnal, P. (2006). Design Calculations on Rollover Protective Structures for Agricultural Tractors. *Biosystems Engineering*, 96(2): 181-191.
- Mangado, J., Arana, I., Jaren, C., Arnal, P., Arazuri, S., & de & Leon, J. P. (2007). Development and validation of a computer program to design and calculate ROPS. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 13(1): 65-82.
- Naderlu, L., Qahramani, S., & Javadi Kia, H. (2018). Analysis of forces on the cutting pin of a reversible plow using CATIA V.5 r20 software. *The 9th National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources*. Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/918733>. (In Persian).
- Ramezani, H., Khoshtaghaza, M. H., Minai, S., & Akbarzadeh, Gh. (2019). Static design and analysis of chassis and tank of automatic raisin harvesting machine. Ty 12th National Congress of Mechanical Biosystems Engineering and Mechanization of Iran. Ahwaz, Iran. <https://civilica.com/doc/1005485>. (In Persian).
- Sakthivel, M., Dhandapani, N. V., Vetriselvan, V., & Arunachalam, J. (2021). Design and Analysis of Tractor Roll Over Protective
- همچنین به دلیل نیاز به تأمین ایمنی کاری راننده و مطابق با الزام استاندارد شماره ISO 5700 تحلیل سازه ROPS طراحی شده در محیط تحلیل نرم افزار انجام گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که سازه ROPS طراحی شده با موفقیت می‌تواند آزمون‌های بارگذاری استاتیکی مندرج در استاندارد مذکور را پشت سر بگذارد. سپس دانش فنی ایجاد شده به صورت نقشه‌های سه بعدی و دو بعدی استخراج و در اختیار کارگاه قطعه‌سازی شرکت تولید کننده قرار داده شد. در نهایت شاسی اتاق طراحی شده با موفقیت تولید و بر روی سه مدل تراکتور شالیزاری و باغی ۴۰ اسب بخار و زراعی ۶۰ اسب بخار نصب و ارزیابی شد.

سیاسگزاری

این مقاله از گزارش قرارداد طرح ارتباط با صنعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به شماره 1400/06/103262 با شرکت تراکتورسازی عمران سیرجان (سهامی خاص) استخراج شده است. نویسنده بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را ابتدا از مدیر عامل محترم آن شرکت و سپس از کارکنان تولید و کنترل کیفیت کارخانه آن شرکت که در انجام امور ساخت مجموعه شاسی اتاق و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نماید.

منابع

- Alfaro, J. R., Arana, J. I., Arazuri, S., & Jarén, C. (2010). Assessing the Safety provided by SAE J2194 Standard and Code 4 Standard Code for testing ROPS, using Finite Element Analysis. *Biosystems Engineering*, 105(2): 189-197.
- Ayers, P., Davis, G., Yantis, J., & Kerrigan, S. (2012). Improving ROPS designs for agricultural tractors. International Conference RAGUSA SHWA 2012, September 3-6, Ragusa-Italy.
- Ayers, P., Khorsandi, F., John, Y., & Whitaker, G. (2016). Development and evaluation of a computer-based ROPS design program (CRDP). *Journal of Agricultural Safety and Health*, 22(4): 247-260.
- Ayers, P., Khorsandi, F., Wang, X., & Araujoc, G. (2018). ROPS designs to protect operators during agricultural tractor rollovers. *Journal of Terramechanics*, 75: 49-55.

- Structure for the Influence of Deformation, Stress Distribution and Strain Energy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1717: 12-29.
- Shende, S. R., Kshirsagar, V. P., & Shelke, G. R. (2016). Design and Optimization of Tractor Roll Over Protective Structure. *International Journal of Engineering Development and Research*, 4(3): 1-7.
- Strang, Gilbert. (2005). *Linear Algebra and Its Applications* (4th ed.), Brooks Cole, ISBN 978-0-03-010567-8.