



یادداشت تحقیقاتی

تحلیل دینامیکی سپر خودرو با اتصالات هوشمند

عبدالحسین فریدون^۱، سید حسن کمالی^۲ و حسین همتیان^{۳*}

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

^۲ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

چکیده

سازه‌های هوشمند، مکانیزم‌هایی هستند که نسبت به تغییرات شرایط فیزیکی و مکانیکی محیط واکنش نشان داده و دارای قابلیت تطابق پذیری با شرایط کاری می‌باشند. دسته‌ای از سازه‌های هوشمند وجود دارند که سیستم‌های حسگر ندارند و با مکانیزم‌های بسیار ساده مکانیکی می‌توان آنها را ایجاد نمود. به منظور بهبود عملکرد کل سازه، رفتار مکانیکی آنها به نحوی از پیش تعیین شده تا در برابر شرایطی همچون ارتعاشات و ضربه، بهترین عکس‌العمل را از خود بروز دهند. در این مقاله به منظور بهبود عملکرد تیر سپر در برخورد، با بکارگیری رفتارهای مکانیکی مختلف از جمله یک رفتار هوشمند دوخطی در ناحیه اتصالات سپر به خودرو و شبیه‌سازی برخورد سپر خودرو در محیط نرم افزار LS-DYNA-V970، مناسب‌ترین رفتار شناسایی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مناسب‌ترین رفتار برای تکیه‌گاه رفتاری است که در ابتدای برخورد، سفتی سازه اتصالات بیشتر باشد و با افزایش نیروی برخورد، سازه منعطف‌تر شود و سفتی آن کاهش یابد تا از واماندگی تیر سپر جلوگیری گردد. با بررسی رفتار هوشمند دو خطی در تکیه‌گاه‌های سپر و میزان جابجایی که در آن مقدار سفتی سازه تغییر می‌یابد، ملاحظه شد که هر چه مقدار این جابجایی کمتر باشد، نتایج بهتری به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: تیر سپر؛ اتصالات هوشمند؛ آنالیز دینامیکی؛ آزمون ضربه؛ خودروی سواری.

۱- مقدمه

تصادفات به یکی از حوزه‌های مهم تحقیقاتی در علوم مهندسی تبدیل شده‌است. در کشورهای پیشرفته دنیا، مسأله ایمنی خودرو از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. شرکت‌های بزرگ خودروسازی در دنیا نظیر ولوو و هوندا در این زمینه تلاش‌های بسیاری انجام دادند و موفق به ابداع مفاهیم جدیدی در زمینه ایمنی خودرو نظیر محفظه ایمن، نواحی

میزان تولید خودرو در سراسر جهان در حال افزایش است و تخمین زده شده که تا سال ۲۰۲۰ به تولید سالانه ۷۶ میلیون اتومبیل می‌رسد [۱]. امروزه با بالا رفتن سطح آگاهی عمومی و افزایش الزامات قانونی و استانداردهای اجباری برای سازندگان خودرو، بهبود عملکرد و ایمنی خودروها در برابر

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۳۱۳۳۶۶۳۳۱؛ فکس: ۰۲۳۱۳۳۵۴۱۲۲

آدرس پست الکترونیک: hoseinhemmatian@gmail.com

در اینگونه تصادفات جذب کرده و از صدمه دیدن قسمت‌های دیگر خودرو جلوگیری کند [۳].

در سال‌های اخیر سپرهای کامپوزیتی با استفاده از مدل المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [۱۲]. همچنین طراحی و تحلیل سپر کامپوزیتی خودرو برای بررسی کاهش انرژی [۱۳] و افزایش استحکام و کاهش وزن در برخورد سرعت پایین مورد بررسی قرار گرفته‌است [۱۴]. داوودی^۱ و همکارانش نیز از کامپوزیت امتزاجی اپوکسی-کنف/شیشه برای افزایش کارایی تیر سپر استفاده کرده‌اند [۱۵] و همچنین مروری بر روند توسعه و پیشرفت تیر سپر جدید در خودروها داشته‌اند [۱۶].

در زمینه بکارگیری سازه‌های هوشمند در سپر خودرو فعالیت‌های زیادی انجام شده ولیکن اکثر این فعالیت‌ها به شکل عملی و آزمایش ایده‌های جدید طراحی از سوی شرکت‌های خودروسازی صورت می‌گیرد. با این حال در زمینه تحلیل و شبیه سازی کامپیوتری مکانیزم‌های هوشمند در قسمت اتصالات تیر سپر فعالیت زیادی انجام نشده است. از فعالیت‌هایی که در زمینه شبیه‌سازی سازه‌های هوشمند در سپر انجام شده‌است می‌توان به مطالعه انجام شده توسط الماراکبی^۲ و همکارانش [۱۷] اشاره کرد. در مطالعه آنها برخورد یک خودرو با سپر هوشمند با یک مدل ریاضی شبیه‌سازی شده است. منحنی نیرو-جابجایی برای بیان رفتار سفتی سازه و منحنی نیرو-سرعت برای بیان رفتار میرایی سازه به منظور تحلیل سازه هوشمند مورد بررسی قرار گرفته‌است. آنالیز برخورد و استخراج کامل مدل‌های ریاضی برخورد خودرو مرکب از جرم‌ها، فنرها و دمپرهای غیرخطی تکه‌ای نیز توسط الماراکبی و زو^۳ انجام شده‌است [۱۸]. علاوه‌براین الماراکبی و همکارانش به تحلیل ترک بین لایه‌های در مواد مرکب تحت بارهای شبه استاتیکی و دینامیکی پرداخته‌اند [۱۹-۲۱].

تیر سپر اصلی‌ترین جزء سازه سپر می‌باشد که در پشت پوسته سپر قرار داشته و در معرض دید نمی‌باشد. در حقیقت این عضو از سیستم سپر، محافظ اصلی خودرو در برخوردها می‌باشد که باید طراحی و تولید بهینه و مناسب آن به منظور

مچاله شونده جلو و عقب، سپرهای جاذب انرژی، ستون فرمان‌های جاذب انرژی چند مرحله‌ای، سیستم محافظ در تصادفات جانبی و فناوری‌های جدید دیگر شده‌اند [۲]. بسیاری از این تصادفات در نتیجه برخورد خودرو به یک مانع یا یک خودروی دیگر از جلو و عقب رخ می‌دهد، بنابراین سیستم سپر خودرو باید قادر باشد انرژی برخورد را در اینگونه تصادفات جذب کرده و از صدمه دیدن قسمت‌های دیگر خودرو جلوگیری کند، که این امر مستلزم در نظر گرفتن تمهیداتی خاص در طراحی سیستم سپر است [۳]. با توجه به نازک کردن ورق‌های بدنه خودروهای جدید برای سبک شدن بدنه و در نتیجه کاهش مصرف سوخت، بررسی ایمنی سرنشین در برخورد طولی، اهمیت بیشتری یافته‌است. فرآیند مدل‌سازی و تحلیل رفتار خودرو در برخورد طولی، بر پایه الگوریتم‌های گوناگونی امکان پذیر است [۴].

بررسی رفتار برخورد خودرو از طریق آزمون، هزینه‌های زیادی در پی دارد. استفاده از روش‌های محاسباتی، به صرفه بوده و اعمال تغییرات طراحی لازم در آنها ساده‌تر است. در این رابطه نرم‌افزارهایی وجود دارند که به کمک آنها تحلیل برخورد با در نظر گرفتن انواع تغییر شکل پلاستیک اجزا، امکان پذیر است [۵-۷]. با توجه به اینکه اکثر اجزایی که در برخورد طولی نقش دارند، به فرم ورق یا پوسته با مقطع استوانه‌ای یا چهارگوش بوده و ضربه در امتداد طولی آنها رخ می‌دهد، تحلیل‌ها و آزمایش‌های انجام شده در زمینه برخورد اغلب برای این اجزا انجام گرفته‌است [۸-۱۱].

سپر خودروهای سواری نوعاً در ایمنی جانی سرنشین و محافظت از کابین سرنشین تأثیر چندانی ندارند و وظیفه اصلی آنها محافظت قسمت‌هایی از خودرو مانند کاپوت جلو، صندوق عقب، پنجره مشبک جلوی خودرو، مخزن سوخت، سیستم اگزوز، سیستم خنک کننده، چراغ‌های کوچک عقب و جلو و چراغ‌های بزرگ جلو می‌باشد که البته سلامت بعضی از این قسمت‌ها مستقیماً به ایمنی خودرو مربوط می‌شود [۱۱]. سپر خودرو یکی از اجزاء مستقل سازه خودرو است که از جنس فولاد، آلومینیوم، و یا پلاستیک‌های تقویت‌شده ساخته شده و در قسمت جلو و عقب خودرو نصب می‌گردد. وقتی تصادفی رخ می‌دهد، سیستم سپر ضربه ناشی از برخورد را جذب می‌کند تا از صدمه رسیدن به خودرو جلوگیری کند. بنابراین سیستم سپر خودرو باید قادر باشد انرژی برخورد را

¹ Davoodi

² Elmarakbi

³ Zu

حسگر^۸ و عمل‌کننده^۹ می‌باشند، در حالی که سیستم‌های هوشمند غیرفعال فاقد این تجهیزات بوده و در ساختار آنها از موادی که رفتار هوشمند دارند و یا سازه‌هایی که رفتار هوشمند یا قابلیت تطابق پذیری^{۱۰} دارند، استفاده می‌شود. سیستم‌های هوشمند فعال عموماً یا برای جلوگیری از وقوع تصادف و اعلام هشدار بکار می‌روند و یا اینکه با تشخیص وضعیت تصادف به وسیله حسگرهای راداری، سیستم سپر را برای محافظت از سازه خودرو و بخصوص کابین سرنشین مسلح می‌کنند. بعضی از سیستم‌های هوشمند فعال حتی قادرند با تشخیص پارامترهای اولیه تصادف مانند سرعت در لحظه تصادف، نوع مانع مورد برخورد و میزان همپوشانی برخورد، رفتار سازه سپر را برای بهترین عملکرد و دستیابی به ایمنی بیشتر تغییر دهند. عموماً سیستم‌های هوشمند فعال برای تصادفات با سرعت‌های بالا و جلوگیری و کاهش نفوذ تصادف به کابین سرنشین بکار می‌رود. یکی از پارامترهای مهمی که در سیستم‌های هوشمند در تصادفات با سرعت‌های بالا به منظور بهینه‌کردن آن بکار گرفته شده‌است، پالس شتاب منفی^{۱۱} می‌باشد. مفهوم این پارامتر نرخ کاهش سرعت برخورد در واحد زمان پس از وقوع برخورد است.

هرچه مقدار این پارامتر بیشتر باشد به این معناست که خودرو در زمان کمتری پس از برخورد متوقف می‌شود، در نتیجه شتابی که به سرنشین منتقل می‌گردد، بیشتر خواهد بود و در واقع سرنشین با جهش بیشتری به جلو پرتاب می‌شود. با وجود اینکه تمهیداتی مانند کمربند ایمنی و کیسه هوا در کابین سرنشین پیش‌بینی شده‌است ولی باز هم بالا بودن این پارامتر ممکن است فشار زیادی به گردن و ستون فقرات سرنشین خودرو وارد کند. برای مثال یک نمونه از خوردوهای تولید شده که سیستم هوشمند آن با هدف بهینه‌سازی پارامتر مذکور طراحی شده‌است، دارای دو سیلندر عمل‌کننده است که تیر سپر را به شاسی متصل می‌کنند. این دو سیلندر با دریافت سیگنال خاصی از حسگر پیشگویی تصادف، قادرند به سرعت افزایش طول داده و تیر سپر را جلوتر آورند، در نتیجه طول قابل تغییر شکل سپر

دستیابی به رفتار ضربه مناسب در نظر گرفته‌شود [۲۲] و [۲۳]. تیر سپر یک سازه کلیدی در جذب انرژی جنبشی در یک برخورد ضربه بالا و فراهم‌آوردن سفتی خمشی در برخورد ضربه پایین است [۲۴ و ۲۵]. همبلی^۱ و همکارانش [۲۶] بکارگیری برنامه‌ریزی سلسله مراتبی^۲ (AHP) را در انتخاب تیر سپر در طول مرحله طراحی مفهومی از توسعه تولید، بررسی کردند. مرزبان‌نژاد و همکارانش [۲۷] به بررسی بهبود مقاومت برخورد تیر سپر با استفاده از تحلیل ماده، ضخامت و شکل تیر سپر و همچنین پارامترهای شرایط ضربه پرداخته‌اند. آنها نشان دادند که تیر سپر کامپوزیتی تزریقی ورقه‌ای^۳ (SMC) اصلاح شده نسبت به سپر کامپوزیتی GMT^۴ (پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه) تقویت‌شده با پشت بند برتری دارد و دارای این پتانسیل است که انحراف تیر سپر، نیروی ضربه و توزیع تنش را مینیمم و انرژی کرنشی الاستیک را ماکزیمم کند، در حالیکه تقریباً جذب انرژی مشابهی با تیر سپر SMC تقویت‌نشده ارائه می‌دهد. پارک^۵ و همکارانش نیز سطح مقطع بهینه تیر سپر را برای افزایش کارایی آن در تست ضربه ارائه‌دادند [۲۸].

در این مقاله با بکارگیری رفتارهای مکانیکی مختلف از جمله یک رفتار هوشمند دوخطی در ناحیه اتصالات سپر به خودرو، برخورد سپر خودروی سمنند در محیط نرم افزار LS-DYNA-V970 شبیه‌سازی و تحلیل شده‌است تا بهترین رفتار برای بهبود عملکرد سپر شناسایی شود.

۲- سیستم‌های هوشمند

اساساً دو نوع مکانیزم هوشمند در سیستم سپر خودروهای سواری بکار می‌رود که عبارتند از مکانیزم فعال^۶ و مکانیزم غیر فعال^۷.

۲-۱- سیستم هوشمند فعال

در مکانیزم‌های هوشمند فعال معمولاً از سیستم‌های الکترومکانیکی استفاده می‌شود، یعنی این سیستم‌ها دارای

^۱ Hambali

^۲ Analytical hierarchy process

^۳ Sheet molding compound

^۴ Glass mat thermoplastic

^۵ Park

^۶ Active

^۷ Passive

^۸ Sensor

^۹ Actuator

^{۱۰} Adaptively

^{۱۱} Deceleration Pulse

سازه، رفتار دینامیکی سازه تغییر کند، یا اینکه سازه سپر در برخورد با سرعت‌های مختلف، رفتارهای مختلفی نیز از خود بروز دهد. اساساً رفتار این گونه سیستم‌ها با منحنی نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت نمایش داده می‌شود. در منحنی نیرو-جابجایی، شیب خط منحنی در حقیقت سفتی سازه را بیان می‌کند و در منحنی نیرو-سرعت، شیب خط، ضریب دمپینگ یا میرایی سازه می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده، کلیه رفتارهای غیرخطی از پیش تعیین شده برای یک سازه، باعث عملکرد هوشمند و قدرت تطابق‌پذیری سازه خواهند شد. دلیل استفاده از این مکانیزم‌ها در قسمت اتصالات سپر این است که افزایش تنش‌های پلاستیک در تیر سپر، در برخوردهایی که تنش ایجاد شده در اثر نیروی ضربه از حد تنش تسلیم آن بیشتر می‌شود، باعث واماندگی تیر شده که در نتیجه جذب میزان کمتری از انرژی را در پی خواهد داشت. بنابراین استفاده از این مکانیزم‌ها باعث خواهد شد، اتصالات سپر در برخوردهای مختلف، صلبیت یا انعطاف متفاوتی از خود نشان دهند.

۳- شبیه‌سازی آزمون ضربه

از آنجا که مقاوت ضربه مناسب هدف اصلی سپر است [۳۰ و ۳۱]، در این مقاله تلاش شده تا با بررسی رفتارهای مختلفی که می‌توان برای اتصالات سپر به خودرو در نظر گرفت، رفتار مناسبی برای بهبود عملکرد سیستم سپر در برخوردهای با سرعت پایین شناسایی شود. منظور از بهبود عملکرد سیستم سپر این است که نیرو و انرژی منتقل شده از سپر به بدنه خودرو کاهش یافته و تیر سپر تا حد امکان وامانده نشود. به عبارت دیگر انرژی داخلی جذب شده توسط سپر کاهش یابد و تنش‌های پلاستیک ایجاد شده در سپر حداقل گردد.

بدین منظور تیر سپر خودروی سواری سمنند مدلسازی شده و برخورد آن مطابق شرایط برخورد از روبرو در استاندارد اروپایی تأیید تجهیزات محافظتی عقب و جلوی خودروها (آیین نامه ECE042) با در نظر گرفتن چندین رفتار مختلف برای اتصالات شبیه‌سازی شده و پاسخ‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

بر اساس شرایط استاندارد ECE042، برای آزمون ضربه از روبرو، خودرو مورد اصابت ضربه‌زن استاندارد با سرعت 4 Km/h قرار می‌گیرد. ابعاد هندسی و جنس ضربه زن در

افزایش یافته و انرژی جنبشی برخورد صرف تغییرشکل پلاستیک سازه جلوی خودرو شده و نیرو و انرژی بسیار کمی به سرنشین منتقل می‌شود [۲۹].

از دیگر کاربردهای سیستم‌های هوشمند فعال، افزایش ایمنی برخورد برای عابر پیاده است، به همین منظور در برخی از خودروهای پیشرفته حسگر تشخیص برخورد با عابر پیاده تعبیه شده‌است، که با تشخیص وضعیت برخورد با عابر پیاده سیستم ایمنی را فعال می‌کند. در برخی از خودروها این سیستم ایمنی با باز کردن کاپوت خودرو و بالا آوردن آن از برخورد سر عابر پیاده با قسمت‌های محکم جلوی خودرو جلوگیری می‌کند. در برخی از خودروهای دیگر کاپوت جلو، سازه‌ای نرم و شکل‌پذیر است و برخورد سر عابر با آن خطر چندانی ندارد ولیکن تجهیزات مربوط به موتور خودرو که در زیر کاپوت قرار دارند سخت و محکم هستند، به همین دلیل در آنها کیسه هوای مخصوصی زیر کاپوت خودرو تعبیه شده‌است که در لحظه برخورد با عابر عمل کرده و از برخورد سر با تجهیزات سخت زیر کاپوت جلوگیری می‌کند.

۲-۲- سیستم هوشمند غیرفعال

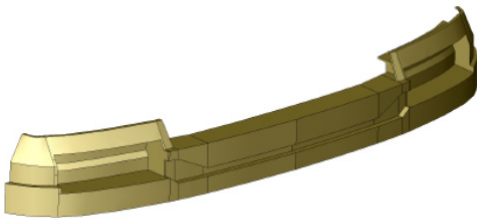
در سیستم‌های هوشمند غیرفعال عموماً از مصالحی که خواص هوشمندی یا تطابق‌پذیری^۱ دارند یا از سازه‌هایی که دارای چنین خصوصیتی هستند استفاده می‌شود. سیستم‌های هوشمند غیرفعال که در سپر خودروها بکار می‌روند، حسگر جداگانه‌ای نداشته و پیش از برخورد هیچ عملکردی بر روی سیستم سپر ندارند بلکه پس از برخورد عمل می‌کنند. این سیستم در حقیقت با تغییر رفتار خود در شرایط خاصی که طراح برای آن در نظر می‌گیرد، عملکرد سپر را بهبود بخشیده و ایمنی برخورد را افزایش می‌دهد. این تغییر رفتار ممکن است در یک مرحله یا مراحل بیشتر و یا بصورت پیوسته رخ دهد که به شرایط خاص سازه سپر و طراح بستگی دارد. عاملی که بعنوان تغییردهنده رفتار این سیستم در نظر گرفته می‌شود ممکن است مقدار جابجایی سازه، نیروی اعمال شده به سازه و یا سرعت برخورد باشد. به این ترتیب که طراح می‌تواند سیستم هوشمند را بگونه‌ای طراحی کند که پس از میزان معینی تغییرشکل و یا جابجایی

¹ Adaptively

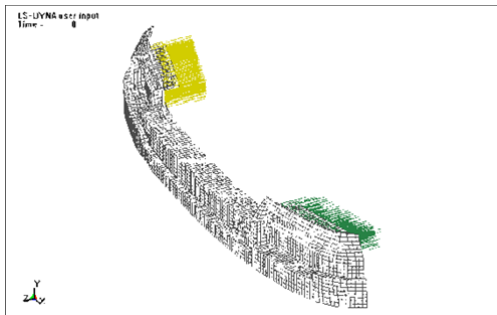
شکل ۳ استفاده از فنرهای غیرخطی بعنوان اتصالات تیر سپر به خودرو نشان داده شده‌است.



شکل ۱- مدل تیر سپر خودروی سمند



شکل ۲- مدل تیر سپر پس از حذف انحنا و شاخک‌ها



شکل ۳- فنرهای غیرخطی بعنوان اتصالات تیر سپر

روش حل با توجه به ماهیت غیرخطی برخورد، روش آنالیز دینامیکی صریح می‌باشد که روشی مناسب برای حل مسائل کوتاه زمان^۴ و همچنین مسائل پیچیده برخورد و ضربه است. با توجه به اینکه ضخامت مقطع تیر سپر در

استاندارد مربوطه توصیف شده‌است و وزن آن برابر با خودروی بدون سرنشین می‌باشد. منظور از «وزن بدون سرنشین» در این استاندارد، وزن وسیله نقلیه در حالت عملی آن بدون مسافر اما شامل سوخت، خنک‌کننده، روانساز، ابزار و چرخ یدکی می‌باشد [۳۲].

برای بررسی عملکرد سپر، پارامترهایی از جمله حداکثر نیروی برخورد بین سپر و ضربه زن، حداکثر انرژی درونی تیر سپر و نیروی منتقل شده به خودرو (محل نصب سپر به خودرو) بررسی و مقایسه شده‌اند.

۳-۱- مشخصات مدل

با استخراج ابعاد دقیق هندسی از نقشه‌های مربوطه، تلاش شده‌است تا حد امکان مدل بصورت دقیق و شبیه نمونه واقعی مدلسازی شود (شکل ۱). تیر سپر خودروی مورد نظر از جنس کامپوزیت GMT می‌باشد. شکل مقطع تیر سپر در قسمت‌های مختلف آن دقیقاً مطابق نمونه واقعی و ضخامت متوسط آن ۵ میلی‌متر است. به منظور ساده‌سازی در تعداد المان‌ها، مطابق شکل ۲، شاخک‌های تیر از مدل حذف شده و لبه‌های مدل از حالت انحنا^۱ خارج شده‌است.

همانطور که بیان شد، رفتار مکانیکی سازه‌های هوشمند توسط منحنی نیرو-جابجایی برای نشان دادن رفتار سفتی سازه و توسط منحنی نیرو-سرعت برای نشان دادن رفتار میرایی سازه معین می‌شود. از آنجا که سرعت برخورد پایین ($1/1 m/s$) می‌باشد، اساساً نمی‌توان تأثیر عمده‌ای برای ضریب میرایی سیستم در نظر گرفت و عامل مؤثر در رفتار سازه در این سرعت‌ها، سفتی سازه است.

بنابراین به منظور اعمال رفتارهای مختلف در قسمت اتصالات سپر و به منظور بدست آوردن توزیع نیروی یکنواخت بر روی سطح سپر در هر گره^۲، در صفحه اتصال تیر به خودرو، یک فنر غیرخطی جایگزین شده‌است. در کل اتصالات تیر به خودرو توسط ۲۸۰ المان فنر از نوع غیرخطی منفک الاستیک^۳ شبیه‌سازی شده‌است. برای اعمال جرم خودرو از جرم‌های متمرکز استفاده شده‌است که این جرم به تعداد فنرها تقسیم و در انتهای هر فنر اعمال شده‌است. در

^۱ Fillet

^۲ Node

^۳ Discrete-nonlinear-elastic

^۴ Shorttime

مقایسه با ابعاد سازه بسیار کم می‌باشد، در المان‌بندی مدل از المان پوسته^۱ استفاده شده‌است. مش‌بندی در تحلیل صریح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تا حد امکان در تحلیل‌های صریح باید از مش‌بندی به صورت آزاد^۲ خودداری شود، زیرا در این حالت اختلاف طول المان‌های موجود در مش زیاد خواهد بود. طول المان باید در مش‌بندی شدیداً تحت کنترل باشد و تا آن جایی که امکان دارد باید از مش‌بندی به صورت منظم یا دستی^۳ استفاده شود. نوع و تعداد هریک از المان‌های استفاده‌شده در جدول ۱ آورده شده‌است.

۱- نوع و تعداد المان‌های به کار رفته در تحلیل

عضو	جنس	نوع المان	تعداد المان
سپر	GMT	Shell	۵۵۸۶
ضربه‌زن	فولاد	Solid	۹۵۳۰
تکیه‌گاه‌ها	فنر	Discrete-nonlinear-elastic	۲۸۰
جرم خودرو	جرم متمرکز	Mass	۲۸۰

نوع تماس بین ضربه‌زن و سپر از نوع تماس خودکار سطح به سطح^۴ تعریف شده‌است، در این نوع تماس فشار می‌تواند اعمال شود اما کشش نمی‌تواند اعمال گردد و دو سطح می‌توانند از یکدیگر جدا شوند. ضریب اصطکاک در تماس بین این دو بخش ۰/۰۲ در نظر گرفته شده‌است.

۳-۲- مشخصات مصالح

وزن سپر خودرو با استفاده از ورقه‌های کامپوزیتی و فلزی با مقاومت بالا و ضخامت کم، کاهش می‌یابد [۳۳ و ۳۴]. لذا در این بررسی، جنس تیر سپر، کامپوزیت GMT در نظر گرفته شده‌است. کامپوزیت GMT، ترموپلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه است که شکل‌دهی و تولید قطعات آن از طریق قالب‌ریزی فشاری صورت می‌پذیرد.

کامپوزیت GMT در کاربردهای تجاری به ویژه در کاربردهایی که کاهش وزن یک عامل کلیدی می‌باشد، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌است. استحکام بالا، دوام زیاد،

۳-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

برای اعمال شرایط مرزی و بارگذاری مدل، از شرایط آزمون ضربه سپر در استاندارد ECE042 استفاده شده‌است. سرعت اولیه ضربه زن مطابق شرایط استاندارد ۴ Km/h می‌باشد. با توجه به شرایط استاندارد برای تست ضربه، خودرو باید بدون درگیر بودن ترمزها و در حالت دنده آزاد باشد. خودرو امکان حرکت به هر جهتی غیر از راستای عمود بر سطح را دارد ولیکن ضربه‌زن فقط در راستای برخورد حرکت می‌کند. وزن خودروی مورد نظر، بدون سرنشین ولی با سوخت، خنک‌کننده، ابزار، چرخ یدکی برابر ۱۲۰۰ kg در نظر گرفته شده‌است. این وزن همانطور که گفته شد روی گره‌های انتهایی فنرهای غیرخطی توزیع شده‌است. چیدمان آزمون ضربه در شکل ۴ نشان داده شده‌است.

۴- تحلیل و بحث

در این مرحله رفتارهای مکانیکی مختلفی برای اتصالات سپر در نظر گرفته می‌شود. رفتارهای مورد نظر به وسیله منحنی‌های نیرو-جابجایی نشان داده می‌شود. به همین منظور در ابتدا سه نوع رفتار کلی و هر کدام در دو حالت برای رفتار تکیه‌گاه‌ها در نظر گرفته شده که با فنرهای غیرخطی مدل شده‌اند و مطابق شرایط برخورد از جلوی استاندارد تحلیل می‌گردد. در ادامه رفتارهای در نظر گرفته شده و نتایج آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

¹ Shell

² Free

³ Mapped

⁴ Automatic-surface-to-surface

⁵ Piecewise Linear Isotropic Plasticity

جدول ۲- نتایج رفتار اول و دوم

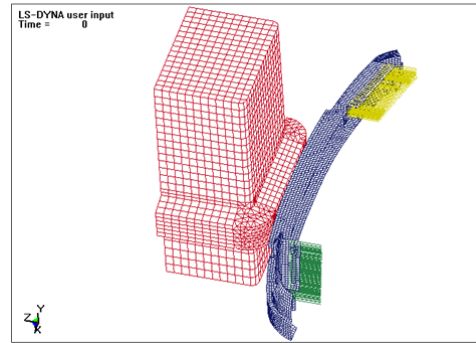
رفتار تکیه‌گاه	رفتار مدل اول	رفتار مدل دوم
ماکزیمم انرژی داخلی سپر (J)	۲۶۳/۴۲	۲۳۹/۳۷
نیروی ضربه بین سپر و ضربه‌زن (N)	۱۶۴۹۹	۱۵۸۰۳
نیروی منتقل‌شده به خودرو (N)	۱۶۴۲۲	۱۵۶۹۷

با کمتر شدن سفتی اتصالات در مدل دوم، ماکزیمم نیروی برخورد کاهش یافته‌است و در نتیجه ماکزیمم انرژی داخلی سپر و نیروی منتقل‌شده به خودرو نیز کاهش یافته‌است. البته اینکه تا چه اندازه می‌توان سفتی سازه اتصالات را کمتر در نظر گرفت به محدودیت‌های طراحی و شرایط واقعی موقعیت سپر روی خودرو بستگی دارد. باید یادآور شد که رفتار خطی سازه اتصالات بعنوان رفتار هوشمند محسوب نمی‌شود و این تحلیل برای مقایسه تأثیر سفتی اتصالات و مقایسه با رفتارهای دیگر انجام شده‌است.

۴-۲- مدل با رفتار درجه دو^۱ اتصالات

در این مرحله یک رفتار درجه دو به شکل تابع $(y = ax^2)$ در دو حالت برای اتصالات در نظر گرفته شده که منحنی رفتار آنها بصورت زیر می‌باشد. تفاوت این رفتار با دو رفتار قبلی این است که در ابتدای برخورد، سفتی سازه کمتر بوده و بطور پیوسته با افزایش نیروی برخورد سفتی سازه افزایش می‌یابد. در این دو رفتار نیز شبیه شرایطی که برای رفتارهای قبلی در نظر گرفته شده بود، در نمودار رفتار سوم در شکل ۶، در جابجایی فنرها به مقدار $۰/۰۱۵$ متر، ماکزیمم نیروی برخورد ۱۰۰۰۰ N است و این مقدار در رفتار چهارم با همان مقدار جابجایی ۷۰۰۰ N می‌باشد. به بیان دیگر، نرخ افزایش سفتی سازه در رفتار سوم بیشتر بوده و هر چه نیروی برخورد افزایش می‌یابد سفتی سازه سوم نسبت به سازه چهارم افزایش بیشتری می‌یابد. نتایج مدل‌های سوم و چهارم در جدول ۳ آورده شده‌است.

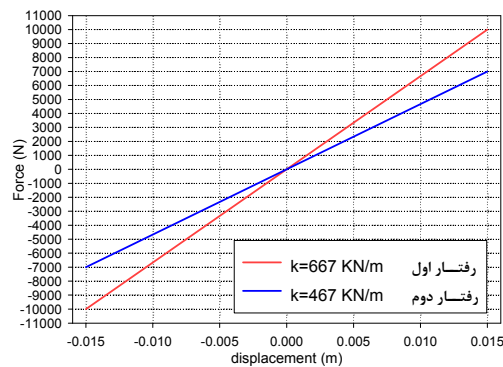
با توجه به اینکه ماکزیمم نیروی ضربه سپر در مدل چهارم کمتر از مدل سوم است می‌توان نتیجه گرفت که رفتار مدل چهارم از رفتار مدل سوم بهتر است و سفت‌تر شدن سازه در طول برخورد اثر منفی در عملکرد مورد نظر ما خواهد گذاشت. از طرفی مقایسه پاسخ این دو رفتار با رفتار



شکل ۴- چیدمان آزمون ضربه از روبروی سپر

۴-۱- مدل با رفتار خطی اتصالات

در ابتدا یک رفتار خطی $(y = ax)$ با دو شیب متفاوت برای اتصالات در نظر گرفته شده که منحنی رفتار آنها بصورت شکل ۵ می‌باشد.

شکل ۵- رفتار خطی: رفتار اول با سفتی معادل kN / m

$k=۶۶۷$ و رفتار دوم با سفتی معادل $k=۴۶۷$ kN / m

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده در رفتار اول زمانی که ماکزیمم نیروی برخورد به ۱۰۰۰۰ N می‌رسد، مقدار جابجایی سازه $۰/۰۱۵$ متر می‌باشد، به همین ترتیب در رفتار دوم زمانی که ماکزیمم نیروی برخورد به ۷۰۰۰ N می‌رسد، مقدار جابجایی سازه $۰/۰۱۵$ متر است. نتایج هر کدام از مدل‌های فوق در جدول ۲ آورده شده‌است.

^۱ Quadratic

خصوصیت این رفتار این است که در ابتدای برخورد، سازه اتصالات دارای سفتی بیشتری می‌باشد و به طور پیوسته با افزایش نیرو سفتی آن کاهش می‌یابد. برای رفتار پنجم، در جابجایی فنرها به مقدار ۰/۰۱۵ متر، ماکزیمم نیروی برخورد ۱۰۰۰۰ N است و این مقدار در رفتار ششم با همان مقدار جابجایی ۷۰۰۰ N می‌باشد. به عبارت دیگر، نرخ کاهش سفتی سازه در رفتار ششم بیشتر بوده و هر چه نیروی برخورد افزایش می‌یابد سفتی سازه ششم نسبت به سازه پنجم کاهش بیشتری می‌یابد. نتایج مدل‌های فوق در جدول ۴ آمده است.

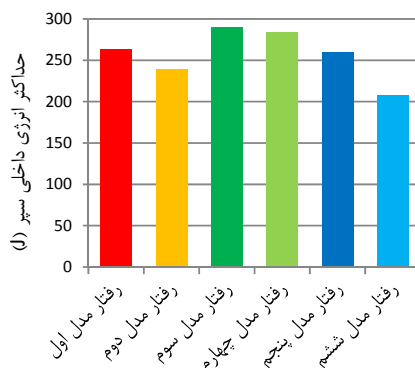
با بررسی نتایج بدست آمده از حل مدل با این رفتار و مقایسه آنها با مدل‌های قبلی مشاهده می‌شود که رفتار دینامیکی این مدل، هم نسبت به رفتار خطی و هم نسبت به رفتار درجه دو بهبود یافته است. در بررسی برخورد و عکس‌العمل سپر در این برخورد و همچنین بررسی تنش‌های پسماند در تیر سپر نیز این مسأله به روشنی مشهود می‌باشد.

جدول ۴- نتایج رفتار پنجم و ششم

رفتار مدل پنجم	رفتار مدل ششم	رفتار تکیه‌گاه
۲۰۷/۲۳	۲۵۹/۷۸	ماکزیمم انرژی داخلی سپر (J)
۱۵۱۴۹	۱۶۳۹۶	نیروی ضربه بین سپر و ضربه‌زن (N)
۱۴۷۶۰	۱۶۲۴۲	نیروی منتقل شده به خودرو (N)

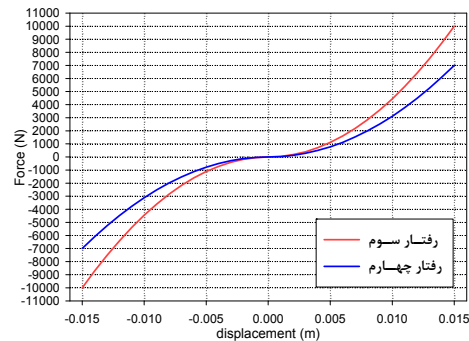
۴-۴- مقایسه رفتارهای مختلف اتصالات

در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب حداکثر انرژی داخلی سپر، نیروی ضربه بین سپر و ضربه‌زن و نیروی منتقل شده به خودرو برای رفتارهای مختلف آورده شده است.



شکل ۸- حداکثر انرژی داخلی سپر (J)

خطی اتصالات یعنی رفتار اول و دوم، نشان می‌دهد که کلیه پارامترهای محاسبه شده در رفتار خطی وضعیت بهتری دارند، لذا این رفتارها، رفتار مناسبی برای اتصالات سپر نمی‌باشد.



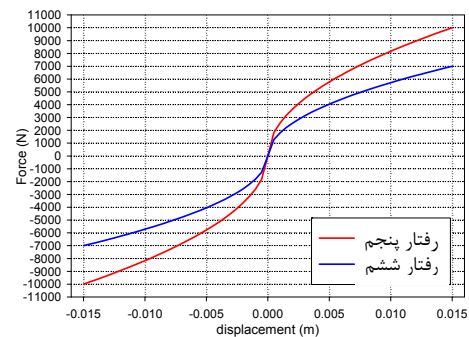
شکل ۶- رفتار درجه دو: رفتار سوم و چهارم

جدول ۳- نتایج رفتار سوم و چهارم

رفتار مدل سوم	رفتار مدل چهارم	رفتار تکیه‌گاه
۲۸۳/۳۸	۲۹۰/۱۴	ماکزیمم انرژی داخلی سپر (J)
۱۶۷۷۲	۱۷۱۱۰	نیروی ضربه بین سپر و ضربه‌زن (N)
۱۶۷۱۲	۱۷۰۶۷	نیروی منتقل شده به خودرو (N)

۴-۳- مدل با رفتار سهموی^۱ اتصالات

در این مرحله یک رفتار سهموی به شکل تابع $(y = a\sqrt{x})$ در دو حالت برای اتصالات در نظر گرفته شده که رفتار آنها بصورت شکل ۷ می‌باشد.



شکل ۷- رفتار پارابولیک: رفتار پنجم و ششم

^۱ Parabolic

جدول ۶- درصد بهبود رفتارهای چهارم و ششم نسبت به

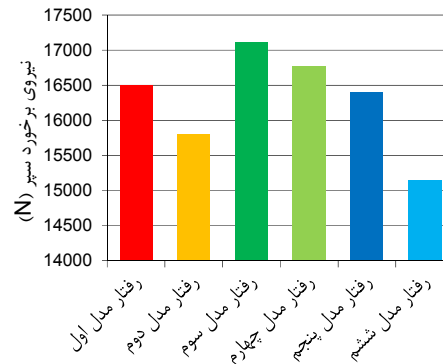
رفتار دوم		رفتار تکیه‌گاه
رفتار مدل ششم	رفتار مدل چهارم	درصد کاهش ماکزیمم انرژی داخلی سپر
۱۳/۴۳٪	۱۸/۳۹٪	درصد کاهش نیروی ضربه بین سپر و ضربه‌زن
۴/۱۴٪	۶/۱۳٪	درصد کاهش نیروی منتقل شده به خودرو
۷/۹۷٪	۶/۴۷٪	

همانطور که مشخص است، بهترین رفتاری که اتصالات به منظور بهبود عملکرد دینامیکی سیستم سپر می‌توانند داشته‌باشند، رفتاری است که در ابتدای برخورد، دارای سفتی بیشتری بوده و با افزایش نیرو پس از مقدار مشخصی از جابجایی سازه، سفتی سازه تغییر کرده و سازه نرم‌تر شود (رفتار سهموی). بنابراین چنین رفتاری برای بکارگیری در قسمت اتصالات سپر پیشنهاد می‌شود.

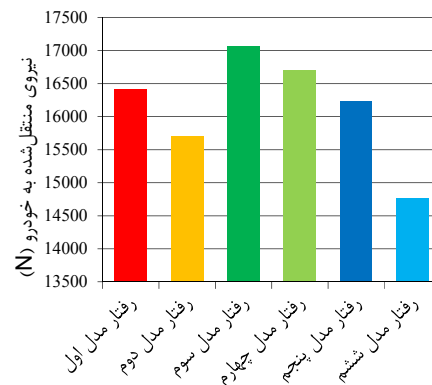
دلیل مزیت این طرح نسبت به طرح‌های دیگر این است که در برخوردهای خیلی آرام که نیروی تماس کم می‌باشد (و قطعات دچار واماندگی نمی‌گردند) سفتی فنرها زیاد می‌باشد. هرچه انرژی برخورد افزایش یابد (با افزایش جرم مانع برخورد کننده و یا با افزایش سرعت مانع برخوردکننده) سفتی فنر کاهش می‌یابد، که منجر می‌شود تحت نیروی ثابت مقدار سطح زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی فنر افزایش یابد. لذا انرژی جذب شده توسط فنرها افزایش می‌یابد و مقدار نیروی کمتری به سپر و نیز سر شاسی وارد می‌گردد. از طرف دیگر هرچه نیروی برخورد افزایش می‌یابد مقدار سفتی فنر کاهش می‌یابد، در نتیجه بستر سپر نرم‌تر می‌گردد و از نیروی ضربه کاسته می‌شود. چگونگی به دست آوردن چنین رفتاری نیاز به انجام تحقیقات دیگر و ارائه مواد یا پیشنهاد طراحی سازه‌ای جدید برای اتصالات سپر دارد.

۴-۵- تحلیل مدل با رفتار دوخطی اتصالات

به منظور بررسی یک رفتار هوشمند که به راحتی می‌توان آن را توسط مکانیزم‌های بسیار ساده تولید کرد، در این قسمت رفتار دوخطی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در رفتار دوخطی، سازه دارای دو سفتی مختلف است که در مقدار جابجایی مشخص (δ_1)، سفتی سازه تغییر می‌یابد. این رفتار را می‌توان



شکل ۹- نیروی برخورد سپر (N)

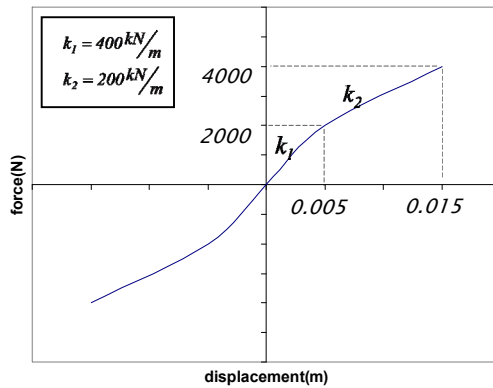
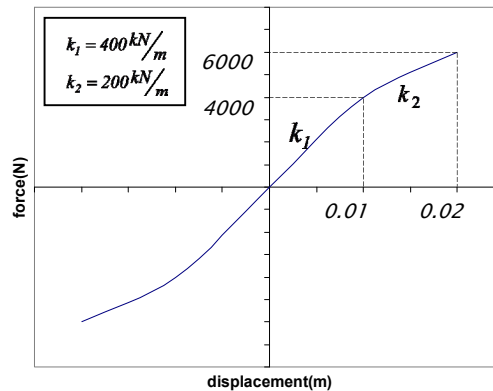
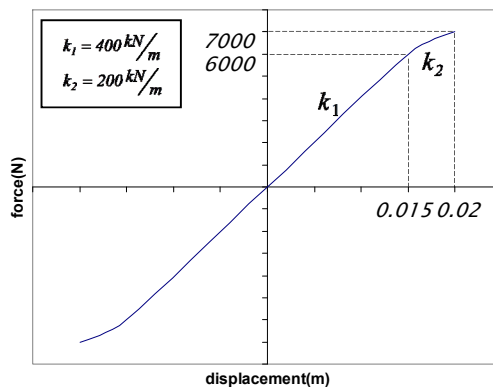


شکل ۱۰- نیروی منتقل شده به خودرو (N)

رفتارهای شماره‌های زوج و فرد به طور مجزا دارای مقادیر نهایی جابجایی و نیروی برخورد یکسان می‌باشند. در جداول ۵ و ۶ به ترتیب درصد بهبود رفتارهای فرد سوم و پنجم نسبت به رفتار اول و رفتارهای زوج چهارم و ششم نسبت به رفتار دوم آورده شده‌است. همانطور که مشخص می‌باشد رفتار مدل ششم بهترین کارایی را در ضربه دارد.

جدول ۵- درصد بهبود رفتارهای سوم و پنجم نسبت به

رفتار اول		رفتار تکیه‌گاه
رفتار مدل پنجم	رفتار مدل سوم	درصد کاهش ماکزیمم انرژی داخلی سپر
۱۳/۳۸٪	۱۰/۱۴٪	درصد کاهش نیروی ضربه بین سپر و ضربه‌زن
۰/۶۲٪	۴/۰۲٪	درصد کاهش نیروی منتقل شده به خودرو
۱/۱٪	۳/۹۳٪	

شکل ۱۱- رفتار دوخطی اول ($\delta_1 = 0.005m$)شکل ۱۲- رفتار دوخطی دوم ($\delta_1 = 0.01m$)شکل ۱۳- رفتار دوخطی سوم ($\delta_1 = 0.015m$)

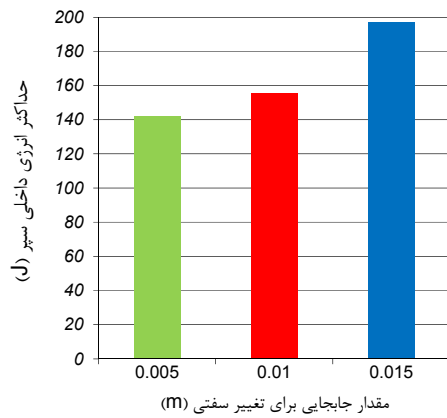
به راحتی توسط مکانیزم‌های دوفنری، سیلندرهای هیدرولیکی با منافذ عبور سیال متفاوت، سیستم‌های دارای دو لوله که از داخل پیچ شده اند و مکانیزم‌های دیگر تولید کرد.

با توجه نتایج تحلیل‌های قبلی، سفتی تکیه‌گاه در ابتدای برخورد باید بیشتر باشد و پس از مقدار جابجایی مشخص (δ_1)، کمتر گردد، لذا در این مرحله سه رفتار دوخطی با سفتی اول و دوم ثابت بعنوان یک رفتار هوشمند برای تکیه‌گاه در نظر گرفته شده و اثر مقدار جابجایی که در آن مقدار سفتی سازه باید تغییر کند مورد تحلیل قرار گرفته‌است. منحنی نیرو-جابجایی این سه حالت برای تکیه‌گاه‌ها به صورت شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ می‌باشد.

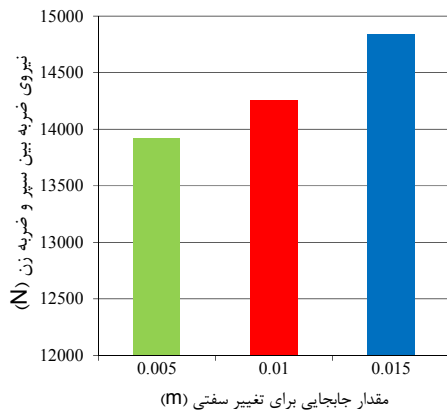
در رفتار دو خطی در نظر گرفته‌شده سفتی اولیه سازه دو برابر سفتی ثانویه سازه است. همانطوری که در منحنی‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود، سفتی اولیه سازه در هر سه حالت برابر 400 KN/m و سفتی ثانویه سازه برابر 200 KN/m می‌باشد. در رفتار دوخطی اول، سفتی سازه پس از ۵ میلی‌متر جابجایی تغییر می‌کند، در رفتار دوم این مقدار برابر ۱۰ میلی‌متر و برای رفتار سوم این مقدار ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. ضمن اینکه می‌توان مقادیر مختلفی را برای δ_1 انتخاب نمود، این مقدار نمی‌تواند خیلی کوچک باشد، زیرا اثر آن بر عملکرد سپر ناچیز می‌گردد و موجب تغییر شکل‌های زیاد می‌شود. نتایج مربوطه در جدول ۷ آمده‌است.

جدول ۷- نتایج رفتار دوخطی

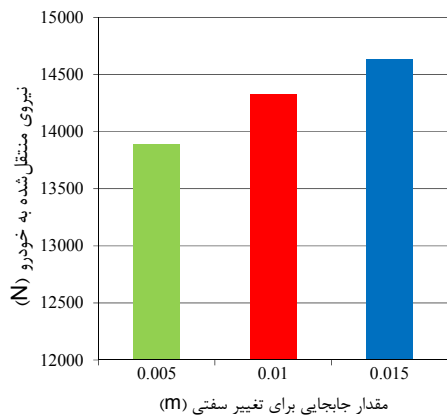
رفتار تکیه‌گاه	رفتار دوخطی اول	رفتار دوخطی دوم	رفتار دوخطی سوم
ماکزیم انرژی داخلی سپر (J)	۱۴۲/۱۳	۱۵۵/۵۸	۱۹۷/۰۲
نیروی ضربه بین سپر و ضربه‌زن (N)	۱۳۹۲۶	۱۴۲۵۸	۱۴۸۴۴
نیروی منتقل‌شده به خودرو (N)	۱۳۸۹۲	۱۴۳۲۸	۱۴۶۲۹



شکل ۱۶- ماکزیمم انرژی داخلی سپر (J)



شکل ۱۷- نیروی ضربه بین سپر و ضربه زن (N)

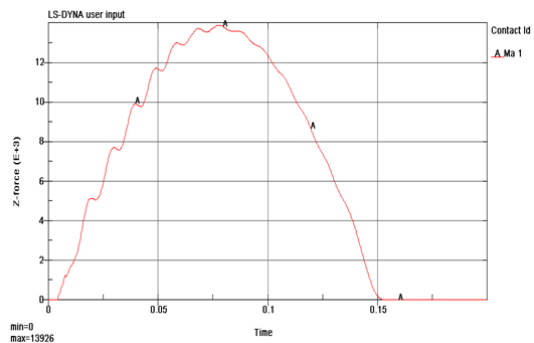


شکل ۱۸- نیروی منتقل شده به خودرو (N)

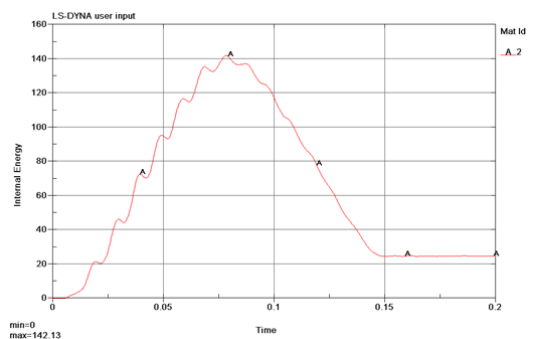
برای رفتار دوخطی اول، نمودارهای مقدار نیروی برخورد سپر و مقدار انرژی درونی تیر سپر بر حسب زمان به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده‌است.

در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ به ترتیب حداکثر انرژی داخلی سپر، نیروی ضربه بین سپر و ضربه زن و نیروی منتقل شده به خودرو برای مقادیر مختلف جابجایی که در آن سفتی تغییر می‌کند، آورده شده‌است.

با بررسی نتایج بدست آمده از حل این سه مدل دوخطی، ملاحظه می‌شود که رفتار مدل اول نتایج بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد، بنابراین بهترین رفتار اتصالات سپر رفتاری است که در ابتدای برخورد دارای سفتی بیشتری بوده و در مقدار جابجایی مشخصی، سفتی سازه کمتر شود. در بررسی مقدار جابجایی ملاحظه شد که هر چه این مقدار کمتر باشد، نتایج بهتری بدست خواهد آمد و لیکن کم بودن این مقدار نباید به اندازه‌ای باشد که باعث مقدار جابجایی بسیار زیادی در سفتی دوم گردد.



شکل ۱۴- نمودار نیروی برخورد سپر بر حسب زمان



شکل ۱۵- نمودار انرژی درونی سپر بر حسب زمان

نتیجه گرفت که مناسب ترین رفتار برای تکیه‌گاه رفتاری است که در ابتدای برخورد سفتی سازه بیشتر بوده و با افزایش نیروی برخورد سازه منعطف‌تر شده تا از واماندگی تیر سپر جلوگیری شود.

۳- با بررسی رفتار هوشمند دو خطی در تکیه‌گاه‌های سپر و بررسی میزان جابجایی که در آن مقدار سفتی سازه از $k_1 = 400 \text{ kN/m}$ به $k_2 = 200 \text{ kN/m}$ تغییر می‌یابد، ملاحظه شد که هر چه مقدار این جابجایی کمتر باشد، نتایج بهتری به دست می‌آید.

مراجع

- [1] WBCSD (2004) Meeting the challenges to sustainability (mobility 2030). Geneva: World business council for sustainable development, Report No. 2- 940240:57-4.
- [2] Marzbanrad J, Abdollahpour A (2008) Energy absorption in vehicle crashes, Mech Eng Mag 58: 11-20.
- [3] Matthew A (2004) Important Considerations in the development of a test to promote stable bumper engagement in low speed crashes, Motor Insurance Repair Research Centre
- [4] Kirkpatrick SW (2000) Development and validation of high fidelity vehicle crash simulation models, SAE Tech. Paper Series, paper No. 2000: 01-0627.
- [5] Sharpe N, Vendrig R, Houtzager K (2004) Improved design for frontal protection, MADYMO, paper No. 329.
- [6] Fang H, Rais Rohani M, Liu Z, Horsetemeyer MF (2005) A comparative study of meta modeling method for multi objective crashworthiness optimization, Comput Struct 83: 2121-36.
- [7] Zhang XY, Jin XN, Qi WG, Guo YZ (2007) Vehicle crash accident reconstruction based on the analysis 3D deformation of the auto body. Advan Eng soft 39(6): 459-65.
- [8] Abramowicz W (2003) Thin-Walled structures as impact energy absorbers. Thin Walled Struct 41: 91-107.
- [9] Karagiozova D, Jones N (2004) Dynamic buckling of elastic-plastic square tubes-II: structural response under axial impact. Int J Impact Eng 30: 167-192.
- [10] Wei ZG, Yu JL, Batra RC (2005) Dynamic buckling of thin cylindrical shells under axial impact. Int J Impact Eng 32: 575-592.

با بررسی نتایج بدست آمده از حل این سه مدل دوخطی، ملاحظه می‌شود که رفتار مدل اول نتایج بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد، بنابراین بهترین رفتار اتصالات سپر رفتاری است که در ابتدای برخورد دارای سفتی بیشتری بوده و در مقدار جابجایی مشخصی، سفتی سازه کمتر شود. در بررسی مقدار جابجایی ملاحظه شد که هر چه این مقدار کمتر باشد، نتایج بهتری بدست خواهد آمد و لیکن کم بودن این مقدار نباید به اندازه‌ای باشد که باعث مقدار جابجایی بسیار زیاد در سفتی دوم گردد.

۵- نتیجه‌گیری

به منظور شناسایی رفتار مناسب تکیه‌گاه‌های سپر، برای اعمال رفتارهای مختلف، تکیه‌گاه‌ها با فنرهای غیر خطی که می‌توان هرگونه رفتار مکانیکی را برای آنها در نظر گرفت، جایگزین شدند. سپس سه نوع رفتار مختلف شامل رفتار خطی با سفتی ثابت، رفتار با سفتی فزاینده و رفتار با سفتی کاهنده برای تکیه‌گاه‌ها در نظر گرفته شد. با استفاده از نتایج این مدل‌ها، یک رفتار هوشمند دوخطی با دو سفتی متفاوت ($k_1 = 2k_2$) برای تکیه‌گاه‌های سپر در نظر گرفته شد و در سه حالت با هدف بررسی اثر محل تغییر سفتی تکیه‌گاه، تحلیل گردید. در این مطالعه، معیار عملکرد بهتر برای سپر، کاهش نیرو و انرژی منتقل شده از سپر به بدنه خودرو و تاحد امکان عدم واماندگی تیر در نظر گرفته شده است، به عبارت دیگر انرژی داخلی جذب شده توسط سپر کاهش یابد و تنش‌های پلاستیک ایجاد شده در سپر حداقل گردد. نتایج تحلیل شامل موارد ذیل می‌باشد:

- ۱- با بررسی رفتار خطی تکیه‌گاه با سفتی ثابت مشاهده شد کم بودن سفتی و صلبیت تکیه‌گاه باعث کاهش نیروی برخورد و نیروی منتقل شده به سر شاسی خواهد شد. با مقایسه رفتار خطی با رفتار درجه دو به صورتی که سفتی تکیه‌گاه در طول برخورد به مرور افزایش یابد، رفتار خطی دارای نتایج بهتری می‌باشد.
- ۲- با مقایسه رفتار خطی و درجه دو با رفتار سهموی که در آن سفتی سازه در طول برخورد به مرور کاهش می‌یابد، رفتار سهموی از نتایج بهتری برخوردار می‌باشد. بنابراین می‌توان

- Compos Struct 32: 4919.
- [23] Reid SR, Zhou G (2000) Impact behavior of fiber-reinforced composite materials and structures, England: Woodhead Publishing.
- [24] Davoodi MM, Sapuan SM, Yunus R (2008) Conceptual design of a polymer composite automotive bumper energy absorber, Mater Des 29: 1447–52.
- [25] Zhang Z, Liu S, Tang Z (2009) Design optimization of cross-sectional configuration of rib-reinforced thin-walled beam, Thin Walled Struct 47: 868–78.
- [26] Hambali A, Sapuan S, Ismail N, Nukman Y (2009) Application of analytical hierarchy process in the design concept selection of automotive composite bumper beam during the conceptual design stage, Sci Res Essay 4: 198–211.
- [27] Marzbanrad J, Alijanpour M, Kiasat M (2009) Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes, Thin Walled Struct 47: 902–11.
- [28] Park D, Jang C, Lee S, Heo S, Yim H, Kim M (2010) Optimizing the shape of a bumper beam section considering pedestrian protection, Int J Auto Tech 11: 489–94.
- [29] Wang JT (2005) An Extendable and Retractable Bumper. 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, United States. Paper No. 05–0144
- [30] Cheon SS, Dai GL, Jeong KS (1997) Composite side-door impact beam for passenger cars, J Compos Struct 38: 229–39.
- [31] Cheon SS, Lim TS, Lee TS (1999) Impact energy absorption of glass fiber hybrid composites, J Compos Struct 46: 267–78.
- [32] Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their front and rear protective devices (BUMPERS, ETC.) available from: http://www.crash-network.com/Regulations/ECE_Regulations.
- [33] Jambor A, Beyer M (1997) New cars-new materials, Mater 18: 203–9.
- [34] Yuxuan L (2003) Automobile body light weighting research based on crashworthiness numerical simulation, Thesis (PhD), China: Shanghai Jiao Tong University.
- [35] The rate influence on mechanical properties of GMT Technical information, QUADRA- NT plastic composite site.
- [36] Klaus W (2001) LS-DYNA User's Guide
- [37] Hallquist J (2006) LS-DYNA Theory Manual
- [11] Safety Studies & Reports, National Highway Traffic Safety Administration (nhtsa), available from: <http://www.nhtsa.dot.gov/cars/problems/studies/Bumper>.
- [۱۲] شرعیات محمد، گنجی پور عباس (۱۳۸۸) بررسی برخورد از جلو یک خودرو سواری و آثار استفاده از سپر کامپوزیتی، نشریه دانشکده فنی دانشگاه خواجه نصیر ۴۳: ۵۱۱–۵۱۸
- [13] Mortazavi Moghaddam AR, Ahmadian MT (2011) Design and Analysis of an Automobile Bumper with the Capacity of Energy Release Using GMT Materials. World Academy of Science, Eng Tech 76: 837–44.
- [14] Hosseinzadeh R, Shokrieh MM, Lessard LB (2005) Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts, Compos Struct 68: 419–427.
- [15] Davoodi MM, Sapuan SM, Ahmad D, Ali A, Khalina A, Jonoobi M (2010) Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam, Mater Des 31: 4927–4932.
- [16] Davoodi MM, Sapuan SM, Aidy A, Abu Osman N A, Oshkour AA, Wan Abas WAB (2012) Development process of new bumper beam for passenger car: A review, Mater Des 40: 304–313.
- [17] Elmarakbi AM, Zu JW (2004) Dynamic Modeling and Analysis of Vehicle Smart Structures for Frontal Collision Improvement, Int J Auto Tech 5(4): 247–255.
- [18] Elmarakbi AM, Zu JW (2006) Crash analysis and modeling of two vehicles in frontal collisions using two types of smart front-end structures: an analytical approach using IHBM. Int J Crash-worthiness 11: 467–483.
- [19] Elmarakbi AM, Hu N, Fukunaga H (2009) Finite element simulation of delamination growth in composite materials using LS-DYNA. Compos Scien Tech 69 (14): 2383–2391.
- [20] Elmarakbi AM, Hu N, Fukunaga H (2007) A new rate-dependent cohesive model for simulating dynamic composite delamination. 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto 8–13 July.
- [21] Elmarakbi AM, Hu N, Fukunaga H (2008) Quasi-static and dynamic analysis of delamination growth using new interfacial decohesion elements. 6th International Conference on Engineering Computational Technology, ECT, Athens 2–5 September.
- [22] Cheon SS, Choi JH, Lee DG (1995) Development of the composite bumper beam for passenger cars. J