

طراحی، تحلیل استاتیکی و دینامیکی، ساخت و ارزیابی براکت اتصال موتور تراکتور به محور جلو

سجاد کیانی^{*۱}

چکیده

اتصال موتور تراکتور به محور جلوی آن و حفظ فاصله مرکز تا مرکز چرخ‌های جلو و عقب در دامنه استاندارد، توسط قطعه‌ای مستحکم به نام براکت جلو که جزئی از شاسی تراکتور است، انجام می‌شود. این پژوهش به منظور تولید یک قطعه براکت جدید به دلیل افزایش توان موتور یک مدل تراکتور از ۳۷ به ۵۲ کیلو وات و در نتیجه نیاز به افزایش فاصله دو محور جلو و عقب آن انجام شد. قطعه براکت به وسیله نرم‌افزار Catia به صورت سه‌بعدی طراحی شد و از نظر استحکام مکانیکی به روش عناصر اجزاء محدود تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی، در نرم‌افزار Abaqus مورد تحلیل قرار گرفت. به دلیل نیاز به استحکام بالا در این قطعه، جنس آن به صورت پیش فرض، چدن نشکن یا داکتیل (GGG40 با استحکام تسلیم ۲۵۰ مگاپاسکال) در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی نشان داد که حداکثر تنش وارد شده به قطعه (۹۳/۷ مگاپاسکال) کمتر از استحکام تسلیم قطعه طراحی شده است. بعد از اطمینان نسبی از مقاوم بودن قطعه، قالب ریخته‌گری آن در نرم‌افزار Catia طراحی و به روش ریخته‌گری آلومینیوم و ماشین‌کاری تولید شد. قطعات نمونه براکت (۵ قطعه) به روش ریخته‌گری چدن تولید و پس از ماشین‌کاری بر روی تراکتورهای نمونه (مدل RK704 با بیشینه وزن ۲۶۳۵ کیلوگرم) نصب و آزمون‌های مزرعه‌ای انجام شد. نتایج ارزیابی نشان داد که قطعه تولید شده از نظر حفظ فاصله WB، شرایط نصب و مقاومت مکانیکی قابلیت تولید و استفاده در تولید این تراکتور را دارد.

واژه‌های کلیدی: استحکام تسلیم، بارگذاری، تحلیل، شاسی.

ارجاع: کیانی س. ۱۴۰۲. طراحی، تحلیل استاتیکی و دینامیکی، ساخت و ارزیابی براکت اتصال موتور تراکتور به محور جلو. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۷: ۷۷-۹۰. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14012.608>

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: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

مقدمه

خواص تنش و کرنش ماده برای تعیین رفتار یک گره معین استفاده می‌شود.

معادلات برای هر گره و مجموعه کل معادلات به دست آمده را می‌توان با استفاده از ماتریس حل کرد تا رفتار کلی در ساختار به دست آید. در روش عددی یک نتیجه تخمینی به دست می‌آید و با افزایش تعداد گره‌ها و معادلات مربوطه بهبود یابد (Fish & Belytschko, 2007). مطالعات متعددی کاربرد روش‌های طراحی و تحلیل رایانه‌ای در فرآیند تولید قطعات در صنعت خودرو، تراکتورها و ماشین‌های کشاورزی را گزارش کرده است. در ادامه به تعدادی از این مطالعات اشاره می‌شود.

در پژوهشی تحلیل دینامیکی سازه شاسی یک خودرو غیرجاده‌ای مورد بررسی قرار گرفت. سازه شاسی در نرم‌افزار Catia طراحی و در نرم‌افزار Ansys تحت بارگذاری استاتیکی^۵ و شبه دینامیکی^۶ تحلیل و بررسی شد (Talebi & Big Moradi, 2011). بارگذاری شبه دینامیکی را بر اساس پیشنهاد و نتایج تجربی به دست آمده توسط Happian-Smith (2002) معادل ۴ برابر بار استاتیکی (ضریب بار دینامیکی^۷ (DLF)) در نظر گرفتند و بیشینه تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده را محاسبه و پیشنهاداتی جهت بهبود سازه شاسی ارائه کردند. به منظور به دست آوردن بیش‌ترین تنش اعمال شده به پیچ‌های اتصال و همچنین بیش‌ترین تغییر شکل فنر و باکت تریلر چهار چرخ پشت تراکتوری در بیشینه بار پخشی (۱۶ تن) از روش طراحی رایانه‌ای استفاده شد (Hamzehnejad et al., 2013). آن‌ها طراحی و تحلیل استاتیکی را به ترتیب در نرم‌افزار Catia و Adams انجام دادند. نتایج به دست آمده نشان داد بیش‌ترین تنش اعمال شده به پین اتصال بر اساس معیار Von Mises در تحلیل استاتیکی (۱۸۶ مگاپاسکال) کمتر از استحکام نهایی پین (۸۶۳ مگاپاسکال) محاسبه شده است. همچنین بیان کردند که نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری با نتایج به دست آمده از آزمایشات عملی تطابق مناسبی دارد و کاربردی بودن روش تحلیل نرم‌افزاری را تأیید کردند. در پژوهشی دیگر بعد از طراحی سه بعدی شاسی یک کامیون نسبت به تجزیه و تحلیل استاتیکی و

شاسی تراکتور علاوه بر نگهداری محورها، موتور، سکوی تراکتور و سایر قطعات تراکتور، به عنوان حمل کننده بارهای عمودی و کششی نیز عمل می‌کند. تراکتورها بر اساس نوع شاسی به صورت تراکتورهای شاسی‌دار، نیم‌شاسی و بدون شاسی طبقه‌بندی می‌شوند. تراکتورهای شاسی‌دار یک سازه حمایت کننده به نام شاسی یا قاب دارند. تراکتورهای نیم‌شاسی دارای تیرک یا محور طولی در دو طرف بدنه موتور و محفظه کلاچ هستند. در تراکتورهای بدون شاسی، بدنه به صورت یکپارچه است و وظیفه شاسی را نیز انجام می‌دهد. در تراکتورهای بدون شاسی که امروزه بسیار متداول هستند برای اتصال موتور تراکتور به محور جلوی آن از قطعه‌ای مستحکم به نام براکت جلو^۱ استفاده می‌شود. این قطعه جزئی از شاسی تراکتور است و علاوه بر اتصال سر موتور به محور جلو، محلی برای نصب رادیاتور و متعلقات، باتری و متعلقات و وزنه‌های سنگین کننده سر جلو تراکتور است. در شکل ۱ قطعه براکت جلو تراکتور نشان داده شده است. طراحی و تحلیل رایانه‌ای برای سرعت بخشیدن به فرآیند تولید قطعات صنعتی جدید و کاهش هزینه‌های اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرم‌افزار Catia و Abaqus نرم‌افزارهای طراحی هستند که توسط شرکت Dassault Systems توسعه یافته‌اند. این نرم‌افزارها به طور گسترده برای طراحی به کمک کامپیوتر (CAD)^۲ و تحلیل مهندسی به کمک کامپیوتر (CAE)^۳ استفاده می‌شوند. تحلیل نرم‌افزاری به روش عناصر اجزاء محدود^۴ (FEM) به عنوان یک روش عددی برای حل مسائل مهندسی که حل آنها با استفاده از روش‌های تحلیلی دشوار است، استفاده می‌شود و برای محاسبه تنش‌ها، انحرافات و جابجایی‌ها کاربرد دارد. در روش تحلیل رایانه‌ای ساختار قطعه تحت تجزیه و تحلیل به بخش‌هایی به عنوان عنصر به منظور مدیریت بهتر و آسانتر هر بخش، تقسیم (گسسته‌سازی) می‌شود. عناصر کوچک به هم پیوسته به نام عناصر محدود به طور مستقیم یا غیرمستقیم به یک دیگر از طریق گره‌ها یا خطوط مرزی و یا سطوح مرتبط می‌شوند. سپس از

5- Static Loading
6- Dynamic Loading
7- Dynamic Load Factor

1- Front bracket/Front Support
2- Computer-aided design
3- Computer-aided engineering
4- Finite Element Analysis

شده (۱۷۳ مگاپاسکال در فولاد، ۱۵۳ مگاپاسکال در چدن و ۱۷۲ مگاپاسکال در آلیاژ آلومینیوم) کمتر از استحکام تسلیم مواد مصرفی است. همچنین در آزمون بارگذاری دینامیکی و آزمون خستگی^۳ نتایج نشان داد که آلیاژ آلومینیوم بیش‌ترین دوره بارگذاری^۴ را تحمل کرده است و این آلیاژ به عنوان ماده مصرفی در تولید معرفی شده. نتایج واقعی نسبت به نتایج تحلیل نرم‌افزاری اختلاف حداکثر معادل ۳ درصد در بارگذاری استاتیک داشته است. در تولید اکسل‌ها، پوسته‌های دیفرانسیل، جعبه‌دنده بسیاری از قطعات دیگر ماشین‌های سنگین، تراکتورهای کشاورزی و سایر ماشین‌های صنعتی چدن داکتیل به طور خاص کاربرد دارد. جایی که استحکام باید از آلومینیوم فراتر رود اما لزوماً فولاد مورد نیاز نیست از چدن داکتیل استفاده می‌شود. این ماده برای اشکال مختلف و پیچیده بارگذاری‌های سنگین و همچنین جایی که نیاز به تحمل بارهای نوسانی و استقامت در برابر خستگی است، مناسب است (Svensson & Salomonsson, 2018). چدن نشکن، به عنوان چدن گرافیت کروی شناخته می‌شود. این ماده نوعی از چدن غنی از گرافیت است که در سال ۱۹۴۳ کشف شد (Yaqub & Arshad, 2009). در حالی که اکثر انواع چدن از نظر کشش ضعیف و شکننده هستند، چدن داکتیل به دلیل وجود گرافیت کره‌ای دارای مقاومت بسیار بیشتری در برابر ضربه و خستگی است. شکل ۲-الف ریز ساختار و شکل ۲-ب نمودار تنش-کرنش چدن داکتیل را نشان می‌دهد. در جدول ۱ درصد ترکیبات و جدول ۲ خصوصیات مکانیکی چدن داکتیل آورده شده است. در مباحث طراحی یک قطعه مکانیکی تحلیل در بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی قطعه از اهمیت خاصی برخوردار است. تحلیل استاتیکی اطمینان اولیه از مستحکم بودن قطعه در بارگذاری‌های ساکن را حاصل می‌کند. در بارگذاری استاتیک، بار به آرامی و در شرایط تعادل و ثابت بر روی سازه اعمال می‌شود و هیچ لرزشی درون سیستم رخ نمی‌دهد. در حالت‌هایی که بار دینامیکی بر یک قطعه متصور است می‌توان بار دینامیکی را به صورت بار استاتیکی معادل در نظر گرفت.

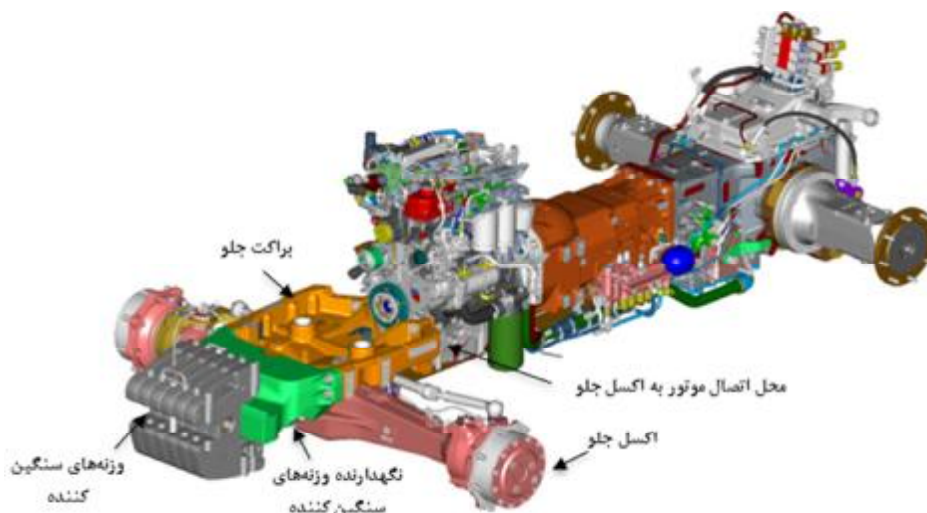
دینامیکی رایانه‌ای آن اقدام شد (Biat & Zehsaz, 2017). بارهای وارد شده به سازه شاسی اعم از استاتیکی و دینامیکی که شامل وزن اجزاء شاسی و ناهمواری‌های جاده‌ای است را اعمال و مدل‌سازی تحت شرایط مرزی مشخص انجام گرفت. نتایج آنها نشان داد که در جاده ناهموار بر اساس استاندارد ISO ۸۶۰۸، شاسی، متحمل تنش‌های بزرگ و خطرناکی شده و مکان آن نزدیک محور چرخ‌های عقب است. در مطالعه‌ای دیگر Supardjo & Tri Widodo, (2018) به منظور تحلیل و آزمون استاتیکی شاسی یک کامیونت از روش طراحی و تحلیل در نرم‌افزار Catia استفاده کردند. آنها بعد از طراحی سازه شاسی، بارگذاری استاتیکی (در بازه ۸ تا ۱۶ تن) را به منظور بررسی و مشاهده استحکام آن انجام دادند. نتایج نشان داد حداکثر تنش ایجاد شده بر اساس معیار Von Mises ۳۱/۶ مگاپاسکال است و در مقایسه با تنش تسلیم فولاد مصرفی (۱۰۴×۲/۵ مگاپاسکال)، در دامنه ایمن قرار دارد. حداکثر کرنش رخ داده در بیشینه بارگذاری ۰/۱۳۳ میلی‌متر به دست آمد. در کامیون‌های مخصوص معادن^۱، قاب شاسی عضو مستحکمی است که مسئولیت حمل اجزاء مختلف کامیون و تحمل بار در تمام موقعیت‌های کاری به صورت ایمن را دارد. از این رو باید آنقدر قوی باشد که بتواند این بارها را به خصوص در شوک‌های پیچشی، ارتعاشی و تنش‌های دیگر تحمل کند. در مطالعه‌ای بیشینه تنش، انحراف و مناطق بحرانی تحت شرایط بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیک به منظور بهینه‌سازی طراحی شاسی یک کامیون معدنی بررسی شد (Garud et al., 2018). آن‌ها شش ماده با ضخامت‌های مختلف را مورد مطالعه قرار دادند و مناسب‌ترین وزن، ضخامت و استحکام را تعیین کردند. در پژوهشی دیگر (Khot & Navthar, 2019) به منظور ایجاد مناسب‌ترین شکل و ابعاد برای محور جلوی یک کامیون از سه جنس فولاد (با استحکام تسلیم ۲۵۰ مگاپاسکال)، چدن داکتیل^۲ (۲۴۰ مگاپاسکال) و آلیاژ آلومینیوم (۲۸۰ مگاپاسکال) اقدام به طراحی در نرم‌افزار SolidWorks و تحلیل به روش عناصر اجزاء محدود در نرم‌افزار Ansys کردند. نتایج تحلیل به دست آمده نشان داد که حداکثر تنش ایجاد

3- Fatigue Analysis
4- Life Cycle

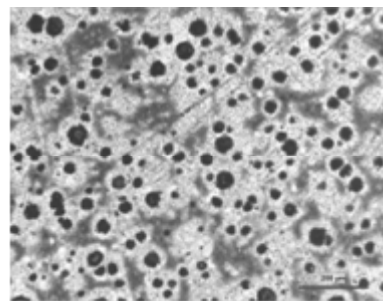
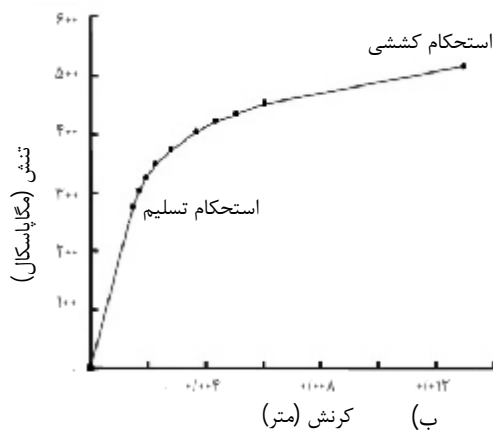
1- Dump Truck
2- Ductile Cast Iron

شبه دینامیکی به دست می‌آید. سپس با استفاده از یک تحلیل استاتیکی می‌توان نقاط بحرانی را به دست آورد.

بدین‌صورت که ضریب بار دینامیکی برای شرایط بارگذاری مورد نظر که معمولاً به صورت تجربی و آزمایشگاهی به دست می‌آید در بار استاتیکی ضرب و بار



شکل ۱- موتور، محور جلو، براکت و وزنه‌های سنگین کننده جلو در یک تراکتور بدون شاسی (Renius, 2020)



(الف)

شکل ۳- الف- ریزساختار چدن داکتیل با بزرگنمایی ۱۰۰، نشان دهنده اثر جزیره‌ای کربن در اطراف گره‌ها (Yaqub & Arshad, 2009) و (ب) نمودار تنش-کرنش چدن داکتیل (Svensson & Salomonsson, 2018)

جدول ۱- درصد ترکیبات چدن نشکن (Svensson & Salomonsson, 2018)

Cu	P	Cr	Mg	Mn	Ni	Si	C	Fe
۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۲۵	۱/۰	۱/۲-۲/۳	۳/۰-۳/۷	باقیمانده

جدول ۲- خواص مکانیکی چدن نشکن (Svensson & Salomonsson, 2018)

ماده	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	استحکام تسلیم ^۱ (مگاپاسکال)	استحکام کششی ^۲ (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته ^۳ (گیگاپاسکال)
GGG40	۷۲۰۰	۳۴۵-۲۵۰	۴۹۶	۱۶۹

1- Yield Stress
2- Ultimate Tensile Strength
3- Elasticity modulus

قید گذاری و مش بندی

در ابتدا از قیدگذاری ایزواستاتیک^۲ به منظور قیدگذاری اولیه قطعه برای جلوگیری از انتقال و چرخش جسم صلب، بدون محدود کردن بیش از حد آن استفاده شد. قیدگذاری Clamp برای اتصال دائم محل‌های اتصال براکت به موتور به کار گرفته شد. روش مش بندی هوشمند Octree Tetrahedron Mesh برای ایجاد مش‌های سه بعدی عناصر جزاء محدود مورد استفاده قرار گرفت. در این روش مش‌های چهار وجهی دارای ۴ رأس^۳ و ۶ یال^۴ و متناسب با محل قرارگیری مش ایجاد می‌شود. در این صورت که ابعاد مش بندی بر اساس نقاط مختلف قطعه و شرایط آنها به صورت خودکار تعیین می‌شود. این روش توسط نرم‌افزارهای طراحی و تحلیل Catia و Abaqus پیشنهاد می‌شود و پژوهشگران متعددی از آن استفاده کرده‌اند (Khorsandi et al., 2017; Supardjo & Tri Widodo, 2018; Khot & Navthar, 2019).

تحلیل در بارگذاری استاتیکی

از این تحلیل برای محاسبه تنش‌ها، کرنش‌ها و نیروهای موجود در قطعه براکت به دلیل اعمال وزن ثابت سر تراکتور و وزنه‌های سنگین کننده به آن استفاده شد. در مسائل بارگذاری استاتیکی خطی (تغییر شکل‌های کوچک) روابط حاکم به شکل معادله (۱) است (Mahboubi Shad & Isfahanian, 2008).

$$[K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\} \quad (1)$$

که در این معادله $[K] = \sum_{m=1}^N [k_e]$ (یا ماتریس سختی قطعه، N تعداد عناصرها، $[k_e]$ ماتریس سختی عنصر)، $\{u\}$ بردار تغییر مکان گروهی، $\{F^a\}$ بردار نیروی اعمالی کلی و $\{F^r\}$ بردار نیروی عکس‌العمل است. جدول ۳ بارهای وارد شده به قطعه براکت را در حالت ایستا نشان می‌دهد. نصب براکت بر روی موتور به وسیله ۶ پیچ اتصال انجام می‌شود. جایگاه این ۶ پیچ بر روی براکت به عنوان محل اتصال براکت صلب در نظر گرفته شد. محل اعمال نیرو به برکت از قسمت اتصال اکسل جلو و وزنه‌های نگهدارنده انجام شد.

به دلیل تغییر موتور یک تراکتور سبک زراعی و افزایش توان آن از ۳۷ کیلو وات به ۵۲ کیلو وات نیاز به انجام تغییراتی از جمله تغییر در طول سازه تراکتور به منظور حفظ فاصله دو محور تراکتور^۱ (WB) در دامنه استاندارد بود. با تغییر طول قطعه براکت می‌توان فاصله WB تراکتور را در دامنه استاندارد آن قرار داد. بنابراین در این پژوهش یک قطعه براکت جدید در مراحل الف) طراحی سه بعدی و استخراج دانش فنی (نقشه‌های سه بعدی شامل ابعاد و اندازه‌ها)، ب) تحلیل استاتیکی و دینامیکی به منظور به دست آوردن نقاط تمرکز تنش و اطمینان از استحکام قطعه با آلیاژ GGG40، پ) قالب‌سازی، ت) ساخت قطعه و ث) ارزیابی قطعه در شرایط کاری تراکتور، طراحی، تولید و ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

طراحی سه بعدی

طرح سه بعدی قطعه براکت در نرم‌افزار Catia (نسخه V5-6R2018) پیاده‌سازی شد. این کار بر اساس اندازه WB مناسب برای تراکتورها با توان ۵۲ کیلو وات، مشخصات محل اتصال روی بدنه موتور، مشخصات محل اتصال محور جلوی و مشخصات اتصال نگهدارنده وزنه‌های تراکتور انجام شد. محل اتصال موتور و محور جلو در دو صفحه عمود بر هم قرار می‌گیرند و قطعه براکت باید این مختصات را به گونه‌ای تدارک ببیند که هم فاصله WB رعایت شود و هم موتور و محور عمود بر هم متصل شوند. در پایداری تراکتور در بارگذاری‌ها کششی به خصوص خاکورزی بسیار مهم است (Renius, 2020). سایر ابعاد قطعه براکت به منظور داشتن استحکام مناسب و وزن کمینه بر اساس الزامات و خصوصیات مکانیکی مورد نیاز طراحی شد. شکل ۳-الف و ۳-ب به ترتیب نشان دهنده دامنه WB در تراکتورهای مختلف بر اساس وزن و توان آنها است.

تحلیل رایانه‌ای به روش FEM

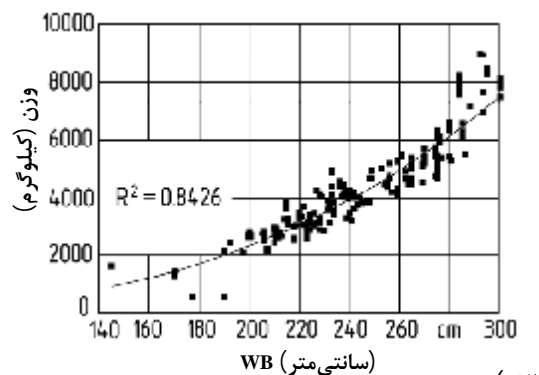
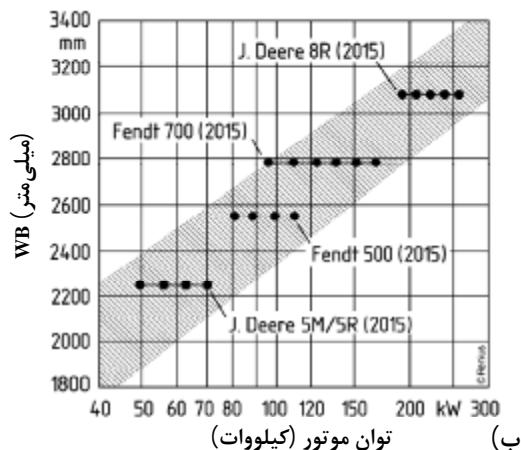
تحلیل استاتیکی و دینامیکی قطعه براکت در نرم‌افزار Abaqus (نسخه ۶.۱۲) به روش FEM انجام شد. مراحل در ادامه تشریح شده است.

2- Isostatic Restraint
3- Vertices
4- Edges

1- Wheelbase

جدول ۳- نیرو و گشتاورهای وارد شده به قطعه براکت

محل اعمال نیرو	مقدار نیرو (N)	مقدار گشتاور (N.m)
از سمت اکسل جلو	۱۰۸۰۰	۰
از وزنه‌های سنگین کننده	۱۹۲۰	۵۷۰/۳



شکل ۳-الف- وزن تراکتورهای مختلف در مقابل فاصله دو محور عقب و جلو (Rempfer, 1999) و (ب) فاصله استاندارد دو محور عقب و جلو برای تراکتورهای مرسوم (Renius, 2020)

بارگذاری گذرا^۴: به منظور مقایسه نتایج بارگذاری شبه دینامیک و اطمینان از استحکام قطعه در بارگذاری‌های متناوب در شرایط مختلف کاری تراکتور از جمله عبور تراکتور با سرعت‌های بالا از روی موانع، تحلیل بارگذاری ضربه‌ای با بارگذاری به شکل مثلثی (مطابق با شکل ۴) انجام شد. تحلیل در حوزه زمان و اعمال تحریک‌های متناوب مطابق با جدول نیروها (جدول ۳) به براکت از سمت محور و محاسبه عکس العمل‌ها در مقابل این تحریک‌ها انجام گرفت. این تحریک‌ها با توجه به شکل تغییرات نیروی اعمالی به محور در مطالعه (Göhlich & Kipp, 1987) به صورت پالس مثلثی ساده در نظر گرفته شدند. روش حل تحلیل گذرای مورد استفاده بستگی به تعداد درجات آزادی سیستم دارد. با فرض اینکه شرایط اولیه مسئله معلوم باشد و اثرات ژبروسکوپی و کوریولیس وجود نداشته باشد معادله تعادل دینامیکی گذرا برای یک قطعه خطی به شکل معادله (۲) است (Mahboubi Shad & Isfahanian, 2008).

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\} \quad (2)$$

که در آن [M] ماتریس جرم قطعه، [C] ماتریس میرایی سیستم، [K] ماتریس سختی و $f(t)$ ماتریس نیروهای

تحلیل در بارگذاری دینامیکی

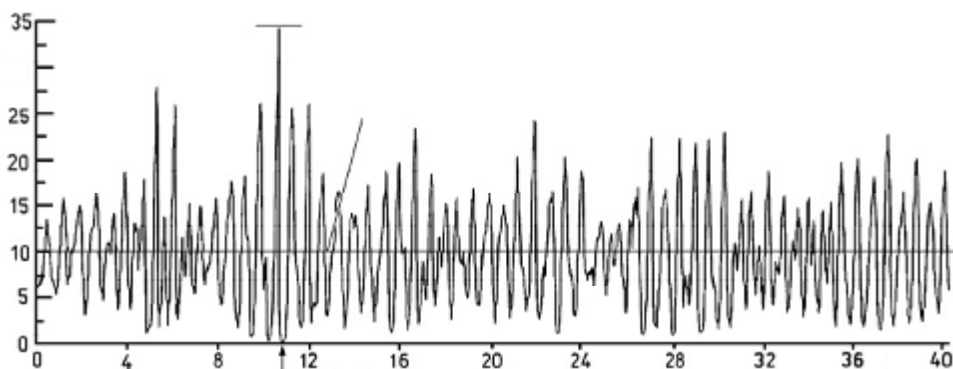
بارگذاری شبه دینامیکی: در این بارگذاری DLF برابر با ۲ تا ۳ برای خودروهای جاده‌ای و برای خودروهای غیر جاده‌ای^۱ ۴ محاسبه شده است (Pawlowski & Tidbury, 2001; Göhlich & Kipp, 1987; Böhler, 2001). نشان دهنده تغییرات بار عمودی اعمال شده به محور جلوی یک تراکتور کشاورزی است که با سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت در یک جاده کشاورزی^۲ در حال حرکت است. در این بارگذاری DLF برابر با ۳/۴ به دست آمده است. در کلیه عملیات سنگین کشاورزی از جمله خاکورزی، بار روی محور جلوی تراکتور کاهش و انتقال وزن^۳ از سر جلو تراکتور به محور عقب تراکتور اتفاق می‌افتد (Mahesh, 2015). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در عملیات‌های کششی در مزرعه بار عمودی روی محور جلو و در نتیجه براکت اتصال کاهش می‌یابد. با توجه به توضیحات فوق، در این مطالعه بیشینه DLF برابر با ۴ و بار شبه دینامیکی معادل ۴۳۲۱۰ نیوتن در نظر گرفته شد.

1- Off-Road Or Cross-Country Vehicles
2- Moderate Country Road
3- Weight Transfer

4- Transient Loading

کنترل و مقایسه تنش ایجاد شده با تنش تسلیم ماده استفاده می‌شود. در این مطالعه معیار تنش Von Mises در مقایسه با تنش تسلیم ماده در بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیک استفاده شد.

خارجی وارد بر سیستم است. جزئیات و توضیحات بیشتر روش‌های تحلیل استاتیکی و دینامیکی در منابع متعددی از جمله (Happian-Smith, 2002; Renius, 2020) آورده شده است. در مورد عنصرهایی که تحت تنش‌های ترکیبی نرمال و برشی قرار دارند از معیار تنش Von Mises به عنوان معیار



شکل ۴- نیروهای متغیر وارد شده به محور جلوی یک تراکتور متوسط کشاورزی (گروه ۲) در طول زمان پیمایش یک جاده هموار کشاورزی با سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت (Göhlich & Kipp, 1987)

ریخته‌گری و ماشین‌کاری قطعه تولید شده

مدل‌های ساخته شده برای ریخته‌گری به روش قالب ماسه‌ای با استفاده از چسب سیلیکات سدیم^۳ و گاز دی‌اکسید کربن (CO₂) در مخلوط ماسه ساخته شدند. این روش از روش‌های بسیار متداول در صنعت ریخته‌گری ایران برای قالب‌گیری و ماهیچه‌گیری است. بدین صورت که با استفاده از مدل‌های ساخته شده قالب‌های یک‌بار مصرف از جنس ماسه تولید می‌شود و مذاب آلیاژ مورد نظر در این قالب ریخته و قطعه تولید می‌شود. ماهیچه برای پر کردن فضای غیر مفید داخل قالب و کاهش مذاب مصرفی استفاده می‌شود. قطعه‌ای که از قالب ماسه‌ای بیرون می‌آید ابتدا باید از وجود ماسه‌های چسبیده به آن تمیزکاری و سپس در مرحله بعد سطوح اتصال آن ماشین‌کاری شود. در این مرحله نیز سوراخ‌کاری‌های مورد نیاز و رزوه‌زنی‌های لازم انجام شد.

ارزیابی قطعه تولید شده

ارزیابی قطعه برکت تولید شده در دو مرحله انجام شد. الف) کنترل ابعادی و وزنی قطعه از نظر کلیه ابعاد مورد نظر در طراحی رایانه‌ای و قابلیت نصب شدن آن بر روی تراکتور و ب) ارزیابی مزه‌ای قطعه نصب شده بر روی

قالب‌سازی^۱، تولید قطعه و ارزیابی آن

طراحی مدل

طراحی قالب از جمله مباحث تخصصی در تولید قطعات ریخته‌گری است. محیط‌های Core & Cavity Design (CCD) و Catia Mold Design (CMD) نرم‌افزار Catia برای طراحی قالب ریخته‌گری به صورت سریع و مقرون به صرفه به کار گرفته شدند از محیط کاری CCD برای تعیین سطوح برآمده و تورفتگی قالب به صورت خودکار استفاده شد. انجام این کار به صورت دستی به خصوص برای قطعات پیچیده کاری بسیار زمان‌بر است. اما در این محیط این فرآیند با سرعت بیش‌تری صورت می‌پذیرد. در محیط CMD قطعات و اجزای یک قالب را می‌توانیم طراحی و یا از مجموعه قطعات استاندارد انتخاب نمود. طراحی قالب قطعه برکت جلو به روش سیستم راه‌گامی و تغذیه‌گذاری در این دو محیط انجام شد.

ماشین‌کاری و ساخت مدل

طرح مدل‌های طراحی شده (دو مدل و یک ماهیچه) به روش ماشین‌کاری CNC^۲ بر روی بلوک‌های آلومینیومی ایجاد شدند.

1- Mold Design

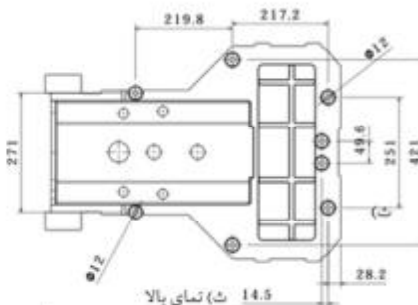
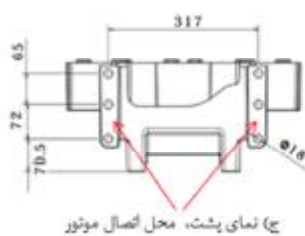
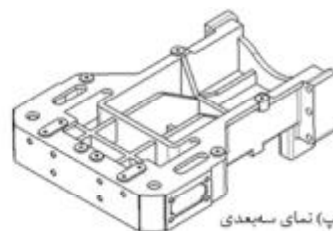
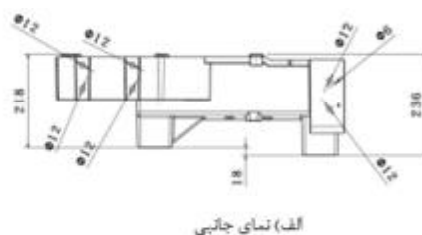
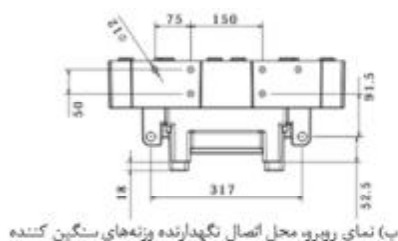
2- Computer Numerical Control (CNC) Machining

3- Sodium Metasilicate (Na₂O.xSiO₂.xH₂O)

نتایج و بحث

طرح سه بعدی (CAD)، ابعاد و اندازه‌ها

بر اساس بیشینه وزن تراکتور مدل یوروپارس RK704 با توان ۵۲ کیلو وات (۷۰ اسب بخار) از نوع 4WD (وزن ۲۶۳۵ کیلوگرم) و همچنین بر اساس مطالعه WB تراکتورهای مشابه اندازه WB برابر با ۲۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته و طراحی براکت از نظر اندازه طول آن انجام شد. شکل ۵ نماهای مختلف قطعه براکت طراحی شده را نشان می‌دهد.



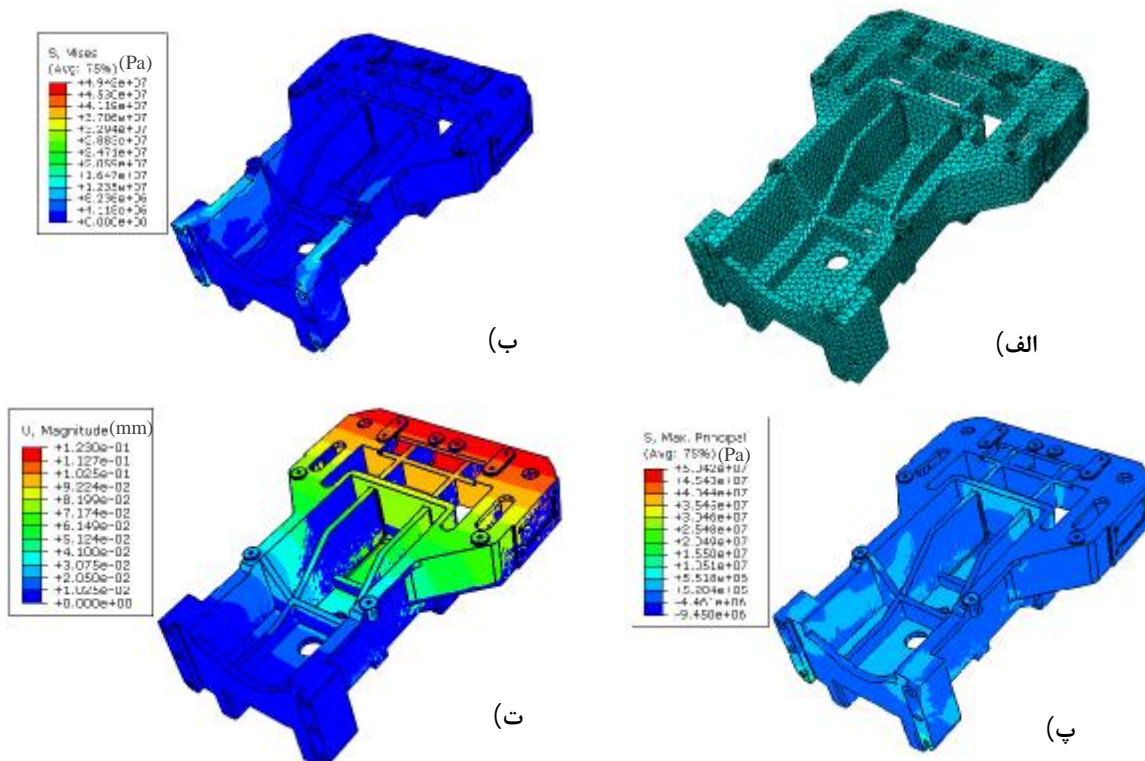
شکل ۵- طرح سه‌بعدی (CAD) قطعه براکت و ابعاد و اندازه‌های آن

بیشینه تنش اصلی^۱ برابر با ۵۰/۴۲ مگاپاسکال است که به مراتب کوچک‌تر از تنش تسلیم قطعه هستند. همچنین بیشینه انحراف ایجاد شده در قطعه ۰/۱۲۳ میلی‌متر به دست آمد. ضریب ایمنی^۲ (FS) در این بارگذاری برابر با ۵/۰۶ (با در نظر گرفتن تنش تسلیم FS_Y) و ۱۰/۰۴ (با در نظر گرفتن استحکام نهایی FS_U) حاصل شد.

نتایج تحلیل بارگذاری استاتیکی

بر اساس بارگذاری جدول ۳ تحلیل استاتیکی قطعه انجام و بیشینه تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده محاسبه شد. شکل ۶ نتایج تحلیل استاتیکی قطعه براکت در بارگذاری‌های ثابت را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل استاتیکی نشان داد که بیشینه تنش Von Mises ایجاد شده تحت بارگذاری استاتیک برابر با ۴۹/۴ مگاپاسکال و

1- Principal Stresses
2- Factor of Safety



شکل ۶-الف - مش بندی خودکار قطعه و (ب) تنش Von Mises، (پ) بیشینه تنش اصلی و (ت) بیشینه جابجایی قطعه در بارگذاری استاتیکی

تحلیل در شکل ۸ آورده شده است. نتایج این تحلیل نشان داد که بیشینه تنش Von Mises ایجاد شده تحت بارگذاری دینامیک برابر با $93/71$ مگاپاسکال و بیشینه تنش اصلی $95/62$ مگاپاسکال است که به مراتب کوچکتر از تنش تسلیم قطعه هستند. هم‌چنین بیشینه انحراف ایجاد شده در قطعه $0/208$ میلی‌متر به دست آمد. مقدار FS_y در این بارگذاری برابر با $2/66$ و FS_U برابر با $5/3$ محاسبه شد. این نتایج نشان می‌دهد که قطعه از نظر استحکام، مقاومت کافی در برابر نیروهای ضربه‌ای متناوب مثلثی از سمت محور را دارد. نمودار تنش‌های بیشینه ایجاد شده در قطعه براکت در مدت زمان 30 ثانیه بارگذاری متناوب در شکل ۹ آورده شده است. با توجه به این نتایج می‌توان DLF برابر با 2 را به عنوان ضریب بار شبه دینامیکی اعمالی به براکت اتصال موتور تراکتور به محور جلو آن در نظر گرفت.

نتایج در تحلیل بارگذاری دینامیک

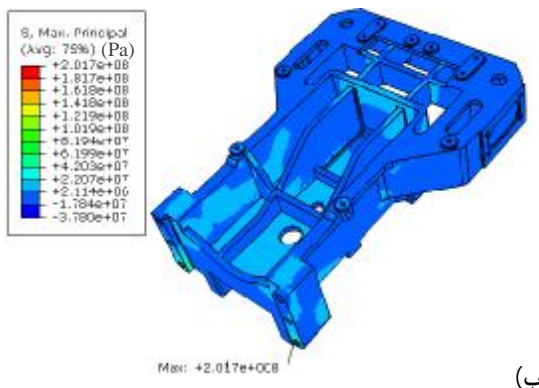
نتایج تحلیل شبه دینامیکی

شکل ۷ نتایج تحلیل شبه دینامیکی قطعه براکت را نشان می‌دهد. بیشینه تنش Von Mises ایجاد شده تحت بارگذاری استاتیکی برابر با $197/7$ مگاپاسکال و بیشینه تنش اصلی برابر با $201/7$ مگاپاسکال و کوچکتر از تنش تسلیم قطعه محاسبه شدند. هم‌چنین بیشینه انحراف ایجاد شده در قطعه $0/492$ میلی‌متر به دست آمد. مقدار FS_y در این بارگذاری برابر با $1/27$ و FS_U برابر با $2/48$ محاسبه شد.

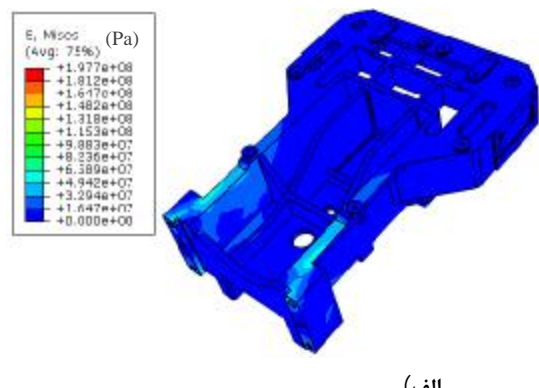
نتایج تحلیل در بارگذاری گذرا

بارگذاری‌های گذرا به شکل مثلثی در مدت زمان 30 ثانیه^۱، اندازه نمو^۲ به صورت خودکار و برابر با $0/05$ و بیشینه تعداد نموها^۳ برابر با 1000 اعمال شد. نتایج این

1- Time Period
2- Increment size
3- Maximum Number of Increments

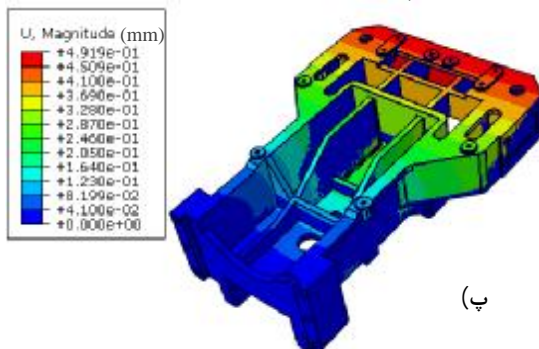


(ب)

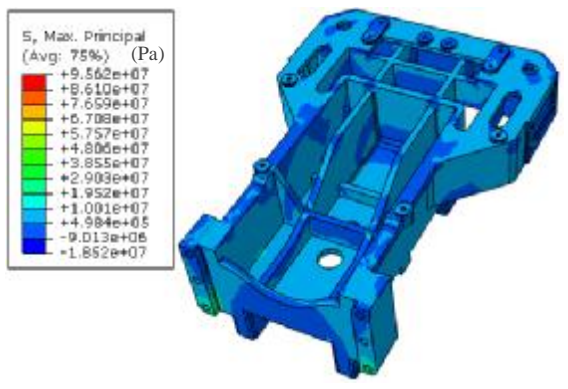


(الف)

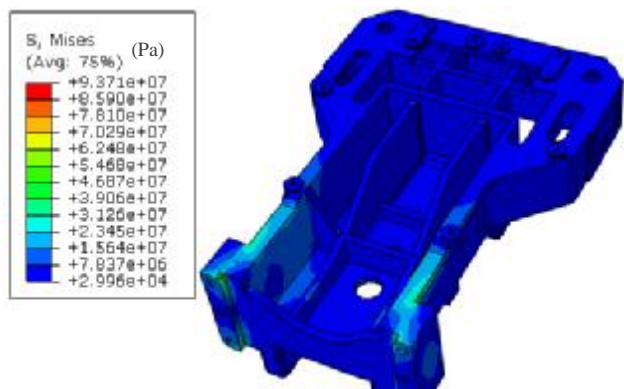
شکل ۷- الف - بیشینه تنش Von Mises، (ب) بیشینه تنش اصلی و (پ) بیشینه جابجایی قطعه براکت تحت بارگذاری شبه دینامیکی



(پ)

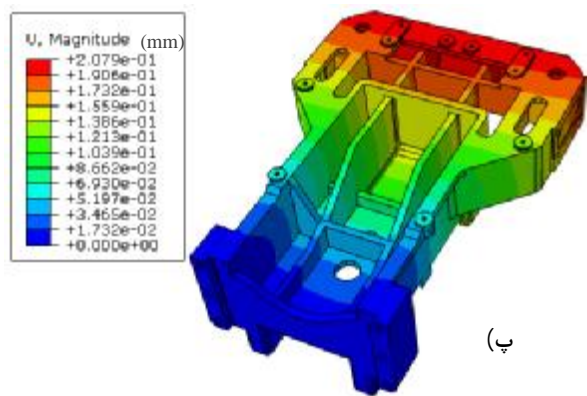


(ب)

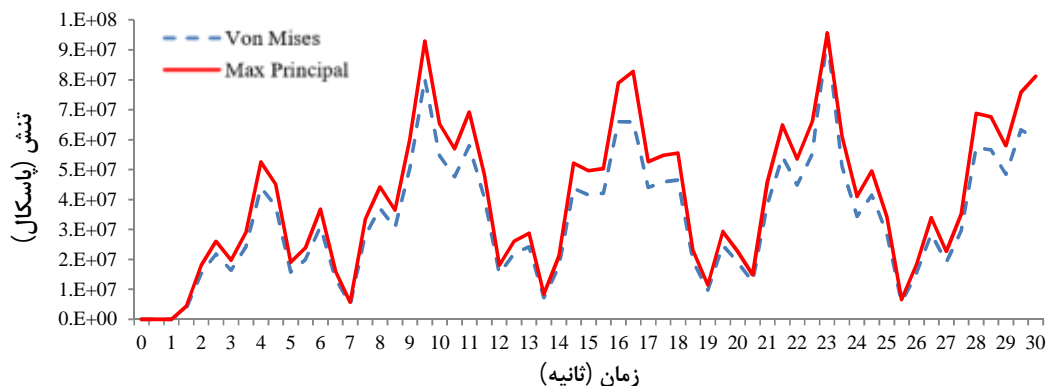


(الف)

شکل ۸- الف - بیشینه تنش Von Mises، (ب) بیشینه تنش اصلی و (پ) بیشینه جابجایی قطعه در بارگذاری دینامیکی متناوب



(پ)

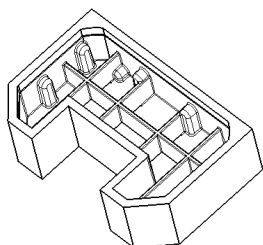


شکل ۹- نمودار تنش‌های بیشینه ایجاد شده در قطعه براکت در ۳۰ ثانیه بارگذاری گذرا

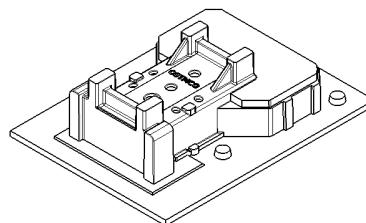
۱۰- قالب نهایی یکبار مصرف و ماسه‌ای را نشان می‌دهد که آماده تزریق مذاب در آن از مسیر راه‌گاهی آن است. قطعه براکت ریخته‌گری شده (شکل ۱۱-الف) بعد از عملیات ماشین‌کاری (شکل ۱۱ ب، کف تراشی محل اتصال به موتور و محور جلو، سوراخ کاری و رزوه‌زنی) مورد بررسی ابعادی و مونتاژی قرار گرفت.

قالب‌سازی و تولید قطعه براکت

شکل ۱۰-الف مدل اصلی طراحی و تولید از قطعه است که در ماسه فشرده می‌شود و شکلی اصلی قالب را ایجاد می‌کند. شکل ۱۰-ب مدل قسمت پنجره‌ای جلو براکت است که ماسه در آن فشرده شده و پس از سفت شدن تخلیه و در قالب اصلی گذارده می‌شود، شکل ۱۰-پ ماهیچه پرکننده قالب اصلی قطعه و درپوش آن و شکل



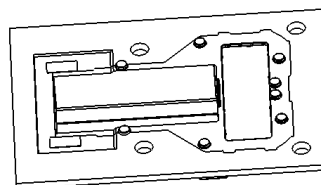
(ب) مدل سر مشبک قطعه



(الف) مدل اصلی قطعه



(ت) قالب ماسه‌ای یکبار مصرف ایجاد شده با دو مدل و یک ماهیچه



(پ) ماهیچه پرکننده فضای قالب

شکل ۱۰- مدل و قالب تولید شده برای ریخته‌گری قطعه براکت جلو

شرایط نصب موتور به محور جلو یعنی قائم بودن صفحه نصب موتور بر صفحه اتصال محور نیز مورد تأیید قرار گرفت.



ب) فرآیند ماشینکاری (کف تراشی، سوراخ کاری و رزوه زنی)

نتایج ابعادی برداری نشان داده که قطعه تولید شده کاملاً منطبق بر طرح سه بعدی رایانه‌ای است. سپس قطعه بر روی تراکتور نصب شد (شکل ۱۱-پ و ۱۱-ت) و از نظر



الف) قطعه ریخته‌گری شده



ت) نمونه تراکتور یوروپارس مدل RK704 تولید شده با قطعه نمونه براکت جلو



پ) نصب قطعه براکت بر روی تراکتور

شکل ۱۱- قطعه براکت تولید و مونتاژ شده بر روی تراکتور ۷۰ اسب بخار مدل RK704

تولید کننده تراکتور روش مرجع ارزیابی و مورد استفاده است.

نتیجه‌گیری

به‌منظور افزایش توان یک تراکتور علاوه بر این‌که بیشینه توان مورد نظر باید در دامنه توان قابل تحمل مجموعه سیستم انتقال توان باشد، باید وضعیت پایداری تراکتور نیز برای بیشینه توان مورد بررسی قرار گیرد. فاصله مرکز تا مرکز دو چرخ بر روی یک محور و فاصله مرکز تا مرکز دو محور جلو و عقب تراکتور علاوه بر وزن و ارتفاع تراکتور تأثیر مستقیم و قابل توجه در پایداری تراکتور در عملیات مزرعه‌ای دارند. در این پژوهش قطعه براکت جلو برای یک تراکتور چند منظوره با توان ۵۲ کیلووات (۷۰ اسب بخار) و وزن بیشینه ۲۶۳۵ کیلوگرم به‌منظور داشتن فاصله مرکز تا مرکز دو چرخ بر روی دو محور در دامنه استاندارد، در محیط نرم‌افزار Catia (نسخه 5-6R2018) طراحی

ارزیابی‌های مزرعه‌ای قطعه براکت نصب شده بر روی تراکتور

پس از نصب ۵ عدد قطعه براکت بر روی ۵ تراکتور جدید (شکل ۱۲-الف تا ۱۲-ج) و انجام عملیات زراعی و عمرانی به مدت یک دوره زراعی قطعات از روی تراکتورها جدا و با روش ابعاد برداری دقیق ابعاد برداری و اندازه‌های به دست آمده آن با ابعاد اولیه قطعه مقایسه شد. نتایج نشان داد قطعه بدون هیچ گونه تغییر شکل و اندازه و نشانه‌ای از لهیدگی و شکستگی مشابه قطعه طراحی شده اولیه است. و در نتیجه قطعه برای تولید انبوه مورد تأیید قرار گرفت. در مرحله دوم ارزیابی تعداد ۵۶ عدد قطعه براکت تولید، بر روی ۵۶ دستگاه تراکتور مونتاژ و در استان‌های مختلف کشور توزیع شد. نظرسنجی‌های انجام شده در دوره‌های سرویس ۵۰ و ۲۰۰ ساعت کارکرد تراکتورها هیچ‌گونه گزارشی مرتبط با قطعه براکت از طرف کاربران را دربرداشت. این روش ارزیابی در بسیاری از شرکت‌های

محور جلو را دارد. برای این قطعه در تحلیل رایانه‌ای بارگذاری گذرا DLF برابر با ۲ به دست آمد. بعد از تولید و تأیید ابعادی، قطعه بر روی تراکتور نصب و در دو مرحله با موفقیت ارزیابی مزرعه‌ای و میدانی انجام شد. نتایج نهایی نشان داد که طراحی سه‌بعدی و تحلیل نرم‌افزاری در محیط‌های رایانه‌ای روشی دقیق، سریع و کم هزینه برای تولید یک قطعه جدید در خط تولید تراکتور است.

سه‌بعدی، در محیط نرم‌افزار Abaqus (نسخه ۶.۱۲) تحلیل استاتیکی و دینامیکی، قالب‌سازی، تولید و ارزیابی شد. نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی نشان داد قطعه براکت طراحی شده برای این تراکتور با آلیاژ چدن نشکن استحکام کافی برای تحمل بارهای بیشینه اعمالی ناشی از وزن سر تراکتور، بارهای اعمالی ناشی از ناهمواری‌های جاده و بارهای اعمالی در عملیات متعدد زراعی از سمت



ب) تراکتور در عملیات پیمایش در زمین ناهموار



الف) تراکتور در عملیات شخم‌زنی در باغ



ت) نصب بیل هیدرولیک بر روی تراکتور



پ) نصب تسطیح‌کن در جلو تراکتور در عملیات عمرانی



ج) تراکتور در عملیات کششی سنگین



ث) تراکتور در عملیات کششی مزرعه‌ای

شکل ۱۲- عملیات به وسیله تراکتور RK704 نمونه با توان ۷۰ اسب بخار

محترم عامل شرکت تراکتورسازی عمران سیرجان (سهامی خاص) و کارکنان تولید و کنترل کیفیت کارخانه آن شرکت که در انجام امور تولید، مونتاژ و ارزیابی قطعه براکت جلوی تراکتور یاری رساندند، اعلام نماید.

سپاس‌گزاری

نویسنده بر خود لازم می‌داند مراتب تشکر صمیمانه را ابتدا از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری که شرایط انجام پژوهش را تدارک دید و سپس از مدیریت

- Journal of Agricultural Engineering*, 8(2): 181-189.
- Pawlowski, J., & Tidbury, G. (1964). *Vehicle Body Engineering* (1st ed.). Business Books, from: https://books.google.com/books/about/Nadwozia_Samochodowe_Projektowanie_Mecha.html?id=0vt9QgAACAAJ - 1 Jan 1969.
- Rempfer, M. (1999). Investigations on the Tire Equipment of Agricultural Standard Tractors. *13th International ISTVS Conference, 14-17 Sep., TU Munich, Munich, Germany*, 105-112.
- Renius, K. T. (2020). *Fundamentals of tractor design* (1st ed.). Springer, ISBN 978-3-030-32804-7 (eBook).
- Supardjo, A. D. A. & Tri Widodo, B. R. (2018). Finite element analysis of truck frame by using CATIA V5. In: *AIP Conference Proceedings*, 24-26 Jun., University of Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia, 1-7.
- Svensson, I. L. & Salomonsson, K. (2018). Mathematical Characterization of the Tensile Deformation Curve of Cast Iron Materials. *Materials Science Forum*, 925: 444-450.
- Talebi, R. & Big Moradi, S. (2011). Dynamic analysis of the chassis structure of an off-road vehicle. In: *The first RCME2011 Mechanical Engineering Conference*, 12-13 Sep., Islamic Azad University, Tehran, Iran, 1-13. (In Persian)
- Yaqub, E. & Arshad, R. (2009). ME-140 Workshop Technology. Air University. Retrieved 2011-10-30, from <https://www.elsevier.com/books/introduction-to-modern-vehicle-design/happian-smith/978-0-08-052304-0>
- منابع
- Biat, S.H., & Zehsaz. M. (2017). Static and dynamic analysis of heavy vehicle chassis structures. In: *The Third National Conference on Mechanical and Electrical Engineering Knowledge and Technology of Iran*. 19-21 Des., Esfahan University of Technology, Iran. 43-51. (In Persian)
- Böhler, H. (2001). *Tractor model to simulate dynamic loads for transport operations*. Ph.D. dissertation, TU Munich University.
- Fish, J. & Belytschko, T. (2007). *A First Course in Finite Elements* (1th ed.). New York: Wiley. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(4): 183-191.
- Garud, R. Y., Tamboli, S. C., & Pandey, A. (2018). Structural Analysis of Automotive Chassis, Design Modification and Optimization. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11: 9887-9892.
- Göhlich, H., & Kipp, J.C. (1987). New Aspects in Tractor Development and Design. In: *Proc. Intern. Symposium on Agricultural Mechanization Tokyo*, 12-14 Oct., Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS), Tokyo, Japan. 1-18.
- Hamzehnejad, I., Fazli, S., & Shahgholi, G.h.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*, 10-14 Oct., Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran, pp. 13-24. (In Persian)
- Happian-Smith, J. (2002). *An introduction to modern vehicle design* (1st ed). *Planta Tree publication*. eBook ISBN: 9780080523040.
- Khorsandi, F., Ayers, P., & Truster, T. J. (2017). Developing and evaluating a finite element model for predicting the two-posts rollover protective structure nonlinear behavior using SAE J2194 static test. *Biosystems Engineering*, 156: 96-107.
- Khot, S.S., & Navthar, R.R. (2019). Design and optimization of the front axle of a heavy truck. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(4): 2455-2143.
- Mahboubi Shad, A., & Isfahanian, M. (2008). Static and dynamic analysis of the chassis and structure of the O-457 bus. *Journal of Solid Mechanics*, 1(1): 67-75. (In Persian)
- Mahesh R. P. (2015). Measurement of weight transfer in two-wheel drive tractor by developed ring transduce. *International*