

مدل‌سازی و ارزیابی صندلی تراکتور مسی فرگوسن به روش اجزای محدود

شهره دائی جواد^۱، علی ملکی^{۲*} و حمیده رئیسی وانانی^۳

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>استفاده از مدل‌های کامپیوتری به منظور صرفه‌جویی و تسریع در طراحی وسایل نقلیه در دهه‌های اخیر گسترش و بهبود یافته است. با توجه به اهمیت راحتی راننده هنگام رانندگی وسایل نقلیه، صندلی به عنوان بخش مهمی در طراحی آن مطرح می‌شود. امروزه بدلیل وجود صندلی‌های نامناسب بدون لحاظ اصول ارگونومی در بیشتر تراکتورهای کشاورزی و عدم وجود مدل مناسب از صندلی تراکتور، عارضه درد کمر در بیشتر رانندگان کشاورز در حال افزایش است، از این‌رو پژوهشی جهت مدل‌سازی صندلی تراکتور مسی فرگوسن به روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت و نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. در این مطالعه شتاب‌های خروجی قسمت‌های صندلی در ۴ شتاب تحریک ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر مجذور ثانیه و بازه فرکانسی ۳ تا ۱۵ هرتز برای صندلی آزمایشی و صندلی مدل‌سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نمودارهایی که از شتاب‌های خروجی صندلی در قسمت‌های فوم تکیه‌گاه، فوم نشستگاه، تکیه‌گاه بدون فوم صندلی و نشستگاه بدون فوم صندلی در دو وضعیت صندلی آزمایشی و صندلی مدل‌سازی شده ارائه گردید، حاکی از آن است که تفاوت معنی‌داری میان دو وضعیت وجود ندارد. اعتبارسنجی مدل صندلی مسی فرگوسن مشخص کرد این مدل جهت طراحی اولیه صندلی تراکتور، مناسب است.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۹/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۷</p> <p>واژگان کلیدی: ارتعاش، تراکتور، روش اجزای محدود، شبیه‌سازی، صندلی.</p>

۱-مقدمه^۱

امروزه با توسعه روزافزون وسایل نقلیه و تلاش برای ایجاد ارگونومی مناسب در محیط کاری راننده، بینش‌های جدیدی در خصوص استفاده از مدل‌های کامپیوتری به وجود آمده است. با استفاده از این مدل‌های کامپیوتری علاوه بر تسریع فرایند شبیه‌سازی نیاز به صرف وقت و هزینه برای ساخت و ارزیابی نمونه اولیه صندلی وسایل نقلیه نیز کاهش می‌یابد. یکی از مدل‌های کاربردی در طراحی وسایل نقلیه بخصوص طراحی صندلی راننده،

مدل‌های اجزای محدود هستند که قادر به شبیه‌سازی قسمت‌های مختلف صندلی و تجزیه و تحلیل فاکتورهای تاثیرگذار در طراحی می‌باشند. در یک بررسی اجزای محدود از راحتی صندلی برای سرنشین وسایل نقلیه با مدل‌سازی قسمت‌های سازنده صندلی و مواد بافت انعطاف پذیر بدن فشارهای تماسی در محل سطح تماس مشترک صندلی با انسان بررسی شد [۱]. در مطالعه‌ای جنبه‌هایی از مدل کردن صندلی جهت آنالیز راحتی در نشستن با دو مدل‌سازی به روش اجزای محدود

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: malekia@iran.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد
۲. استادیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

ماشین‌های کشاورزی نیز تأثیر گذار است، لذا ضرورت انجام شبیه‌سازی صندلی تراکتور مسی فرگوسن و صحت‌سنجی مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی قابل اهمیت است.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه برای شبیه‌سازی صندلی تراکتور مسی فرگوسن از مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس ویرایش ۶/۱ استفاده شده است. به منظور اعتبار‌سنجی مدل اجزای محدود، نتایج حاصل از شتاب‌های خروجی شتاب‌سنج‌های نصب شده در قسمت‌های مختلف صندلی در آزمایشگاه با نتایج شتاب‌های حاصل از تحریک در مدل اجزای محدود مقایسه شد.

۲-۱- مدل اجزای محدود از صندلی تراکتور مسی فرگوسن به منظور مدل‌سازی صندلی تراکتور ۴ جزء اصلی صندلی در نرم‌افزار آباکوس طراحی شد. این اجزاء شامل فوم تکیه‌گاه صندلی، فوم نشستگاه صندلی، پایه و صفحه پشتی صندلی و ساختار صندلی شامل تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم می‌باشند که در شکل‌های (۳ تا ۵) و نقشه‌های دو بعدی آن‌ها با ابعاد در شکل‌های (۳ تا ۵) نشان داده شده‌اند. این اجزاء از نوع توپر^۱ بوده و به صورت اجزای شکل‌پذیر سه بعدی^۲ با تعداد ۱۵۸۲۹ جزء ۴ گره‌ای مرتبه اول چهار وجهی تعریف شده‌اند. در محیط ایجاد برهم‌کنش^۳ شرایط تماسی میان اجزای مونتاژ شده صندلی تعیین شد به گونه‌ای که از قید گره^۴ برای تعریف شرایط تماسی میان تکیه‌گاه فومی و نشستگاه فومی با ساختار صندلی استفاده شد. در قسمت تعریف خواص^۵ برای ساختار صندلی شامل تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم، خواص فولاد با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، برای پایه و صفحه پشتی صندلی، خواص برنج با مدول الاستیسیته ۷۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعریف شده است.

برای تعریف خواص فوم نشستگاه و تکیه‌گاه، از خواص مواد پلی‌یورتان^۶ استفاده شده است. این مواد خاصیت

و نمودارهای نیرو و تغییر مکان در قسمت‌های تماس نشستگاه و تکیه‌گاه صندلی با بدن انسان تحلیل شد [۲]. جهت بررسی راحتی در صندلی وسایل نقلیه، ضخامت و چگالی فوم بکار رفته در قسمت‌های تکیه‌گاه و نشستگاه صندلی در مطالعه‌ای به روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس تجزیه و تحلیل شد. تغییرات چگالی و ضخامت فوم به کار رفته در قسمت‌های صندلی (تکیه‌گاه و نشستگاه) بر حسب تغییرات فشار تماسی در سطح تماس مشترک صندلی و راننده نیز در این مطالعه محاسبه شد [۳]. در مطالعه‌ای تأثیرات دینامیکی و استاتیکی صندلی راننده شبیه‌سازی و در نهایت یک مدل بهینه از صندلی وسایل نقلیه ارائه گردید [۴]. جهت بررسی رابطه بین توزیع فشار با راحتی در سطح تماس مشترک بدن راننده و صندلی وسایل نقلیه مطالعه‌ای به روش اجزای محدود انجام شد و رابطه بین این دو را توجیه کرد [۵].

پنج نوع مختلف از صندلی ماشین‌های کشاورزی برای مطالعه توزیع فشار بر قسمت‌های کمر و کفل بدن راننده در سطح تماس با صندلی ماشین‌های کشاورزی مقایسه شد. ارتعاش وارد شده بر بدن راننده و پوسچری که راننده در زمان رانندگی اتخاذ می‌کند به عنوان فاکتور ایجادکننده تمایز میان توزیع فشار سطح تماس صندلی و راننده بیان شد [۶].

کارگران ماشین‌های کشاورزی به دلیل زمان کاری بالا، صندلی‌های نامناسب تراکتور و سختی کار در معرض درد کمر هستند، به طوریکه درد کمر یکی از شایع‌ترین عارضه‌ها در میان این رانندگان است. به همین منظور مطالعه‌ای در این راستا برای بررسی شدت درد کمر در ۱۶۹ راننده تراکتور در پنج‌جانب هند انجام شد که ۲۹ نفر از این رانندگان دچار عارضه درد کمر بودند. برای ارزیابی و شناسایی شدت درد کمر در مواجهه ارتعاش از پرسش‌نامه استفاده شد، یافته‌ها نشان داد شدت درد کمر با افزایش سن و مواجهه ارتعاشی افزایش یافته است [۷].

با توجه به مطالعات ذکر شده، طراحی صندلی تراکتورهای کشاورزی و بهبود راحتی در آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار بوده به طوریکه این عامل در نحوه کارکرد رانندگان

⁴ Tie

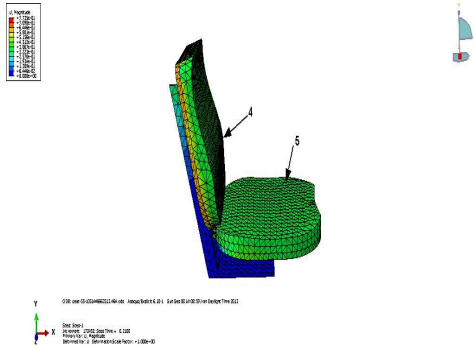
⁵ Property Module

⁶ Poly-urethane

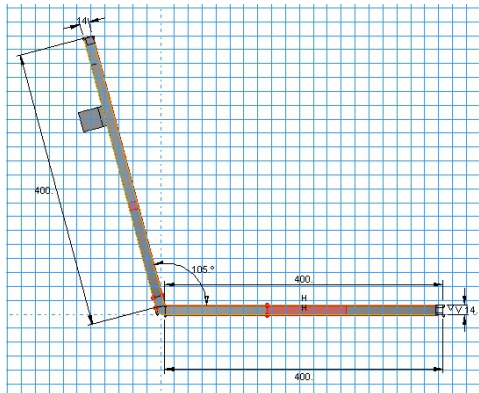
¹ Solid

² 3D-Deformable

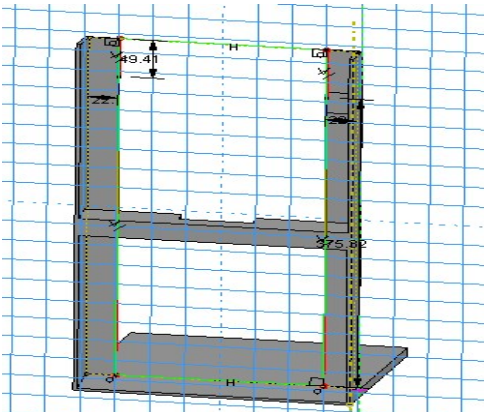
³ Interaction



شکل ۲- ساختار جلو صندلی: فوم تکیه‌گاه (۴) و نشستگاه صندلی (۵)



شکل ۳- نقشه دو بعدی تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم صندلی، نمای جانبی (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۴- نقشه دو بعدی پایه و صفحه پشتی صندلی، نمای روبه‌رو (ابعاد به میلی‌متر)

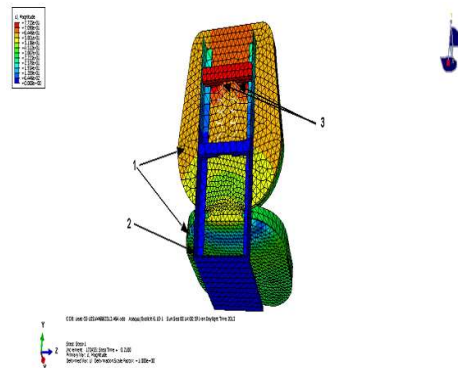
به منظور طراحی فنرها در نرم‌افزار از اجزای فنری^۲ استفاده شد و نقاط اتصال دو فنر مابین صفحه پشتی صندلی و صندلی در نظر گرفته شد (شکل ۱)، همچنین سختی فنرها با توجه به خصوصیات ساختاری آن‌ها ۳۰ کیلو نیوتن بر

هایپر الاستیک دارند و بنابر تعریف، این مواد در اثر فشارهای کوچک اعمال شده تغییر مکان‌های زیادی را از خود نشان می‌دهند و رفتار تنش- کرنش این گونه مواد علی‌رغم الاستیک بودن بسیار غیر خطی است. این روابط غیر خطی بصورت تابع پتانسیل انرژی کرنش (W) در رابطه (۱) آمده است:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} [\hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} ((J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1)] \quad (1)$$

هنگامیکه ($N=1, 2$ و 3) باشد، این تابع بصورت مدل چندفرومولی^۱ مطرح می‌شود که در این مطالعه تابع انرژی کرنش مرتبه دوم ($N=2$) استفاده شده است. μ_i ، β_i و α_i پارامترهای مواد، وابسته به دما هستند. λ_i ها عامل اصلی کشش و ارتجاع، J^{el} نسبت تغییر حجم تغییر شکل الاستیک و J^{th} نسبت تغییر حجم کرنش حرارتی هستند. ضریب β_i متناسب با درجه فشردگی مواد فومی، وابسته به ضریب پواسون (ν_i) است. برای بدست آوردن ضرایب ثابت معادله انرژی کرنش، می‌توان از آزمایش‌های معادل برای مواد تراکم ناپذیر استفاده کرد و یا می‌توان از گزارش‌های مشابه در این مورد بهره گرفت. در مطالعه کنونی به ضرایب ثابت مطالعه [۳] استناد می‌شود. نرم‌افزار در مدل‌سازی این گونه مواد فرضیات زیر را در نظر می‌گیرد:

- رفتار ماده الاستیک است.
- ماده ایزوتروپیک است.
- تحلیل شامل اثرات غیر خطی هندسی است.



شکل ۱- ساختار پشتی صندلی تراکتور شامل: تکیه‌گاه و نشستگاه (۱)، پایه و صفحه پشتی صندلی (۲) و فنرها (۳)

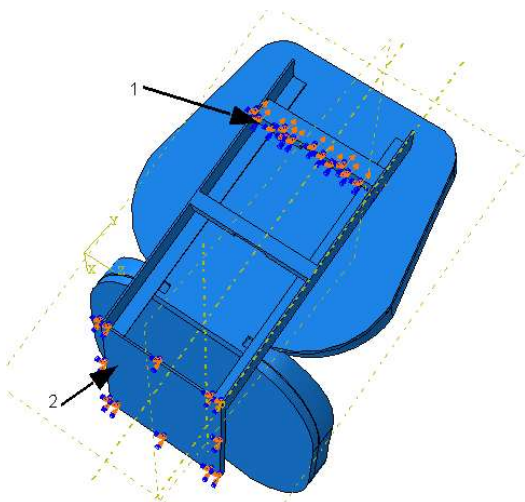
² Spring Element

¹ Polynomial

شرایط مرزی وارد بر پایه و صفحه پشتی صندلی بوده که تغییر مکان را در همه راستاها مقید کرده است. لازم به ذکر است خصوصیات طراحی شامل شکل ضخامت فوم‌ها، اندازه و زوایای اجزای سازنده صندلی در مدل‌سازی مطابق صندلی تراکتور مسی فرگوسن تعیین شد.

۲-۲- بررسی شرایط آزمون در صندلی آزمایشی

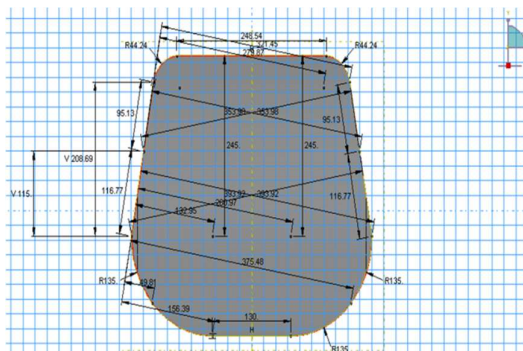
برای انجام آزمون عملی صندلی تراکتور مسی فرگوسن، در محدوده فرکانسی مشخص با اعمال شتاب تحریک تراکتور به ارتعاش واداشته شد [۸]. که برای این منظور در این پژوهش صندلی تراکتور مسی فرگوسن توسط یک لرزاننده هیدروالکتریکی در فرکانس‌ها و شتاب‌های مختلف به ارتعاش واداشته شد.



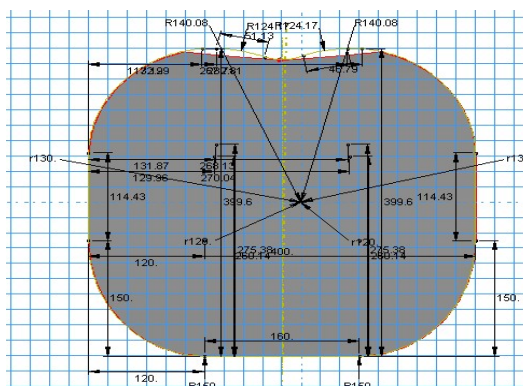
شکل ۷- شرایط مرزی وارد بر صندلی: قسمت پشتی صندلی (۱)، پایه و صفحه پشتی صندلی (۲)

شتاب‌های خروجی حاصل از شتاب‌های تحریک صندلی توسط دستگاه اندازه‌گیری ارتعاش ثبت گردید. این دستگاه دارای قسمت‌هایی چون شتاب سنج‌های سه جهتی^۳ و یک جهتی مدل دی‌جی‌بی^۴، دستگاه لرزاننده^۵، تقویت‌کننده، کمپرسور هوا و نرم افزار پردازش سیگنال^۶ ساخت شرکت برال و کجار^۷ می‌شد که قابلیت اندازه‌گیری و اعمال ارتعاش در محدوده فرکانسی ۰-۴۰۰۰ هرتز را دارا بود شکل (۸). جهت شتاب ورودی در راستای عمودی به طرف صندلی بوده که با پیکان قرمز رنگ در شکل (۹) مشخص شده است.

متر در نظر گرفته شد. روش حل به کار رفته در این مدل‌سازی روش حل دینامیکی صریح^۱ بود. این روش حل، ابزاری کارا برای حل گسترده‌ای از مسایل مکانیکی سازه‌های غیر خطی است.



شکل ۵- نقشه دو بعدی فوم تکیه‌گاه، نمای روبه‌رو (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۶- نقشه دو بعدی فوم نشستگاه، نمای بالایی (ابعاد به میلی‌متر)

در نرم‌افزار به منظور شبیه‌سازی رفتار دینامیکی صندلی تراکتور، تغییر مکان‌های معادل ۴ شتاب تحریک ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در بازه فرکانسی ۳ تا ۱۵ هرتز در شرایط مرزی سازه در محل تماس فنرها به سازه وارد شد. تغییر مکان‌ها به صورت جدول زمانی^۲ به سازه وارد شدند و در آخر تغییر مکان‌ها و شتاب‌های خروجی از سازه استخراج گردید. در شکل (۷) شرایط مرزی وارد بر صندلی مشخص شده است. پیکان ۱ مربوط به شرایط مرزی وارد بر قسمت پشت تکیه‌گاه صندلی بود که در راستای عمودی بر اساس ماکزیمم تغییر مکان مقید شده است و پیکان ۲ مربوط به

^۵ TIRA5220

^۶ PULSE Lab Shop Ver.8

^۷ Brüel & Kjær

^۱ Dynamic Explicit

^۲ Amplitude

^۳ DJB Type A/130/V Serial No. 023 & 003

^۴ DJB Type A/120/V Serial No. 2784, 2785, 2786 & 2787

و مش‌های ریز (۲۸۱۸۷ جزء در مدل) مش‌بندی شد شکل (۱۰). در هر حالت مش‌بندی، داده‌های تنش فون‌مایز در فوم نشستگاه صندلی به دست آمد. در جدول ۱ روند همگرایی مشاهده می‌شود.

مطابق جدول ۱ ملاحظه می‌شود که برای تعداد اجزای ۴۳۴۸، ۸۹۳۰ و ۲۸۱۸۷ جواب‌ها همگرا شده است (به عبارت دیگر جواب‌ها مستقل از اندازه اجزاء هستند). در نتیجه تعداد جزء مناسب برای این مدل همان ۴۳۴۸ است زیرا در این حالت، زمان حل مسئله کمتر از حالتی است که تعداد اجزاء ۲۸۱۸۷ بوده است، در حالیکه تفاوت نتایج آن‌ها بسیار ناچیز است. به طور کلی پاسخ عددی با افزایش تعداد اجزاء و با افزایش تراکم مش به سمت یک نتیجه واحد همگرا می‌شود.

جدول ۱- نتایج حاصل از تحلیل همگرایی مش در فوم نشستگاه صندلی

اندازه اجزاء	تعداد اجزاء	ماکزیمم تنش فون‌مایز (کیلو پاسکال)
۵۰	۴۲۶	۸/۵۹۴
۲۰	۴۳۴۸	۱/۹۶۲
۱۵	۸۹۳۰	۱/۹۵۹
۱۰	۲۸۱۸۷	۱/۹۵۷

همچنین محل قرارگیری شتاب‌سنج‌ها، دستگاه لرزاننده و تقویت کننده قابل مشاهده است. معادله شتاب ورودی $a(t)$ بر صندلی در زیر آمده است:

$$a(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

که در این معادله، ω سرعت زاویه ای، A دامنه نوسانی و φ زاویه تاخیر فاز است.

۳- نتایج و بحث

بررسی و مقایسه نتایج دامنه اسپکتروم حاصل از شتاب‌های خروجی در ۴ شتاب تحریک صندلی (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر مجذور ثانیه) در بازه فرکانسی ۳ تا ۱۵ هرتز در دو وضعیت مدل‌سازی و آزمایشگاهی در قالب نمودارهایی تجزیه و تحلیل شد که به اجمال به آنها اشاره می‌شود. همچنین نتایج حاصل از همگرایی مش برای تعیین تعداد و اندازه اجزاء به اختصار در زیر آمده است.

۳-۱- نتایج حاصل از تحلیل همگرایی مش^۱

برای تعیین تعداد و اندازه اجزاء متناسب با مدل صندلی از همگرایی مش استفاده شد. برای این منظور مدل با چهار اندازه مختلف اجزاء به صورت مش‌های درشت (۴۲۶ جزء در مدل)، مش‌های متوسط (۴۳۴۸ و ۸۹۳۰ جزء در مدل)



شکل ۸- قسمت‌های مختلف دستگاه اندازه‌گیری ارتعاش و ثبت آن: به ترتیب از راست به چپ (۱) شتاب‌سنج سه جهتی، (۲) شتاب‌سنج یک جهتی، (۳) دستگاه لرزاننده، (۴) تقویت کننده و (۵) کمپرسور هوا

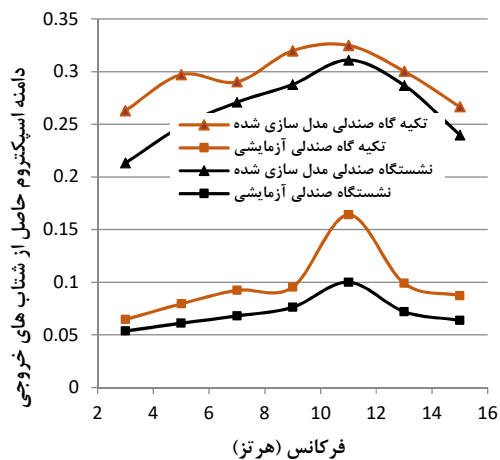
نشستگاه صندلی و تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم در محل قرارگیری سنسورها در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در شکل (۱۱) روند افزایش و کاهش شتاب‌های خروجی در دو وضعیت صندلی آزمایشی و صندلی مدل‌سازی شده در محدوده فرکانسی تقریباً یکسان است ولی بین داده‌های شتاب در دو وضعیت

۳-۲- تحلیل و بررسی نتایج شتاب‌های خروجی در شتاب

تحریک ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه

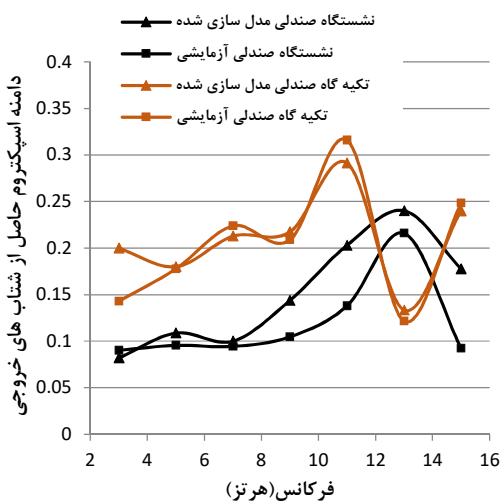
نتایج شتاب‌های خروجی حاصل از شتاب تحریک ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه بر صندلی تراکتور در بازه فرکانسی ۳ تا ۱۵ هرتز در دو صندلی آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزای محدود در قسمت‌های فوم تکیه‌گاه و فوم

¹ Mesh Convergence



شکل ۱۱- نمودار شتاب‌های خروجی در شتاب تحریک ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه در قسمت‌های فوم تکیه‌گاه و فوم نشستگاه

به طور کلی شتاب‌های خروجی در شتاب تحریک ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه در دو صندلی آزمایشی و صندلی مدل‌سازی شده در قسمت‌های تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم صندلی دارای تفاوتی در حد ۱۰٪ بوده‌اند و در قسمت تکیه‌گاه این تفاوت از ۱۰٪ نیز کم‌تر بوده است.



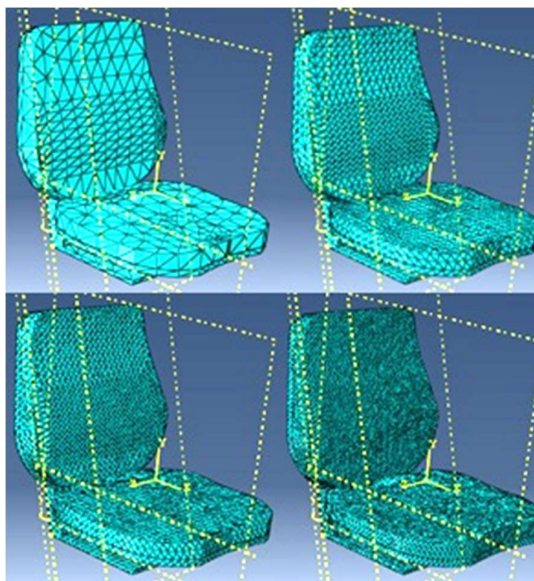
شکل ۱۲- نمودار شتاب‌های خروجی در شتاب تحریک ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه در قسمت‌های تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم

۳-۳- تحلیل و بررسی نتایج شتاب‌های خروجی در شتاب تحریک ۱ متر بر مجذور ثانیه
نتایج شتاب‌های خروجی حاصل از شتاب تحریک ۱ متر بر مجذور ثانیه بر صندلی تراکتور در بازه فرکانسی ۳ تا ۱۵ هرتز در دو صندلی آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده در

تفاوت دیده شده، که دلیل آن را می‌توان به نحوه کالیبره کردن دستگاه شتاب‌سنج در شتاب اولیه ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه مرتبط دانست. در شکل (۱۲) روند نمودار شتاب‌های خروجی در دو وضعیت صندلی آزمایشی و صندلی مدل‌سازی شده در محدوده فرکانسی یکسان بوده است و داده‌های شتاب در دو وضعیت، همبستگی بسیار مناسبی داشته‌اند.



شکل ۹- صندلی، تجهیزات اندازه‌گیری و جهت شتاب ورودی در راستای عمودی (شماره گذاری مطابق شکل شماره ۸)

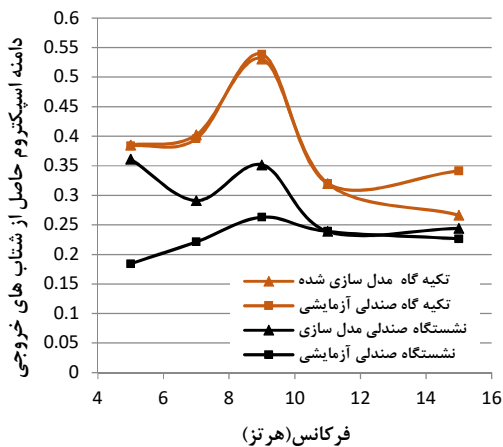


شکل ۱۰- نمای صندلی با مش بندی‌های مختلف

صندلی به جز در فرکانس‌های ۱۱ و ۱۵ هرتز دارای روند یکسانی هستند و داده‌های شتاب‌های خروجی در قسمت نشستگاه بدون فوم صندلی در دو وضعیت دارای همبستگی مناسبی هستند به طوریکه به جز در فرکانس‌های ۳ و ۱۵ هرتز تفاوت میان داده‌ها از ۱۰٪ تجاوز نمی‌کند.

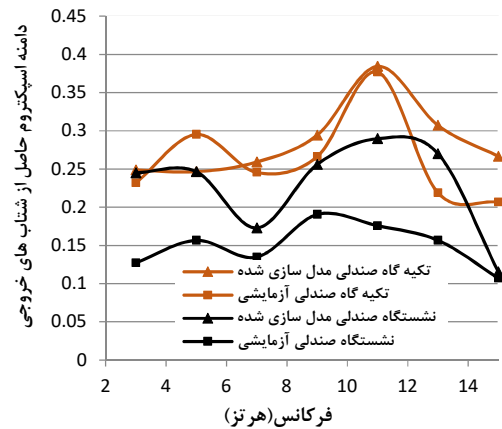
۳-۴- تحلیل و بررسی نتایج شتاب‌های خروجی در شتاب تحریک ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه

نتایج شتاب‌های خروجی حاصل از شتاب تحریک ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه بر صندلی تراکتور در بازه فرکانسی ۵ تا ۱۵ هرتز در دو صندلی آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزای محدود در قسمت‌های فوم تکیه‌گاه و فوم نشستگاه صندلی و تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم صندلی در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) نشان داده شده است. در این شتاب تحریک بر خلاف شتاب‌های تحریک ۰/۵ و ۱ متر بر مجذور ثانیه، شتاب خروجی در فرکانس ۳ هرتز در نظر گرفته نشده است. دلیل این امر عدم توانایی اندازه‌گیری دستگاه شتاب‌سنج در این فرکانس بوده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص شده نمودارهای شتاب‌های خروجی در دو وضعیت (صندلی آزمایشی و صندلی مدل‌سازی شده) دارای روند یکسانی بوده‌اند به طوریکه برای قسمت فوم تکیه‌گاه صندلی تطابق بسیار مناسبی بین نمودارها در دو وضعیت دیده شده و تنها تفاوت اندکی در فرکانس ۱۵ هرتز وجود داشته است. در شکل (۱۵) نیز تطابق مناسبی بین داده‌های شتاب‌های خروجی در دو وضعیت وجود داشته و روند نمودارها تقریباً یکسان بوده است.

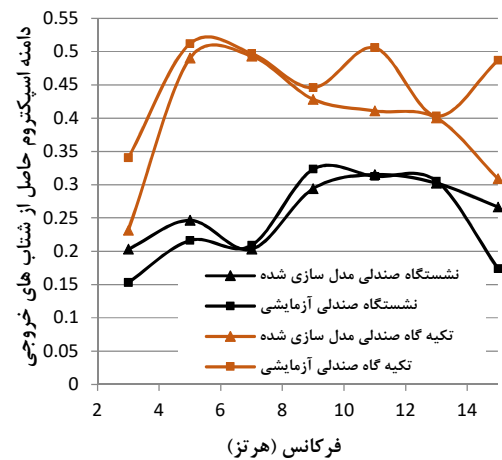


شکل ۱۵- نمودار شتاب‌های خروجی در شتاب تحریک ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه در قسمت‌های فوم تکیه‌گاه و فوم نشستگاه

نرم‌افزار اجزای محدود در قسمت‌های فوم تکیه‌گاه و فوم نشستگاه صندلی و تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم صندلی در شکل‌های (۱۳ و ۱۴) نشان داده شده است. مشخص است که در شکل (۱۳) شتاب‌های خروجی در دو وضعیت صندلی آزمایشگاهی و صندلی مدل‌سازی شده دارای روند تقریباً یکسانی هستند و از نظر عددی همبستگی بهتری نسبت به داده‌های شتاب‌های خروجی حاصل از شتاب تحریک ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه در فوم تکیه‌گاه و نشستگاه صندلی شکل (۱۱) در محدوده فرکانسی یکسان داشته‌اند.

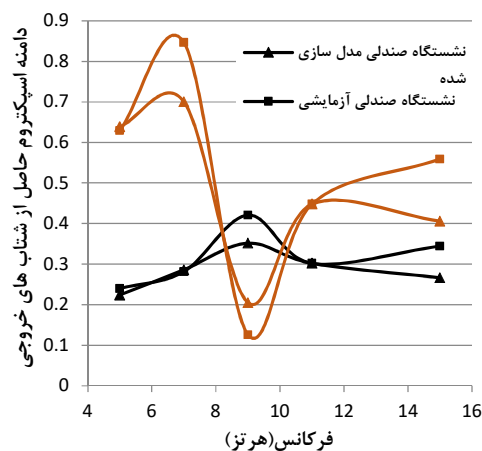
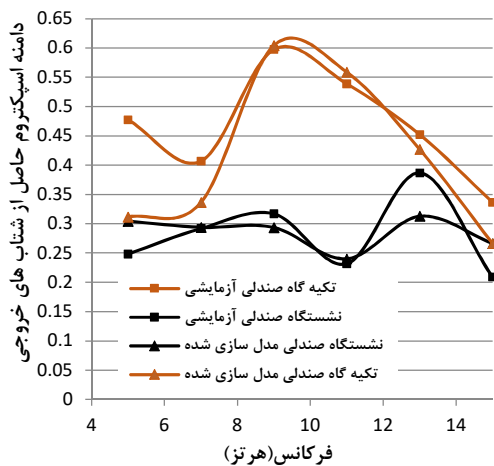


شکل ۱۳- نمودار شتاب‌های خروجی در شتاب تحریک ۱ متر بر مجذور ثانیه در قسمت‌های فوم تکیه‌گاه و فوم نشستگاه صندلی



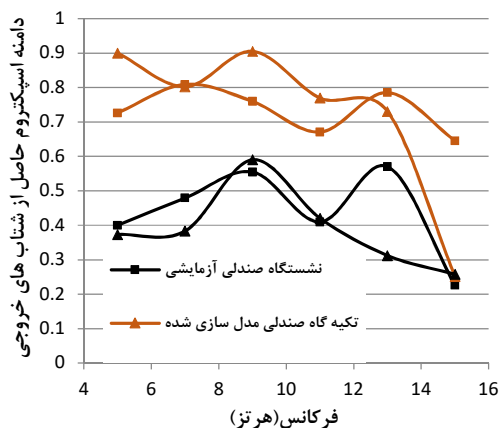
شکل ۱۴- نمودار شتاب‌های خروجی در شتاب تحریک ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه در قسمت‌های تکیه‌گاه و نشستگاه بدون فوم همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل (۱۴) نیز نمودار شتاب‌های خروجی در دو وضعیت (صندلی آزمایشی و صندلی مدل‌سازی شده) در قسمت تکیه‌گاه بدون فوم

موضوع مطابق با نتایج پژوهش وو و همکاران (۱۹۹۹) است [۹].



شکل ۱۶- نمودار شتاب های خروجی در شتاب تحریک ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه در قسمت های تکیه گاه و نشستگاه بدون فوم

شکل ۱۷- نمودار شتاب های خروجی در شتاب تحریک ۲ متر بر مجذور ثانیه در قسمت های فوم تکیه گاه و فوم نشستگاه



شکل ۱۸- نمودار شتاب های خروجی در شتاب تحریک ۲ متر بر مجذور ثانیه در قسمت های تکیه گاه و نشستگاه بدون فوم

همچنین تفاوت های اندک مشاهده شده میان نمودارهای شتاب های خروجی در دو صندلی آزمایشگاهی و صندلی مدل سازی شده در چند فرکانس در محدوده فرکانسی ۳ تا ۱۵ هرتز می تواند ناشی از خطاهای آزمایشی هنگام اندازه گیری و تحلیل داده شتاب خروجی از دستگاه شتاب سنج باشد.

به طور کلی جدول ۲ درصد خطای نتایج دامنه اسپکتروم حاصل از شتاب های خروجی در دو صندلی آزمایشگاهی و صندلی مدل سازی شده را نشان می دهد.

۳-۵- تحلیل و بررسی نتایج شتاب های خروجی در شتاب تحریک ۲ متر بر مجذور ثانیه

نتایج شتاب های خروجی حاصل از شتاب تحریک ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه بر صندلی تراکتور در بازه فرکانسی ۵ تا ۱۵ هرتز در دو صندلی آزمایشگاهی و مدل سازی شده در نرم افزار اجزای محدود در قسمت های فوم تکیه گاه و فوم نشستگاه صندلی و تکیه گاه و نشستگاه بدون فوم صندلی در شکل های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. در نظر نگرفتن شتاب خروجی در فرکانس ۳ هرتز در شتاب تحریک ۲ متر بر مجذور ثانیه همانند شتاب تحریک ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه بدلیل عدم توانایی دستگاه شتاب سنج در اندازه گیری شتاب خروجی بوده، به طوریکه در این شتاب و فرکانس دستگاه لرزاننده هیدروالکتریک قادر به ایجاد ارتعاش در صندلی نبوده است. در شکل های ۱۷ و ۱۸ مشخص است نمودارهای شتاب های خروجی در دو وضعیت (صندلی آزمایشی و صندلی مدل سازی شده) دارای روند یکسان و تطابق مناسب بوده اند.

به طور کلی بررسی روند تفاوت بین نمودارها نشان داد که با افزایش شتاب تحریک میزان تفاوت به وجود آمده بین داده ها روند کاهشی داشته و در شتاب های بالا (۱/۵ و ۲ متر بر مجذور ثانیه) تفاوت خیلی کمی وجود داشته است. عدم وجود تفاوت معنی دار در صندلی بدون فوم حاکی از آن است که تفاوت به وجود آمده منحصراً مربوط به شبیه سازی فوم آن بوده (ناشی از تغییر خواص هایپر الاستیک فوم در مقابل شتاب های تحریک) و این

جدول ۲- درصد خطا در داده‌های شتاب خروجی از تکیه‌گاه و

نشستگاه صندلی آزمایشگاهی و صندلی مدل‌سازی شده

شتاب‌تحریک (متر بر مجدور ثانیه)	فرکانس (هرتز)	درصد خطا در تکیه‌گاه صندلی	درصد خطا در نشستگاه صندلی
۰/۵	۳	۳۹/۹۵	۹/۱۱
	۵	۱/۲۳	۱۳/۹۳
	۷	۴/۹۶	۵/۹۳
	۹	۴/۰۸	۳۷/۲۴
	۱۱	۷/۷۹	۴۷/۱۰
	۱۳	۹/۷۰	۱۱/۱۹
۱	۱۵	۳/۴۲	۹۲/۴۷
	۳	۳۱/۹۰	۳۲/۷۲
	۵	۴/۲۴	۱۳/۹۶
	۷	۰/۸۰	۲/۷۷
	۹	۳/۸۸	۹/۰۰
	۱۱	۱۸/۷۴	۰/۸۵
۱/۵	۱۳	۰/۷۴	۱/۰۲
	۱۵	۳۶/۵۰	۵۳/۳۲
	۳	-	-
	۵	۰/۳۴	۶/۷۱
	۷	۱/۶۵	۱/۵۹
	۹	۱/۵۰	۱۶/۴۰
۲	۱۱	۰	۰
	۱۳	۵/۶۷	۹/۵۴
	۱۵	۲۱/۹۰	۲۲/۷۰
	۳	-	-
	۵	۳۴/۷۴	۱۸/۴۳
	۷	۱۷/۲۷	۰/۷۶
	۹	۱/۱۱	۷/۹۷
	۱۱	۳/۷۱	۳/۴۸
	۱۳	۵/۶۱	۲۳/۶۹
	۱۵	۲۰/۸۳	۲۱/۵۸

۴- نتیجه گیری

اعتبارسنجی مدل اجزای محدود ارائه شده برای صندلی تراکتور، توسط داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت و نتایج بدست آمده صحت مدل مورد نظر را تایید کرد، در نتیجه این صندلی می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی صندلی‌های جدید تراکتور با قابلیت راحتی بیشتر برای راننده کشاورز باشد. ایجاد محیط ارگونومی مناسب و طراحی صندلی‌های بهینه موجب بهبود سلامتی راننده در محیط کار و افزایش بازده کاری او می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد؛ بدین وسیله نویسندگان مراتب تشکر و سپاس خود را اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] M. Grujcic, B. Pandurangan, G. Arakere, W. C. Bell, T. He, and X. Xie, "Seat-cushion and soft-tissue material modeling and a finite element investigation of the seating comfort for passenger-vehicle occupants", *Materials and Design*, Vol. 30, NO. 10, December 2009, pp. 4273 – 4285.
- [2] M. Verver, R. Lange, J. Hoof, and J. Wismans, "Aspects of seat modelling for seating comfort analysis", *Applied Ergonomics*, Vol. 36, NO. 1, January 2005, pp. 33 – 42.
- [3] I. Mircheski, T. Kandikjan, and P. Simonovski, *Virtual testing and experimental verification of seat comfort in driver's seat for passenger automobile*. Ss Cyril & Methodius University, Faculty of Mechanical Engineering, Karpos II - bb, 1000 Skopje, Republic of Macedonia, 2010.

[4] A. Siefert, S. Pankoke, and H. Wolfel, "Virtual optimization of car passenger seats: Simulation of static and dynamic effects on drivers' seating comfort", *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 38, NO. 5-6, May 2008, pp. 410 – 424.

[5] R. Zenk, C. H. Mergl, J. Hartung, O. Sabbah, and H. Bubb "Objectifying the Comfort of Car Seats", SAE Technical Paper Series, World Congress Detroit, Michigan, April 2006.

[6] I. Hostens, G. Papaioannoub, A. Spaepenb, and R. Herman, "Buttock and back pressure distribution tests on seats of mobile agricultural machinery", *Applied Ergonomics*, Vol. 32, NO. 4, August 2001, pp. 347 – 355.

[7] S. Koley, L. Sharma, and S. Kaur, "Effects of Occupational Exposure to Whole-Body Vibration in Tractor Drivers with Low Back Pain in Punjab", *Anthropologist*, Vol. 12, NO. 3, July 2010, pp. 183 – 187.

[۸] علی ملکی و سیدسعید محتسبی، "شبیه سازی و ارزیابی مدل ارتعاشی بدن انسان و صندلی تراکتور"، هفتمین کنفرانس مهندسی پزشکی ایران، تهران، ایران، ۱۳ و ۱۲ آبان، ۱۳۸۹.

[9] X. Wu, S. Rakheja, and P. Boileau, "Distribution of human seat interface pressure on a soft automotive seat under vertical vibration", *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 24, NO. 5, September 1999, pp. 545 – 557.