

بررسی عملکرد ایمن حفاظ‌های بتنی (نیوجرسی)، کابلی و گاردریل سه موج و دو موج حاشیه راه با استفاده از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود

مقاله علمی - پژوهشی

محمد صفری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مسعود پلاسی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mpalas@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۳۱۰-۲۹۳

چکیده

با توجه به نبود امکانات اجرای آزمایش‌های میدانی جهت ارزیابی عملکرد حفاظ‌های اجرا شده در کشور و نیاز محسوس در این زمینه، در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA گاردریل‌های W شکل دوجو و سه موج، حفاظ بتنی (نیوجرسی) و حفاظ کابلی نصب شده در حاشیه راه‌های کشور با تعریف مواد مناسب و مدلسازی دقیق اجزاء آن شبیه‌سازی شده‌اند و عملکرد آنها تحت شرایط آزمون ۳-۱۱ در گزارش MASH مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین با ایجاد تغییراتی در حفاظ‌های اجرا شده در ایران با توجه به موارد مشابه موجود در استاندارد AASHTO به مقایسه بین پارامترهای رفتاری خودرو و حفاظ در برخورد وسیله نقلیه منحرف شده از مسیر با آنها پرداخته شده است. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن معیارهای موجود در گزارش MASH گاردریل دوجو با پایه ناودانی مورد استفاده در کشور در بازگرداندن وسیله نقلیه به مسیر ناموفق عمل کرده است. در طرف مقابل گاردریل سه‌موج، حفاظ بتنی و کابلی و همچنین گاردریل G4(1S) اصلاح شده در ممانعت از نفوذ خودرو به محدوده پشت حفاظ و عدم حرکت آن بر روی حفاظ عملکرد قابل قبولی داشته‌اند. با استناد به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی رایانه‌ای در این مطالعه، عملکرد ناموفق گاردریل دوجو مورد استفاده در کشور در ارضای معیارهای آزمایش MASH (اصلی‌ترین معیار ارزیابی عملکرد تجهیزات ایمنی راه) که متداول‌ترین آزمایش برخورد در سرتاسر دنیا بوده و توجه به این موضوع که عملکرد موفق حفاظ در این آزمایش، معیار لازم برای استفاده از آن در بزرگراه‌های شهری (راه‌های با سرعت مجاز ۱۰۰ تا ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) می‌باشد، لزوم بازنگری و مطالعه بیشتر در این زمینه و مهم‌تر از همه انجام آزمایش‌های میدانی برخورد به عنوان اصلی‌ترین روش ارزیابی عملکرد تجهیزات ایمنی راه بیش از پیش حس می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی برخورد، اجزاء محدود، گاردریل W شکل، حفاظ بتنی، حفاظ کابلی

۱- مقدمه

میانی مسطح و بدون مانع می‌باشد. با این وجود شرایط جغرافیایی و اقتصادی اجازه‌ی فراهم آوردن شرایط ایده‌آل را برای بزرگراه‌ها نمی‌دهند و همواره وجود مواردی نظیر شیب‌های تند اطراف، اشیاء ثابت و آب انباشته شده در اطراف راه‌ها خطرات احتمالی

توسعه راه‌های با ایمنی بالا و تجهیزات ایمنی با عملکرد بهتر در برخورد وسایل نقلیه که منجر به کاهش صدمات جدی و تلفات جانی سرنشینان خودرو می‌شود، دارای منافع عمومی است. از نقطه نظر ایمنی، بزرگراه ایده‌آل بزرگراهی با نواحی کناری و

نتیجه‌ی تغییر در جزئیات ساختاری آن نیز مورد آزمایش قرار می‌گیرد. با استفاده از نتایج مدلسازی، محققان می‌توانند کمبودها و نواقص تجهیزات ایمنی موجود را شناسایی کرده و اصلاحات لازم را روی آنها انجام دهند. همچنین شبیه‌سازی رایانه‌ای امکان بهینه‌سازی تجهیزات موجود و ارائه‌ی طرح‌های جدید را فراهم می‌آورد. البته باید به این مسئله توجه داشت که کدهای پیچیده‌ی اجزاء محدود و وجود رایانه‌های پیشرفته نمی‌تواند کاملاً جایگزین آزمایش‌های میدانی که همواره برای مقاصد اعتبارسنجی لازم هستند، شوند بلکه شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌تواند تعداد آزمایش‌های میدانی لازم را کاهش داده تا بدین‌وسیله از هزینه کلی پروژه تا مقدار قابل توجهی کاسته شود.

بطور کلی افزایش ایمنی و بهبود وضعیت عملکرد حفاظ‌های نصب شده در سطح راه‌ها، نیازمند شناخت دقیق از رفتار و سطح عملکرد حفاظ‌های موجود می‌باشد. در کشور ما با توجه به کمبود امکانات و هزینه بالای مدلسازی فیزیکی و انجام آزمایش‌های میدانی، لزوم استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به منظور تحلیل عملکرد حفاظ‌های اجرا شده در هنگام برخورد با وسایل نقلیه منحرف شده از سطح مسیر کاملاً محسوس است. با توجه به نیاز موجود در این بخش، در مطالعه پیش رو گاردریل‌های دوموج و سه‌موج، حفاظ بتنی و حفاظ کابلی اجرا شده در راه‌های کشور با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود LS-DYNA که قدرتمندترین برنامه تحلیلی در ارزیابی برخورد بین وسیله نقلیه و حفاظ‌های حاشیه راه می‌باشد و با تعریف مواد مناسب و مدلسازی دقیق اجزاء آن شبیه‌سازی شده‌اند و عملکرد آنها تحت شرایط آزمون MASH (برخورد وانت پیکاپ ۲۰۰۰ کیلوگرم با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و در زاویه برخورد ۲۵ درجه) مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته است و پارامترهای رفتاری حفاظ و وسیله نقلیه نظیر میزان انعطاف افقی حفاظ و یا میزان کاهش سرعت وسیله نقلیه و میزان دوران آن در برخورد با انواع حفاظ‌های مدلسازی شده و با مدنظر قرار دادن معیارهای مندرج در گزارش MASH مورد مقایسه قرار گرفته است.

همچنین با اعمال تغییراتی در ساختار حفاظ‌های موجود بر اساس نمونه‌های موجود در استاندارد AASHTO مقایسه‌ای جامع مابین مشخصات عملکردی گاردریل‌ها ارائه شده است.

هستند که ممکن است وسایل نقلیه در صورت منحرف شدن از سطح راه با آنها مواجه شوند که این موارد درجات مختلفی از خطر را برای وسیله نقلیه منحرف و سرنشینان آن به همراه می‌آورند [آیین نامه ایمنی راه‌ها، ۱۳۹۳]. برای بهبود ایمنی حاشیه راه که منظور از آن، تامین ایمنی در ناحیه خارج از سطح سواره‌رو می‌باشد و به عنوان مولفه مهمی از طراحی کل مسیر شناخته می‌شود، اغلب نصب تجهیزات مشخصی نظیر گاردریل دو موج^۱ و سه موج^۲، حفاظ بتنی^۳ و حفاظ کابلی^۴ که ورود وسایل نقلیه منحرف را به مکان‌های خطرناک محدود می‌کند، ضروری به نظر می‌رسد. در طول سالیان متمادی، سازمانهای مختلف تلاشهای متنوعی را در جهت بهبود ایمنی راه‌ها انجام داده‌اند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به ارزیابی عملکرد تجهیزات ایمنی نصب شده در راه‌ها در هنگام برخورد با وسیله نقلیه منحرف شده از مسیر (گزارش MASH^۵) اشاره کرد. اگرچه گزارشی نظیر MASH وجود راه‌های مختلفی را برای ارزیابی عملکرد حفاظ‌های ایمنی یادآور شده است، اما اجرای تست‌های میدانی برجسته‌ترین روش نشان دادن این مسئله می‌باشد و در ۶۰ سال گذشته، انجام این قبیل آزمایش‌ها قابل قبول‌ترین روش برای بررسی عملکرد و خصوصیات دینامیکی انواع تجهیزات ایمنی در راه‌ها بوده است. در این روش طراحی سخت‌افزارهای موجود در حاشیه‌ی راه‌ها نظیر گاردریل‌ها، حفاظ‌های بتنی، علائم فنی و راهنمایی و تیرهای چراغ برق تحت اثر برخورد وسایل نقلیه بصورت تجربی و از طریق فرایند تکرار شونده‌ی طراحی، ساخت، انجام آزمایش‌های مربوطه، طراحی مجدد و انجام آزمایش‌های مجدد تا رسیدن محصول به معیارهای موردنظر صورت می‌پذیرد. هزینه‌های این روش بسیار بالا بوده و علاوه بر آن محققان الزاماً کنترل کاملی بر روی جزئیات و شرایط حاکم بر برخورد ندارند. برای ارزیابی و بهبود عملکرد تجهیزات ایمنی راه‌ها، مهندسان به شبیه‌سازی تصادفات با استفاده از روش‌های پیچیده‌ی عددی مبادرت ورزیدند. هدف از بکار بردن نرم‌افزارهای اجزاء محدود افزایش قابلیت حفاظ‌های ایمنی در برخورد با وسایل نقلیه و ایمن‌تر کردن آنها می‌باشد. همچنین با کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای، میزان کاهش سرعت خودرو و توقف احتمالی، اطمینان از عدم واژگونی آن به همراه بررسی میزان آسیب وارده به سرنشینان و همچنین تغییر در عملکرد حفاظ در

۲- پیشینه تحقیق

اگرچه انجام آزمایشات میدانی برجسته‌ترین متد ارزیابی عملکرد ارزیابی تجهیزات ایمنی راه بوده است، ولی استفاده از روش‌های تحلیلی در زمینه سخت‌افزارهای نصب شده در حاشیه راه نیز روش جدیدی نیست. شاید یکی از موفق‌ترین کاربردهای روش المان محدود در زمینه تجهیزات ایمنی راه‌ها، یکی از ابتدایی‌ترین و قدیمی‌ترین آنها بوده است. در اوایل دهه ۶۰ میلادی محققان در آزمایشگاه هوانوردی کرنل^۷ مکانیک برخورد بین وسیله نقلیه و گاردریل را مورد بررسی و تجسس قرار دادند [Ray, 1997]. در سال ۱۹۹۱ FHWA^۸ پروژه‌ای برای ارائه نرم‌افزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی برخورد و مسائل نقلیه با حفاظ‌های کنار جاده تعریف کرد که در نتیجه آن، نرم‌افزار اجزاء محدود چندمنظوره‌ی غیرخطی و سه بعدی LS-DYNA معرفی شد که در مدت زمانی کم به عنوان اصلی‌ترین نرم‌افزار تحلیلی در زمینه تحلیل و بررسی عملکرد حفاظ‌ها شناخته شد و تا به امروز نیز از کاربرد فراوانی در این بحث برخوردار است. مسائل مربوط به عملکرد حفاظ‌های مختلف مانند گاردریل W شکل^۲ موج، سه موج، حفاظ بتنی و کابلی همواره مدنظر محققان عرصه تجهیزات ایمنی راه بوده است. در یکی از اولین تلاش‌ها ری^۹ سواری ۸۲۰ کیلوگرمی را در برخورد با گاردریل W شکل پایه قوی تحت شرایط آزمایش ۳-۱۰ در گزارش NCHRP350 مدل‌سازی کرد. در تحقیقی در سال ۲۰۰۲ میلادی راهنمایی کلی جهت شبیه‌سازی گاردریل به کمک روش اجزاء محدود برای بررسی عملکرد آن در هنگام برخورد ارائه شد [Atahan, 2002]. موضوع این تحقیق ارائه‌ی روندی برای شبیه‌سازی دقیق و با جزئیات کامل برخورد وانت پیکاپ به گاردریل دوموج با پایه قوی بود و در آن به سه مسئله اصلی در روند مدل‌سازی که شامل اتصال سپری به لقمه، اندرکنش دینامیکی بین پایه‌ها و خاک و مدل‌سازی شرایط مرزی گاردریل پرداخته شده است. مرکز ملی تحلیل تصادفات (NCAC)^{۱۰} نیز در گزارش‌های مختلف خود در طول سال‌های اخیر اقدام به مدل‌سازی و تحلیل گاردریل‌های مورد استفاده در سرتاسر دنیا و بررسی تاثیر تغییر پارامترهایی نظیر ارتفاع نصب گاردریل، جنس لقمه و مسائلی از این دست پرداخته است [NCAC-T-003 & NCAC-W-008].

در سال ۲۰۱۰ دانشگاه نبراسکا^{۱۱} با همکاری سازمان حمل و نقل نبراسکا گزارشی را تحت عنوان توسعه مدل اجزای محدود مواد کابل حفاظ کابلی منتشر کرد. هدف این گزارش توسعه یک مدل بهبود یافته از مواد حفاظ کابلی برای استفاده در نرم LS-DYNA بود [John, 2010].

در سال ۱۳۹۳ آرش شهابی‌کیا گاردریل‌های مختلفی (گاردریل دو موج با لقمه‌های چوبی و فولادی، گاردریل سه موج با لقمه‌های چوبی و فولادی) که در ایران استفاده می‌شود را با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود تحت آزمایش‌های ۲-۱۱ و ۳-۱۱ مدل‌سازی کرد و نحوه عملکرد ایمن این گاردریل‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد [بهنیا و شهابی‌کیا، ۱۳۹۳]. نتایج نشان داد که تمامی گاردریل‌های سه موج و همچنین گاردریل دو موج لقمه چوبی در ممانعت از نفوذ خودرو به محدوده‌ی پشت گاردریل و عدم حرکت آن بر روی سپری در حالت‌های تکیه گاه خاکی و آسفالتی موفق عمل کرده‌اند. همچنین در میان گاردریل‌های دو موج، گاردریل لقمه چوبی پایه قوی‌ترین عملکرد را داشت.

۳- معرفی حفاظ‌های شبیه‌سازی شده

بطور کلی حفاظ‌های کناری و میانی را می‌توان در سه دسته کلی حفاظ‌های انعطاف‌پذیر، حفاظ‌های نیمه‌صلب و حفاظ‌های صلب طبقه‌بندی نمود. در این مطالعه عملکرد سه نوع حفاظ گاردریل‌های W شکل (نیمه صلب و انعطاف‌پذیر)، حفاظ بتنی (صلب) و حفاظ کابلی (انعطاف‌پذیر) مورد تحلیل قرار است. با توجه به نیاز محسوس برای داشتن پایه تحلیلی و علمی برای ارزیابی عملکرد حفاظ‌های مورد استفاده در هنگام برخورد با وسائل نقلیه منحرف و با در نظر گرفتن عدم امکان انجام آزمایش‌های میدانی به بررسی حفاظ‌های در حال استفاده در خیابان‌ها و بزرگراه‌های کشور مطالع پیش‌رو انجام شده است. این قسمت از تحلیل شامل بررسی سه نوع مختلف از حفاظ‌های متداول در حاشیه راه‌ها می‌باشد که شامل گاردریل دو موج و سه موج (لقمه چوبی)، حفاظ بتنی (نیوجرسی) و حفاظ کابلی می‌باشد که مشخصات هندسی آن‌ها در جدول (۲، ۱ و ۳) گردآوری شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی حفاظ بتنی (نیوجرسی)

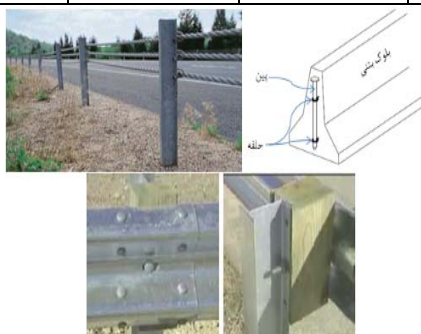
نوع گاردیل	ارتفاع (میلی متر)	طول هر بلوک (میلی متر)	نوع اتصال بلوکهای بتنی	ابعاد پین (میلی متر)	عرض کف
حفاظ بتنی (نیوجرسی)	۸۱۳	۳۰۴۸	پین و حلقه	شعاع: ۳۲ طول: ۵۸۴	۶۱۰

جدول ۲. مشخصات هندسی گاردریل دو موج و سه موج

نوع حفاظ	فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها (میلی متر)	پایه (ابعاد به میلی متر)	طول پایه (میلی متر)	لقمه (ابعاد به میلی متر)	ارتفاع گاردریل از سطح زمین (میلی متر)	میزان نفوذ پایه در خاک (میلی متر)
گاردریل ۲ موج لقمه چوبی	۱۹۵۰	ناودانی (۱۲۰×۴۰)	۱۵۰۰	چوبی (۳۶۰×۲۰۰×۹۰)	۷۵۰	۷۵۰
گاردریل ۳ موج لقمه چوبی	۲۰۰۰	ناودانی (۲۵۰×۹۰)	۲۰۰۰	چوبی (۴۵۰×۳۵۰×۱۰۰)	۹۳۰	۱۰۵۰

جدول ۳. مشخصات هندسی حفاظ کابلی

نوع حفاظ	فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها (میلی متر)	نوع پایه	طول پایه (میلی متر)	میزان نفوذ پایه در خاک (میلی متر)	ارتفاع پایین ترین کابل (میلی متر)	فاصله عمودی کابل‌ها از هم (میلی متر)
حفاظ کابلی	۵۰۰۰	شکل I	۱۶۰۰	۷۵۰	۵۳۳	۱۲۰



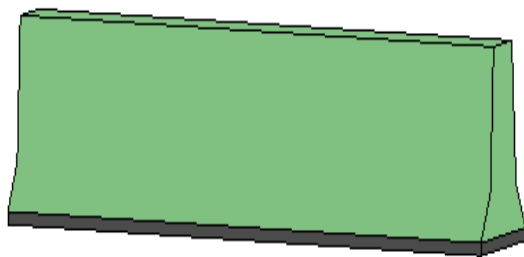
شکل ۱. اجزای حفاظهای مورد مطالعه

شکل ۱ اجزای حفاظهای بتنی و کابلی و گاردریل‌های دو موج و سه موج را نمایش می‌دهند. ضخامت ورق فولادی سپری ۳ میلی متر و ضخامت ورق مورد استفاده در ساخت پایه‌ها و لقمه‌های فولادی ۶ میلی متر است. برای اتصال دو سپری در گاردریل‌های دو موج از هشت پیچ و در گاردریل‌های سه موج از ۱۲ پیچ با قطر ۱۲ میلی متر و طول ۲۵ میلی متر استفاده شده است. برای اتصال سپری به لقمه و لقمه به پایه در گاردریل‌های دو موج و سه موج با لقمه چوبی از پیچ با قطر ۱۰ میلی متر و طول ۲۵۰ میلی متر برای نوع دو موج و با همان قطر و طول ۴۰۰ میلی متر برای نوع سه موج استفاده شده است. همچنین برای اتصال کابل به پایه در حفاظ کابلی از قلاب و مهره و برای اتصال بین بلوک‌های بتنی در حفاظ بتنی از پین و حلقه استفاده شده است.

۴- تشریح شرایط برخورد

سطح سه از آزمایش‌های MASH که متداول‌ترین آزمایش میدانی برخورد در سرتاسر دنیا می‌باشد، نیازمند انجام آزمایش بر روی سواری کوچک (۱۱۰۰c) و وانت پیکاپ (۲۲۷۰p) می‌باشد. البته شرایط آزمایش برای این دو متفاوت می‌باشد. برای

مشخصات مواد نیوجرسی: انتخاب فرمولاسیون مناسب برای اجزای مدل امری ضروری و بسیار مهم است. به طوری که به خوبی رفتار مواد را بدون احتیاج به محاسبه‌های فشرده مدلسازی کند. به همین دلیل با فرض‌هایی به ساده‌سازی و کاهش محاسبات در مدلسازی می‌پردازیم. به طور کلی بخش‌هایی را که دارای تغییر شکل بسیار کمی است و می‌توان این تغییر شکل را نادیده گرفت به صورت صلب و بخش‌هایی که متحمل تغییر شکل‌های غیرخطی بزرگ می‌شوند با مدل‌های ساختاری الاستیک-پلاستیک مدل می‌شوند. مدلسازی حفاظ بتنی پیش ساخته با توجه به شکل ۳ از دو قسمت صلب و الاستیک تشکیل شده است. قسمتی از بلوک بتنی که در تماس با زمین نیست به دلیل اینکه دارای تغییر شکل بسیار کمی است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و همچنین کم‌ترکردن زمان محاسبات به صورت صلب (ماده نوع ۲۰ در نرم‌افزار LS-DYNA) و مطابق جدول (۴) تعریف شده است. قسمت دیگر بلوک بتنی که در تماس با زمین (زمین به صورت دیوار صلب مدلسازی شده است) می‌باشد برای مدلسازی صحیح رفتار بین بلوک‌های بتنی و زمین به صورت الاستیک (ماده نوع ۱ در نرم‌افزار LS-DYNA) ولی با مشخصات مواد صلب و مطابق جدول ۴ مدل شده است. همچنین ضریب اصطکاک بین بلوک‌های بتنی و زمین با توجه به نتایج تحقیقات مرزوقی و همکاران به صورت ایزوتروپیک (ضریب اصطکاک در تمام جهتها برابر است) و مقدار ۰٫۲ قرار داده شده است. لازم به ذکر است برای فرضیات در نظر گرفته شده در مدلسازی بلوک‌های بتنی از منابع معتبر استفاده شده است [Marzougui et al., 2000].



شکل ۳. مدل بلوک بتنی

انجام آزمایش با سواری کوچک و وانت پیکاپ ۲۲۷۰ کیلوگرمی، سرعت برخورد ۱۰۰ کیلومتر بوده که با زاویه ۲۵ درجه با حفاظ برخورد می‌کند. با توجه به مسائلی نظیر مرکز جرم بالاتر و قرارگیری سپر وانت در ارتفاع بالاتر، آزمایش برخورد با وانت پیکاپ بسیار شدیدتر از آزمایش تحت برخورد با سواری می‌باشد. حفاظ‌های مدل شده در این مطالعه تحت اثر برخورد با وانت پیکاپ قرار می‌گیرند، زیرا با بدست آوردن معیارهای لازم برای عملکرد موفق در برخورد با این وسیله نقلیه، در برخورد با سواری کوچک که از شدت کمتری نیز برخوردار است، به احتمال قریب به یقین عملکرد قابل قبولی خواهند داشت.

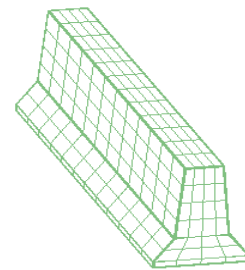
۵- شبیه‌سازی رایانه‌ای

مدل اجزاء محدود حفاظ بتنی و گاردریل‌های W شکل مورد تحلیل در این مطالعه شامل مدلسازی جزئی‌نگرانه‌ی تمامی مولفه‌های حفاظ‌های مورد تحلیل بوده و طراحی تک تک مولفه‌های حفاظ با استفاده از نقشه‌های دقیق و با بهره بردن از نرم‌افزار Hypermesh که از قوی‌ترین نرم‌افزارهای طراحی و شبکه‌بندی می‌باشد انجام پذیرفته است.

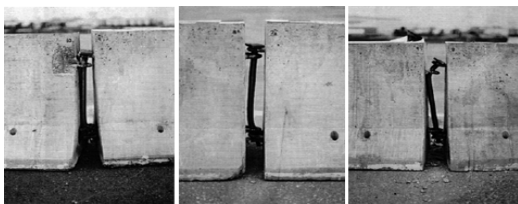
۵-۱- مدلسازی حفاظ بتنی (نیوجرسی)

۵-۱-۱- مدلسازی بلوک بتنی

هندسه مدل: مقطع نیوجرسی در این مطالعه با استفاده از هندسه نشان داده شده در شکل ۲ با عرض کف ۶۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۸۱۳ میلی‌متر مدلسازی شده است. طول هر قطعه ۳۰۴۸ میلی‌متر می‌باشد که در طرفین هر قطعه دو حلقه برای اتصال به قطعه بعدی با پین وجود دارد. بخش‌هایی از نیوجرسی با المان پوسته‌ای Belytschko-Tsay دوبعدی با ۴ گره و بخش‌های دیگر با المان‌های سه بعدی با ۸ گره مدلسازی شده است.



شکل ۲. مدل اجزای محدود بلوک بتنی



شکل ۴. تغییر شکل ماندگار و غیرخطی اتصال پین و حلقه

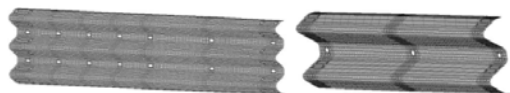
جدول ۵. مشخصات مکانیکی مدل اجزای محدود پین و حلقه

چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول یانگ (مگاپاسکال)			ضریب پواسن		تنش تسلیم (مگاپاسکال)	
۷۸۹۰	۲۰۰۰۰۰			۰/۳		۲۹۸	
کرنش پلاستیک	۰/۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۳۲	۰/۶۴
تنش (مگاپاسکال)	۲۹۸	۳۴۰	۳۷۰	۴۱۵	۴۸۰	۵۷۵	۸۱۰

۵-۲-۵- مدلسازی گاردریل و اجزای آن

۵-۲-۱- مدلسازی سپری W شکل و اتصال آنها

مقطع ریل دوموج وسه موج با استفاده از هندسه نشان داده در شکل ۵ و با ضخامت سه میلیمتر مدلسازی شده است. به علت ضخامت کم ورق سپری، المانهای آن بصورت دوبعدی و بصورت مجموعه‌ای از المانهای پوسته‌ای چهار گرهی تعریف شده‌است و سپس بصورت جداگانه ضخامت آن تعریف گردید. از المان پوسته‌ای (Blayshko-Tsay) به جهت بالابردن سرعت محاسبات استفاده شده است.



شکل ۵. مدل اجزای محدود سپری

برای مدل سازی ماده تشکیل دهنده ریل که فولاد ST-37 می‌باشد و با توجه به احتمال وقوع تغییر شکل‌های بزرگ خمیری و لهیدگی در برخورد وسیله نقلیه با آن از ماده نوع ۲۴ در LS-DYNA (ماده الاستو پلاستیک با فرض محدودی پلاستیک خطی تکه تکه) و با مشخصات ارائه شده در جدول ۵ استفاده

در ادامه در جدول ۴ مشخصات مکانیکی بلوک بتنی ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات مکانیکی بلوک بتنی

چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	ضریب پواسن	ضریب اصطکاک دینامیکی بین بلوک‌های بتنی و زمین
۲۴۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۲۸	۰/۲

۵-۲-۱-۵- مدلسازی اتصال بلوک‌های بتنی

برای مدلسازی اتصال بلوک‌های بتنی از المان‌های متفاوتی می‌توان استفاده کرد که هر کدام از این المان‌ها نقاط قوت و ضعف خود را برای مدل کردن دارند. با توجه به این موضوع و نتایج تحقیقات معتبر، المان صفحه‌ای که عملکرد مناسبی در الگوریتم تماس دارد و همچنین دارای بازده محاسباتی خوبی برای مدلسازی پیچ، حلقه و مهره می‌باشد استفاده شده است. از آنجا که ماده سازنده این قطعات که فولاد ST-37 می‌باشد در برخورد وسیله نقلیه با نیوجرسی همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است متحمل تغییر شکل پلاستیک بزرگ می‌شود و از محدوده کشسان از نمودار تنش-کرنش فراتر رفته و تغییر شکل‌های بزرگ ماندگار (پلاستیک) در آن ایجاد می‌شود [Marzougui et al., 2012]. به منظور در نظر گرفتن این اثرات، ماده به صورت ایزوتروپیک (دارا بودن خواص یکسان در جهات مختلف) و پلاستیک معادل با چندین خط^{۱۲} (ماده نوع ۲۴ در نرم افزار LS-DYNA) مطابق با مشخصات مندرج شده در جدول ۵ در نرم افزار LS-DYNA تعریف شده است. همچنین به دلیل امکان گسیخته شدن پین و حلقه در اثر نیروی شدید وارده به آن، معیار گسیختگی بر اساس حداکثر کرنش قابل تحمل فولاد ST-37 در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است مقادیر درج شده در جدول زیر برای تنش و کرنش پلاستیک و حد گسیختگی از منابع معتبر و نتیجه آزمایش‌هایی که مرکز آنالیز تصادفات ارائه داده است، استخراج شده است [NCAC-w-]. [001]

۳-۵- مدل سازی حفاظ کابلی

۳-۵-۱- مدل سازی کابل ها

حفاظ کابلی مورد مطالعه دارای سه کابل با قطر ۱۹ میلی متر می باشد که هر کدام از کابل ها دارای سه شاخه که به دور هم پیچیده می شوند می باشد. هر یک از این شاخه ها از رشته های فولادی ساخته شده است و دارای حداقل مقاومت کششی ۱۱۰ کیلو نیوتن می باشد که با رفتار الاستیک خود انرژی جنبشی وسیله نقلیه را جذب می کند و مانع صدمات شدید به سرنشینان وسیله نقلیه می شود. برای مدل کردن کابل ها از المان تیر استفاده شده است که به صورت ماده الاستیک (ماده نوع ۰۱ در نرم افزار LS-DYNA) برای شبیه سازی رفتار رشته های فولادی در نظر گرفته شده است و مشخصات آن مطابق جدول ۶ می باشد. لازم به ذکر است برای مدل کردن کابل ها به صورت الاستیک و مشخصات استفاده شده، از تحقیقات انجام شده در مرکز آنالیز تصادفات توسط مرزوقی و همکاران استفاده شده است [NCAC-T-001].

جدول ۶. مشخصات مکانیکی کابل ها

نسبت پواسن	مدول یانگ (مگا پاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۳	۹۰۰۰۰	۴۵۸۷

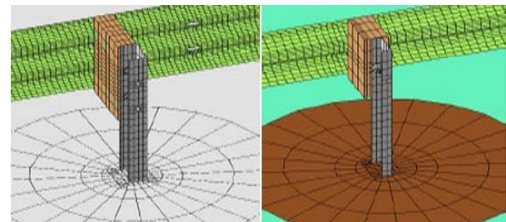
با توجه به مشخصات المان تیر در نرم افزار LS-DYNA و نتایج تحقیق های صورت گرفته، بهترین گزینه برای مدل کردن کابل ها المان تیر می باشد که دارای سرعت محاسبه مناسب با توجه به مش بندی می باشد. لازم به ذکر است که از المان تیر Hughes-Liu به دلیل اختیاری که برای آنالیز به کاربر جهت تعیین مقطع دلخواه (در اینجا لوله ای انتخاب شده است) می دهد استفاده شده است.

شده است. همچنین به دلیل امکان گسیخته شدن سپری در اثر نیروی شدید وارده به آن، معیار گسیختگی نیز بر اساس حداکثر کرنش قابل تحمل ماده ST-37 در نظر گرفته شده است.

پیچ ها و مهره های متصل کننده دو سپری در گارد ریل های دوموج و سه موج مورد تحلیل بصورت ماده صلب مدل شده است و از یک فنر با سختی معادل پیچ (با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته ماده تشکیل دهنده پیچ (فولاد ST-37)، سطح مقطع و طول پیچ) ما بین سرپیچ و مهره برای شبیه سازی سختی آن در واقعیت استفاده شده است. با این روش و با توجه به المان های بسیار کوچک پیچ گام زمانی بوسیله هندسه مقطع عرضی پیچ کنترل نمی شود و بنابراین به گام زمانی بزرگتری در شبیه سازی و زمان تحلیل کمتری توسط نرم افزار برای رسیدن به جواب مورد نیاز است [Whitworth et al., 2004].

۲-۲-۵- مدل سازی پایه، لقمه و اتصال آنها

مدلسازی پایه ها و لقمه های فولادی همانند سپری با استفاده از المان های پوسته ای چهاروجهی و مطابق شکل ۶ انجام پذیرفته است. ماده تشکیل دهنده آنها نیز همان فولاد ST-37 با مشخصات مندرج در جدول ۵ می باشد که در قسمت قبلی اشاره شد. به منظور مدلسازی لقمه های چوبی از المان جامد شش وجهی با هشت گره^{۱۳} استفاده شده است. این المانها رفتار مولفه های مدل را در زمان کمتر و با اشغال حافظه کمتری ارائه می دهند و از این رو استفاده از آنها مقرون به صرفه است [Marzougui et al., 2008]. ماده چوب بصورت کشسان (ماده نوع ۱ در LS-DYNA) و با چگالی ۶۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب مدول الاستیسیته ۸۳۳ مگا پاسکال و ضریب پواسن ۰,۳ مدل شده است. پیچ های اتصال سپری به لقمه و لقمه به پایه نیز همانند روش گفته شده در شبیه سازی پیچ های اتصال دو سپری و به منظور کاهش زمان تحلیل شبیه سازی شده است.



شکل ۶. پایه، لقمه و اتصال آنها با سپری در گارد ریل

۵-۳-۲- مدلسازی قلاب و پایه و اتصال بین آن‌ها

مدلسازی اتصال قلاب و پایه

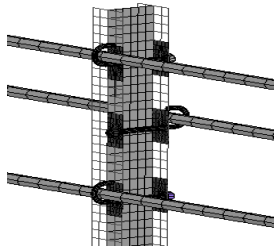
یکی از نکات بسیار مهم در مدلسازی حفاظ کابلی، اتصال پایه، قلاب و مهره می‌باشد. به این دلیل که در طول برخورد، این اتصال در خارج شدن کابل از قلاب و به دنبال آن مقاومت کابل در مقابل وسیله نقلیه تاثیر گذار است. در این اتصال برای مدلسازی قلاب از المان‌های تیر مجزا و از فنر با سختی معادل مهره، ما بین قلاب و مهره برای شبیه‌سازی سختی آن در واقعیت بهره گرفته شده است و مدلسازی پایه‌های فولادی همانند پین و حلقه در اتصال بلوک‌های بتنی با استفاده از المان‌های پوسته‌ای چهار وجهی و بر اساس فرمولاسیون پوسته‌ای Belytschko-Tsay انجام پذیرفته است. همچنین از المان پوسته‌ای با مشخصه بی‌اثر^{۱۴} برای شبیه‌سازی قلاب و قسمتی از پایه که در تماس با قلاب است استفاده شده است. این المان بر روی سختی پایه و قلاب هیچ تاثیری نداشته و اندازه آن‌ها نیز بر روی زمان تحلیل برخورد بی‌تاثیر است و صرفاً جهت مدلسازی هندسه قلاب و قسمتی از پایه که در تماس با یکدیگر قرار دارند مورد استفاده قرار گرفته است. با این روش به گام زمانی بزرگتری در شبیه‌سازی و زمان تحلیل کمتری توسط نرم افزار برای رسیدن به جواب مورد نیاز است. در شکل ۷ پایه، قلاب، کابل و اتصال بیت آنها به نمایش در آمده است.

مشخصات مواد: مواد تشکیل دهنده پایه و قلاب همانند پین و حلقه در قسمت قبل، فولاد ST-37 است که دارای مشخصات مشابه جدول ۵ می‌باشد و برای مدلسازی آن از پلاستیک معادل شده با چند خط (ماده ۲۴ در نرم افزار LS-DYNA) استفاده شده است. همچنین با استناد به مطالعات قبلی و نتایج تحقیقات مرکز آنالیز تصادفات در دانشگاه جورج واشینگتن برای شبیه‌سازی مهره‌ها از ماده صلب استفاده شده است که این فرض موجب کاهش زمان تحلیل توسط برنامه می‌شود و فرضی متداول و مورد تایید محسوب می‌گردد.

مدلسازی اتصال قلاب و کابل

از آنجایی که جابجایی زاویه‌ای وسیله نقلیه در برخورد با حفاظ کابلی به شدت تحت تاثیر برهم‌کنش کابل و قلاب می‌باشد، مدلسازی این اتصال از اهمیت خاصی برخوردار است

که در شکل ۷ مدل اجزای محدود قلاب و کابل به نمایش در آمده است. برای عملکرد مناسب تماس بین کابل و قلاب از المان پوسته‌ای با مشخصه بی‌اثر استفاده شده است. همچنین الگوریتم تماس تک صفحه‌ای اتوماتیک در نرم افزار LS-DYNA برای تماس بین المان پوسته‌ای کابل و قلاب تعریف شده است. این روش یک راهکار مناسب برای شبیه‌سازی دقیق تماس همراه با اصطکاک بین کابل و قلاب که به طور قابل توجهی کشش کابل را تحت تاثیر قرار می‌دهد می‌باشد.



شکل ۷. مدل اجزای محدود محدود حفاظ کابلی

۵-۴- مدلسازی خاک (به عنوان تکیه‌گاه پایه)

در این مطالعه از مدل المان محدود خاک (استوانه‌ای به قطر ۱،۵ متر و ارتفاع ۱،۷ متر) در زیر هر پایه که تقریباً شبیه‌ساز شرایط واقعی می‌باشد، بهره گرفته شده است. این ابعاد با روش سعی و خطا و با بررسی مطالعات قبلی به‌گونه‌ای انتخاب شده است که رفتار خاک و همچنین اندرکنش میان پایه و خاک با دقت بالا و در مدت زمانی منطقی مورد تحلیل قرار گیرد. مرزهای بیرونی هر استوانه بوسیله گزینه مرز بدون تغییر شکل به منظور ممانعت از گسترش موج تنش در مرز ثابت محدود شده‌اند. استوانه شبیه‌ساز خاک بوسیله المانهای جامد شش‌وجهی هشت گرهی مدل شده‌اند. شکل مقطع پایه در استوانه خاک با در نظر گرفتن ضخامت مناسب برای هر یک از انواع پایه به منظور ممانعت از نفوذ پایه در خاک و ارائه مدل مناسبی از اندرکنش مابین خاک و پایه مدل شده است. برای شبیه‌سازی اصطکاک و تماس میان خاک و پایه از سطح تماس لغزنده بین سطح بیرونی پایه و سطح داخلی استوانه خاک استفاده شده است [Whitworth et al., 2004]. برای مدلسازی ماده خاک نیز از ماده نوع ۵ در LS-DYNA (Soil and foam) و با چگالی ۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول برشی ۴۹،۵ مگاپاسکال

جدول ۷. مشخصات مدل اجزای محدود وسیله نقلیه

تعداد المان	تعداد گره‌ها	تعداد قسمت	جرم (کیلوگر (م	فاصله محور عقب و جلو (متر)	طول خودرو (متر)
۱۶۶۱۴	۱۷۶۱۷	۹۵	۲۲۸۰	۳/۳۴	۴/۴

۵-۶- مدل‌سازی شرایط مرزی

بر اساس تحلیل‌های انجام شده، طول گاردریل نصب شده به دو بخش مجزا قابل تقسیم است:

۱- ناحیه‌ای که به نیروی برخورد و تنش‌های ایجاد شده بر اثر برخورد وسیله نقلیه پاسخ می‌دهد و در واقع تحت تاثیر انرژی حاصل از برخورد قرار می‌گیرد. ۲- ناحیه‌ای که نیروی برخورد و تنش‌های حاصله از آن اثر ناچیزی بر روی آن می‌گذارد.

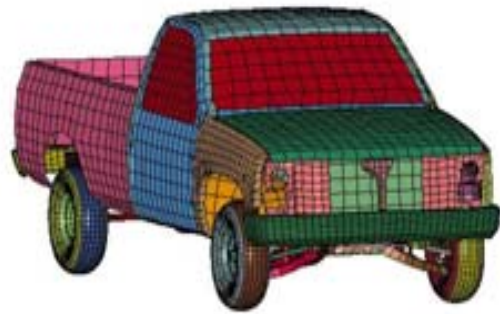
ناحیه‌ای که بصورت فعال در مقاومت در برابر نیروهای حاصل از برخورد شرکت نمی‌کند، به عنوان شرایط مرزی شناخته می‌شود. از آنجا که مدل‌سازی کل طول گاردریل نصب شده مقرون به صرفه و منطقی نمی‌باشد، وسعت بخش مورد تحلیل در این مطالعه و در واقع تعداد سپری‌های مدل شده بر اساس سه معیار بررسی‌های میدانی گاردریل بعد از وقوع تصادفات، استفاده از تجربه‌های متخصصین این امر و بررسی مطالعات گذشته تعیین شده است. با توجه به موارد ذکر شده و همچنین به دلیل تاثیر عملکرد یک سپری بر روی سپری‌های دیگر، در تمامی گاردریل‌های شبیه‌سازی شده از نه سپری استفاده شده است که از این تعداد و با هدف کاهش زمان تحلیل، پنج سپری قرار گرفته در وسط مدل با شبکه‌های ریز و سایر سپری‌ها با شبکه‌بندی درشت‌تر مدل شده‌اند.

معیارهای مورد نظر در ارزیابی عملکرد گاردریل‌های نصب شده در حاشیه راه‌ها تحت شرایط برخورد آزمایش ۳-۱۱ در گزارش MASH در جدول ۸ نشان داده شده است.

استفاده شده است. با توجه به تنوع شرایط خاک تکیه‌گاه پایه گاردریل و همچنین به منظور صحت سنجی شبیه‌سازی، مشخصات مکانیکی خاک با توجه به مطالعات قبلی NCAC انتخاب شده است.

۵-۵- مدل‌سازی وانت پیکاپ

از آنجایی که ساخت مدل وسیله نقلیه، فراتر از حیطه کاری این مطالعه می‌باشد، از مدل المان محدود ساده شده‌ی وسیله وانت پیکاپ ۲۲۸۰ کیلوگرمی موجود در پایگاه اطلاعاتی مرکز تحلیل تصادفات ملی (NCAC) استفاده شده است که در شکل ۸ نمایش داده شده است. در این مطالعه با توجه به افزایش نامعقول زمان تحلیل در صورت استفاده از مدل وانت پیکاپ با جزئیات کامل از مدل ساده شده‌ی آن که نتایجی مشابه حالت استفاده از مدل با جزئیات کامل را بدست می‌دهد، بهره گرفته شده است [Uddin & Hacket, 1999]. ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی مابین چرخ وسیله نقلیه و سطح زمین (که بصورت صلب مدل شده است) نیز برابر ۰٫۱ در نظر گرفته شده است. اطلاعات مدل اجزاء محدود وانت پیکاپ مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۷ گردآوری شده است.



شکل ۸. مدل اجزای محدود وسیله نقلیه

جدول ۸. معیارهای ارزیابی MASH

معیارهای ارزیابی	فاکتورهای ارزیابی
۱. گاردریل باید وسیله نقلیه را به خوبی در بر گرفته و هدایت کند. همچنین وسیله نقلیه نباید در حفاظ فرو رود، از روی آن جهش کند و یا به زیر آن نفوذ کند؛ اگرچه تغییر شکل جانبی کنترل شده‌ی گاردریل قابل قبول می‌باشد.	کفایت سازه‌ای
۲. احتمال نفوذ اجزاء جدا شده از سیستم گاردریل نظیر پیچ‌ها، مهره‌ها و سایر قطعات متلاشی شده در هنگام برخورد به داخل اتاق سرنشینان نباید وجود داشته باشد و همچنین این اجزاء جدا شده نباید برای جریان آمدوشد سایر وسائل نقلیه و افراد پیاده ایجاد خطر نمایند. استحکام اتاق سرنشینان خودرو و عدم وارد شدن صدمه جدی به آن در اثر نفوذ قطعات گاردریل به آن نیز مورد توجه است.	میزان خطر برای سرنشینان
۳. عدم واژگونی خودرو در هنگام برخورد و پس از آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، اگرچه انحراف خودرو و بلندشدگی چرخ‌های آن تا حدی قابل قبول می‌باشد.	
۴. ترجیح بر این است که مسیر خودرو بعد از برخورد با گاردریل اختلالی در جریان ترافیک خط مجاور ایجاد نکند.	
۵. سرعت برخورد سرنشین در جهت طولی نباید از ۱۲ m/s تجاوز کند. همچنین حداکثر مقدار شتاب منفی سرنشین برابر ۲۰g در نظر گرفته شده است.	مسیر خودرو پس از برخورد
۶. زاویه خروج خودرو از گاردریل (زاویه بین راستای گاردریل و خودرو در هنگامیکه تماسی بین آنها وجود ندارد) کمتر از ۶۰٪ زاویه برخورد آن باشد.	

اصلاح شده [Bullard et al., 1995]. مورد مقایسه قرار گرفته است. مشخصات وسیله نقلیه و گاردریل مورد آزمایش در آزمایش میدانی و شبیه‌سازی رایانه‌ای توسط نرم‌افزار LS-DYNA در جدول ۹ گردآوری شده است. همانطور که در جدول ۹ مشخص است مقادیر سرعت و زاویه برخورد در آزمایش میدانی تفاوت ناچیزی با مقادیر مندرج در گزارش NCHRP دارد که با توجه به شرایط موجود در آزمایش‌های میدانی قابل اغماض است. لازم به ذکر است که پس از انجام سعی و خطا و مقایسه ما بین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایش میدانی، مدل نهایی گاردریل G4(1S) شامل نه سپری به طول ۳۴,۳ متر و دارای ۷۸۹۲۲ گره و ۷۳۹۵۶ المان می‌باشد. به منظور بررسی کیفی مدل شبیه‌سازی شده عکس‌های متوالی از آزمایش میدانی برخورد و همچنین مدل شبیه‌سازی در فواصل زمانی مشخص در شکل ۹ آورده شده است. لازم به ذکر است که زمان حل با توجه به زمان قطع تماس بین خودرو و گاردریل برابر ۰,۶ ثانیه در نظر گرفته شده است.

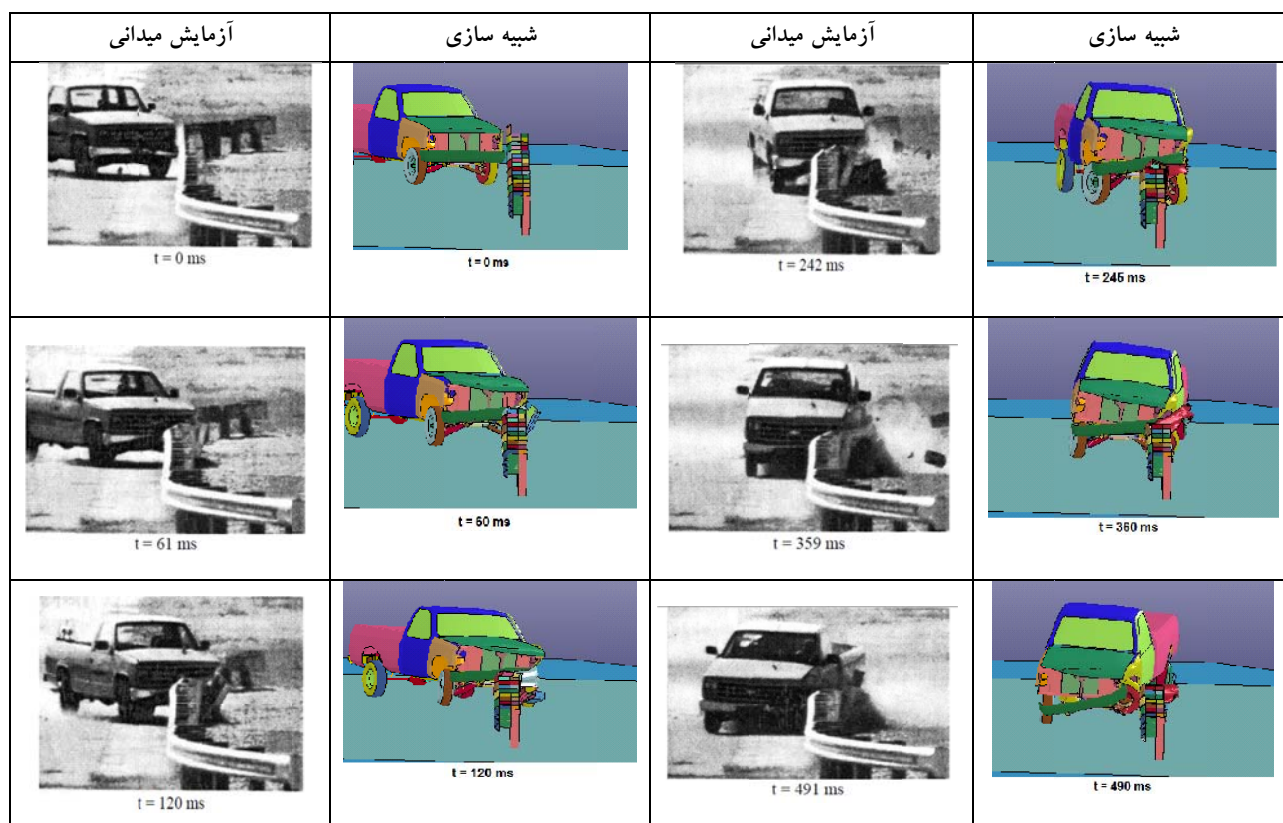
در این بخش به بررسی و تفسیر نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته بر روی انواع گاردریل‌های دوج و سه‌موج و با مد نظر قرار دادن معیارهای جدول ۸ پرداخته شده است. در ابتدای این بخش و به منظور بررسی اعتبار نتایج ارائه شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخورد وانت پیکاپ ۲۲۸۰ کیلوگرمی با گاردریل دوج G4(1S) اصلاح شده با مشخصات مندرج در استاندارد AASHTO و گزارش NCAC با نتایج بدست آمده از آزمایش میدانی انجام پذیرفته بر روی این نوع گاردریل مورد مقایسه قرار گرفته است.

اعتبارسنجی مدل

به منظور تحقیق درباره‌ی صحت نتایج ارائه شده توسط نرم‌افزار و بررسی توانایی آن در ارائه نتایج واقع‌گرایانه، نتایج حاصل از مدل‌سازی وانت پیکاپ ۲۲۸۰ کیلوگرمی در برخورد با گاردریل G4(1S) اصلاح شده و تحت شرایط آزمایش MASH (سرعت برخورد ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و زاویه برخورد ۲۵ درجه) با نتایج حاصل از آزمایش میدانی انجام شده توسط موسسه حمل و نقل تگزاس (TTI) بر روی گاردریل G4(1S)

جدول ۹. مشخصات آزمون اعتبار سنجی

مشخصات آزمون		ویژگی های آزمایش
MASH ۱۱-۳		شماره آزمایش
شبهه سازی عددی	میدانی	آزمایش برخورد
۱۰۰ کیلومتر بر ساعت	۱۰۱/۵ کیلومتر بر ساعت	سرعت برخورد
۲۵ درجه	۲۵/۵ درجه	زاویه برخورد
وانت پیکاپ (C2500)	(GMC2500) شورلت سیلورادو ۱۹۹۴	نوع وسیله نقلیه
دوموج اصلاح شده (G4(1S))	دوموج اصلاح شده (G4(1S))	نوع گاردریل
پایه I شکل (۱۳/۵*۱۵۰)	پایه I شکل (۱۳/۵*۱۵۰)	نوع پایه
۱۱۰۰	۱۱۰۰	میزان نفوذ پایه در خاک (میلی متر)
۷۰۶	۷۰۶	ارتفاع نصب سپری (میلی متر)
چوبی شیاردار ۳۶۰*۲۰۰*۱۵۰	چوبی شیاردار ۳۶۰*۲۰۰*۱۵۰	مشخصات لقمه
۱۹۰۵	۱۹۰۵	فاصله مرکز به مرکز پایه ها (میلی متر)



شکل ۹. مقایسه بین شبهه سازی و آزمایش میدانی تحت شرایط آزمون ۱۱-۳

باعث افزایش درصد خطای شبیه‌سازی شده است. مشابه بحث زاویه خروج در مورد دوران خودرو نیز مقادیر کوچک بدست آمده در آزمایش موجب ایجاد درصد خطای زیادی در شبیه‌سازی شده است. با توجه به نحوه محاسبه سرعت برخورد سرنشین و مقدار شتاب وارد آمده به سرنشینان (NCHRP) محاسبه این مقادیر در مدل رایانه‌ای با خطا همراه است که با توجه به سایر شبیه‌سازی‌های انجام شده در بحث برخورد با گاردریل میزان خطای این دو پارامتر در حد قابل قبولی قرار دارد. مقدار انعطاف گاردریل نیز با خطایی ۱۰ درصدی کمتر از مقدار واقعی در آزمایش میدانی محاسبه شده است که در محدوده‌ی قابل قبولی قرار دارد. بطور کلی و با توجه به کارهای انجام پذیرفته در زمینه‌ی مدل‌سازی برخورد وسیله نقلیه با گاردریل و همچنین در نظر گرفتن دینامیک پیچیده‌ی برخورد در چنین مدل‌سازی‌هایی، می‌توان گفت که مدل ساخته شده سازگاری مناسبی با آزمایش میدانی داشته و از دقت تقریباً بالایی برخوردار است.

با بررسی شکل ۹ مشاهده می‌شود که رفتار کلی وسیله نقلیه در برخورد با گاردریل به خوبی شبیه‌سازی شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان دوران خودرو حول محور طولی و عرضی گذرا از مرکز جرم آن مقداری بیشتر از آزمایش میدانی بوده است و در سایر موارد تشابه قابل قبولی میان مدل شبیه‌سازی شده و آزمایش میدانی انجام پذیرفته وجود دارد. علاوه بر مقایسه تصاویر فوق و با هدف مقایسه دقیق‌تر مابین مدل شبیه‌سازی شده و آزمایش میدانی، پارامترهای رفتاری وسیله نقلیه و گاردریل و میزان خطای مدل‌سازی در جدول ۱۰ آورده شده است.

با استناد به جدول ۱۰ مدل رایانه‌ای در شبیه‌سازی معیارهای کیفی نظیر عدم واژگونی و یا حرکت خودرو بر روی ریل و یا گیر کردن چرخ خودرو به پایه گاردریل عملکرد بسیار مناسبی داشته است. سرعت خروجی و مقدار زاویه خروج در مدل و آزمایش میدانی با کمتر از ۲۰٪ تفاوت همخوانی قابل قبولی دارند. لازم به ذکر است که کوچک بودن مقدار زاویه خروج

جدول ۱۰. مقایسه بین مدل و آزمایش میدانی در برخورد با گاردریل (G4(IS اصلاح شده

خطای شبیه‌سازی	نوع آزمایش		معیارهای مقایسه
	شبیه‌سازی	میدانی	
سازگار	خیر	خیر	نفوذ خودرو به پشت گاردریل
سازگار	خیر	خیر	واژگونی خودرو
سازگار	خیر	خیر	حرکت خودرو بر روی سپری
سازگار	بله	بله	گیر کردن چرخ وسیله نقلیه به پایه
۱۸/۱ درصد	۱۸/۹	۱۶	زاویه خروج از گاردریل
۱۱/۸ درصد	۶۱/۵	۵۵	سرعت خروجی
۵/۹ درصد	۴۴/۵	۴۲	حداکثر انحراف خودرو
۳۵- درصد	-۶/۵	-۱۰	حداکثر چرخش حول محور طولی
۱۳۵ درصد	-۹/۴	-۴	حداکثر چرخش حول محور عرضی
۲۶/۸ درصد	۵/۲	۷/۱	سرعت برخورد سرنشین در جهت طولی
۲۵/۳ درصد	-۹/۹	-۷/۹	شتاب منفی طولی
۱۰- درصد	۸۹۹/۶	۱۰۰۰	حداکثر تغییر شکل دینامیکی
۱۰/۲ درصد	۷۷۱/۳	۷۰۰	حداکثر تغییر شکل ماندگار
سازگار	موفق	موفق	عملکرد گاردریل بر اساس NCHRP

۲-۶-۲- ارائه و تفسیر نتایج

در این بخش به بررسی و تفسیر نتایج حاصل از برخورد وسیله نقلیه با حفاظ‌های مورد مطالعه تحت شرایط آزمون ۳-۱۱ (سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و زاویه ۲۵ درجه) که اطلاعات مدل المان محدود آن‌ها در جدول ۱۱ گردآوری شده است، پرداخته شده است که شامل موارد زیر می‌باشد.

جدول ۱۱. مشخصات مدل اجزاء محدود حفاظ‌های مورد تحلیل

نوع حفاظ شده	طول حفاظ مدلسازی شده (متر)	تعداد کل گره‌ها	تعداد کل المان
حفاظ بتنی (نیوجرسی)	۵۰	۲۴۶۴۰	۲۳۳۴۱
گاردریل (دو موج)	۳۸	۱۰۸۹۴۵	۱۱۳۵۲۶
گاردریل (سه موج)	۳۶/۱	۱۴۵۴۷۶	۱۳۹۳۳۶
حفاظ کابلی	۱۳۰	۲۳۰۵۷۹	۲۲۶۵۶۷

۲-۶-۱- کفایت سازه‌ای حفاظ‌ها در هدایت وسیله نقلیه

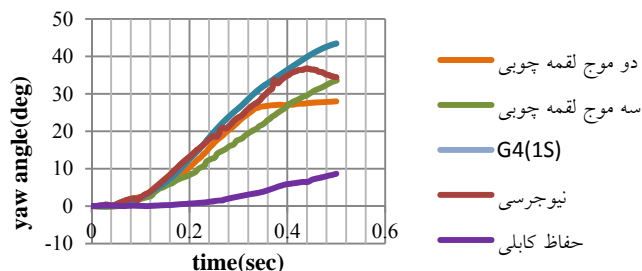
در جدول ۱۲ عملکرد انواع حفاظ‌های مورد مطالعه گردآوری شده است. با بررسی جدول ۱۲ مشاهده می‌شود تمامی حفاظ‌ها به جز گاردریل دو موج لقمه چوبی پایه ضعیف در ارضای معیار مندرج در استاندارد MASH عملکرد موفقی داشته‌اند. گاردریل دو موج به دلیل حرکت وسیله نقلیه بر روی سپری در برخورد با این حفاظ در ارضای معیار استاندارد عملکرد موفقی نداشته است.

۲-۶-۲- انحراف خودرو و زاویه خروج

در شکل ۱۰ مقدار زاویه انحراف خودرو^{۱۵} (دوران خودرو حول محور قائم گذرا از مرکز جرم آن) بر حسب زمان نشان داده شده است.

جدول ۱۲. عملکرد حفاظ‌ها در هدایت وسیله نقلیه منحرف شده از مسیر

ردیف	انواع حفاظ	نفوذ خودرو به پشت حفاظ	گیر کردن چرخ خودرو به پایه گاردریل	واژگونی خودرو	حرکت خودرو بر روی حفاظ	عملکرد گاردریل
۱	حفاظ بتنی (نیوجرسی)	خیر	-	خیر	خیر	موفق
۲	گاردریل (دو موج)	خیر	بله	خیر	بله	ناموفق
۳	گاردریل (سه موج)	خیر	خیر	خیر	خیر	موفق
۴	حفاظ کابلی	خیر	-	خیر	خیر	موفق



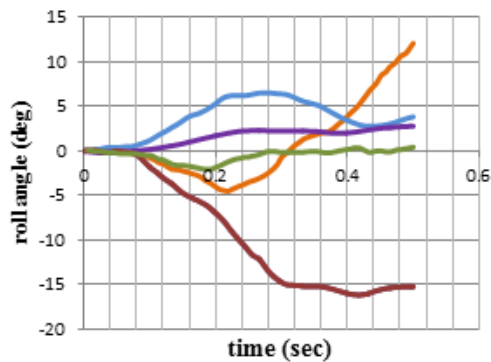
شکل ۱۰. دوران خودرو حول محور قائم گذرا از مرکز جرم آن (میزان انحراف خودرو)

تداخل با جریان آمدوشد خط عبور مجاور حفاظ) و زاویه خروج ۸,۵۶ درجه می‌باشد.

۶-۲-۳- دوران خودرو حول محور طولی و عرضی گذرا از مرکز جرم آن

میزان دوران خودرو حول محور طولی^{۱۶} و عرضی^{۱۷} (میل به واژگونی) گذرنده از مرکز جرم آن بر حسب زمان برای انواع مختلف گاردریل مورد تحلیل به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. با بررسی اشکال بالا می‌توان گفت که مقادیر زاویه دوران خودرو حول محور طولی خودرو و در برخورد با حفاظ کابلی و گاردریل سه‌موج ناچیز است و روند تغییرات آن‌ها با زمان در این دو نوع حفاظ تفاوت چندانی با هم ندارد. در برخورد وسیله نقلیه با گاردریل‌های دوموج و نیوجرسی مقدار زاویه دوران حول محور طولی بالا بوده است که این موضوع می‌تواند خطرات زیادی را برای سرنشینان ایجاد نماید.

با بررسی اشکال ۱۱ و ۱۲ می‌توان گفت که مقادیر زاویه دوران خودرو حول محور طولی خودرو و در برخورد با حفاظ کابلی و گاردریل سه‌موج ناچیز است و روند تغییرات آن‌ها با زمان در این دو نوع حفاظ تفاوت چندانی با هم ندارد. در برخورد وسیله نقلیه با گاردریل‌های دوموج و نیوجرسی مقدار زاویه دوران حول محور طولی بالا بوده است که این موضوع می‌تواند خطرات زیادی را برای سرنشینان ایجاد نماید.



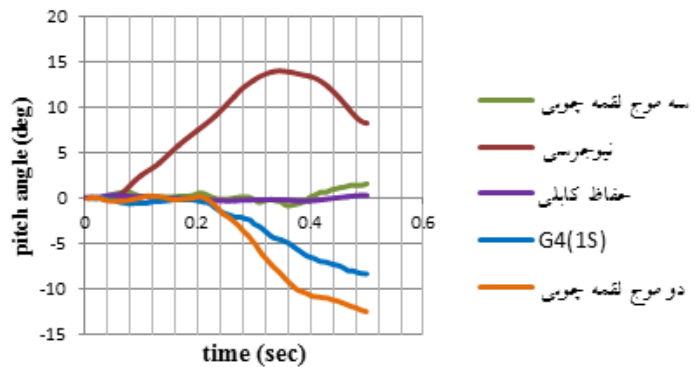
شکل ۱۲. دوران خودرو حول محور طولی

با توجه به نمودار فوق میزان دوران در برخورد با حفاظ کابلی که در هدایت وسیله نقلیه عملکرد موفق داشته است کمتر بوده که این موضوع به دلیل در بر گرفتن کامل وسیله نقلیه توسط حفاظ کابلی می‌باشد. در بین حفاظ‌هایی که در هدایت وسیله نقلیه عملکرد موفق داشته‌اند هرچه میزان حداکثر انحراف کمتر باشد، میزان تداخل میان خودروی منحرف شده از مسیر و جریان آمدوشد خط عبور مجاور حفاظ و همچنین ضربه‌های وارد شده به سرنشینان کمتر بوده و در نتیجه سطح ایمنی سرنشینان خودرو بالاتر می‌رود. مقادیر زاویه خروج خودرو که در زمان قطع تماس بین وسیله نقلیه و حفاظ در گاردریل‌های با عملکرد موفق اندازه‌گیری شده است در جدول ۱۳ آمده است. لازم به ذکر است به دلیل اینکه در بازه زمانی تحلیل ۰,۵ ثانیه وسیله نقلیه از حفاظ کابلی جدا نمی‌شود دارای زاویه خروج نمی‌باشد.

جدول ۱۳. زاویه خروج خودرو در برخورد با حفاظ با عملکرد موفق

نوع گاردریل	دوموج G4(1S)	سه‌موج با لقمه چوبی	نیوجرسی
زاویه خروج	۱۸/۸۸	۸/۵۶	۱۱/۶

همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر زاویه خروج باید در محدوده‌ی مقدار توصیه شده در گزارش MASH (۶۰٪ زاویه برخورد که در این مطالعه معادل ۱۵ درجه می‌باشد) قرار گیرد که در این بین گاردریل سه موج دارای بهترین عملکرد (کمترین



شکل ۱۱. دوران خودرو حول محور عرضی

نیز با توجه به تفاوت اندکی که با گاردریل سه موج دارد بعد از این گاردریل بهترین عملکرد را دارد. عملکرد گاردریل دوموج G4(1S) اصلاح شده در کاهش سرعت خودرو به خوبی گاردریل های سه موج نبوده است، بطوریکه میزان سرعت نهایی خودرو در برخورد با گاردریل های سه موج ۲۱,۷۴ کیلومتر بر ساعت کمتر از مقدار متناظر برای این نوع گاردریل می باشد که این موضوع کارایی مناسب تر گاردریل های سه موج را بیش از پیش مشخص می کند.

میزان خطر محتمل برای سرنشینان با توجه به واکنش سرنشین فرضی که حرکت آن نسبت به اتاق وسیله نقلیه، وابسته به میزان شتاب وسیله نقلیه می باشد نیز مورد ارزیابی قرار می گیرد و ارزیابی آن در واقع با اندازه گیری هایی روی وسیله نقلیه انجام می پذیرد و دلیل این امر این است که MASH استفاده از آدمک مصنوعی در تست های میدانی را ضروری نمی داند. فرض می شود که سرنشینی با جرم نقطه ای در هنگام برخورد وسیله نقلیه با گاردریل در فضای داخلی اتاق خودرو حرکت می کند تا به پیشخوان فرضی، شیشه جلو و یا سایر اجزاء داخلی خودرو برخورد کرده و متعاقباً باقیمانده تغییرات شتاب خودرو در هنگام برخورد را از طریق در تماس بودن با سطوح داخلی خودرو تجربه می کند. بدین منظور دو معیار زیر تعریف می شود:

۱. مولفه های طولی و جانبی سرعت سرنشین در برخورد با سطوح داخلی اتاق خودرو^{۱۸}
 ۲. حداکثر مقدار مولفه های طولی و جانبی شتاب خودرو که بعد از برخورد سرنشین فرضی با سطوح داخلی اتاق خودرو در بازه های ۱۰ میلی ثانیه متوسط گیری شده است^{۱۹}.
- مقادیر سرعت برخورد و شتاب وارد آمده به سرنشینان در راستای طولی و برای حفاظ های با عملکرد موفق در جدول (۱۶) ارائه شده است.

جدول ۱۶. مقادیر OIV و ORA در گاردریل های با عملکرد موفق

نوع گاردریل	نیوجرسی	حفاظ کابلی	دوموج G4(1S)	سه موج لقمه چوبی
OIV < ۱۲ m/s	۶/۴	۲/۹	۵/۲	۶/۱
ORA < ۲۰ g	-۱۳/۶	-۳/۷	-۹/۹	-۱۹/۶

با توجه به جدول ۱۴ که حداکثر میزان دوران خودرو حول محورهای طولی و عرضی را در حفاظ های مختلف نمایش داده است مشاهده می گردد که بیشترین میزان دوران حول محور طولی مربوط به نیوجرسی و کمترین میزان آن مربوط به گاردریل سه موج لقمه چوبی می باشد.

جدول ۱۴. حداکثر دوران حول محور طولی و عرضی گذرا از مرکز جرم خودرو

نوع حفاظ	نیوجرسی	حفاظ کابلی	دوموج لقمه چوبی	G4(1S)	سه موج لقمه چوبی
حداکثر دوران حول محور طولی	۱۶/۷	۲/۶	۱۲	۶/۴۸	۲
حداکثر دوران حول محور عرضی	۱۴/۳	۳/۰	۱۲/۵	۸/۳۸	۱/۵

۶-۲-۴- میزان کاهش سرعت خودرو و مقادیر سرعت برخورد

و شتاب وارد آمده به سرنشینان

در این بخش به بررسی توانایی سیستم های گاردریل مورد تحلیل در کاهش سرعت خودرو در مدت زمان تحلیل (۶,۰ ثانیه) پرداخته شده است.

جدول ۱۵. مقادیر سرعت نهایی خودرو

نوع حفاظ	نیوجرسی	حفاظ کابلی	دوموج لقمه چوبی	G4(1S)	سه موج لقمه چوبی
سرعت نهایی	۷۰/۳۷	۵۳/۶	۷۰/۵۴	۶۲/۳۸	۴۸/۸

با توجه به جدول ۱۵ گاردریل سه موج با لقمه چوبی بیشترین مقدار کاهش سرعت را تجربه کرده است که این موضوع نشان دهنده عملکرد مناسب این نوع گاردریل می باشد. حفاظ کابلی

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه با هدف بررسی کارایی حفاظ‌های بتنی (نیوجرسی) و کابلی، گاردریل‌های دوموج و سه‌موج مورد استفاده در کشور ایران، شبیه‌سازی برخورد وسیله نقلیه با حفاظ‌های مذکور بوسیله نرم‌افزار اجزاء محدود LS-DYNA و با مدنظر قرار دادن معیارهای آزمایش ۳-۱۱ مندرج در استاندارد MASH (وانت پیکاپ ۲۲۸۰ کیلوگرمی با سرعت برخورد ۱۰۰ km/h و زاویه برخورد ۲۵ درجه) انجام پذیرفت. همچنین با اعمال تغییراتی بر روی حفاظ‌های موجود (با بررسی نمونه‌های موجود در استاندارد AASHTO) رفتار خودروی منحرف شده در برخورد با چهار نوع حفاظ مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که گاردریل دوموج با پایه ناودانی در بازگرداندن وسیله نقلیه به مسیر ناموفق عمل کرد. و در طرف مقابل حفاظ‌های بتنی (نیوجرسی) و کابلی و گاردریل سه‌موج لقمه چوبی و همچنین گاردریل G4(1S) اصلاح شده در ممانعت از نفوذ خودرو به محدوده‌ی پشت حفاظ و عدم حرکت آن بر روی حفاظ موفق عمل کرده‌اند. در میان حفاظ‌های با عملکرد موفق گاردریل سه‌موج لقمه چوبی با توجه به میزان زاویه خروج، دوران حول محور طولی و سرعت نهایی پس از مدت زمان تحلیل عملکرد بهتری داشته است. همچنین حفاظ کابلی در معیارهای مرتبط با بحث سرنشینیان خودرو (ORA و OIV) دارای عملکرد مناسب‌تری در مقایسه با حفاظ‌های دیگر می‌باشد که نشان از سطح ایمنی بالای این حفاظ نسبت به حفاظ‌های دیگر می‌باشد.

۸- پی‌نوشت‌ها

1. Two-Waves W-Beam Guardrail
2. Three-Waves
3. Concrete Barrier (New Jersey)
4. Cable Barrier
5. Manual for Assessing Safety Hardware
6. American Association of State Highway and Transportation Officials
7. Cornell Aeronautical Laboratory
8. Federal Highway Administration
9. Ray
10. National Crash Analysis Center
11. Nebraska University
12. Piecewise Linear Plastic

با توجه به مقدار مجاز OIV و ORA بر اساس گزارش MASH، تمامی گاردریل‌های فوق در ارضای این معیارها عملکرد مناسبی داشته‌اند. مقدار سرعت برخورد سرنشین با متعلقات داخل خودرو، همان تغییرات سرعت خودرو در جهت طولی و در بازه زمانی مشخص می‌باشد. به همین دلیل و با توجه به این مسئله که عموماً حفاظ‌های بتنی و گاردریل‌های سه‌موج با توجه به سختی بالاتر ساختارشان باعث کاهش بیشتر سرعت وسیله نقلیه به هنگام برخورد با آنها می‌شوند، مقدار OIV و ORA در گاردریل‌های سه‌موج و نیوجرسی بیشتر از حفاظ کابلی و گاردریل دوموج می‌باشد.

۶-۲-۵- میزان انعطاف گاردریل

در جدول ۱۷ میزان حداکثر جابجایی دینامیکی و ماندگار درج شده است.

جدول ۱۷. مقادیر حداکثر جابجایی دینامیکی و ماندگار

نوع گاردریل	نیوجرسی	حفاظ کابلی	دوموج لقمه چوبی	دوموج G4(1S)	سه موج لقمه چوبی
حداکثر جابجایی دینامیکی (میلی متر)	۱۱۲۵	۳۷۴۵	۱۲۴۱	۸۹۹	۸۴۷
حداکثر جابجایی ماندگار (میلی متر)	۱۱۲۵	۳۷۴۵	۱۰۶۹	۷۷۱	۷۲۶

با توجه به جدول ۱۷ بیشترین میزان جابجایی دینامیکی و ماندگار مربوط به حفاظ کابلی می‌باشد که با توجه به انعطاف‌پذیری بالای این حفاظ قابل توجیه است همچنین گاردریل سه‌موج با لقمه چوبی کمترین میزان انعطاف دینامیکی را در میان تمامی گاردریل‌ها در مدت زمان برخورد تجربه کرده است.

-Marzougui, D., Kan, C.D., & Opiela, K.S. (2012). Assessing options for improving barrier crashworthiness using finite element models and crash simulation. *13th International LS-DYNA Users' Conference*.

-Marzougui, D., Mohan, P., & Kan, S.A. (2008). Evaluation of rail height effects on the safety performance of w-beam barriers. *6th European LS-DYNA Users' Conference*.

-John, D.R., Karla, A. L., Cody, S. (2010). Development of advanced finite element material models for cable barrier wire rope. *Final Reports & Technical Briefs from Mid-America Transportation Center*.

-Ray, M.H. (1997). The use of finite element analysis in roadside hardware design. *International Journal of Crash Worthiness*, 2(4), 333-348.

-Uddin, W., & Hacket, R.M. (1999). Three-dimensional finite element modeling of vehicle crashes against roadside safety barriers. *International Journal of Crashworthiness*, 4(4), 407-418

-Whitworth, H.A., Bendidi, R., Marzougui, D., & Reiss, R. (2004). Finite element modeling of the crash performance of roadside barriers. *International Journal of Crashworthiness*, 9(1), 35-43.

-Website: National Crash Analysis Center (NCAC), NCAC Finite Element Archive, <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>

13. Eight Node Reduced Integration Hexahedral Solid Element

14. Null

15. Yaw Angle

16. Roll Angle

17. Pitch Angle

18. Occupant Impact Velocity

19. Occupant Ride Down Acceleration

۹- مراجع

- آیین‌نامه ایمنی راه‌ها (۱۳۹۳). جلد چهارم، ضابطه شماره ۴-۲۶۷. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

- بهنیا، کامبیز، و شهابی کیا، آرش (۱۳۹۳). تحلیل و مقایسه فنی کارایی گاردریل های مورد استفاده در ایران در سرعت‌های مختلف برخورد با استفاده از شبیه سازی به روش اجزاء محدود. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران.

-Atahan, O.A. (2002). Finite element simulation of a strong Post w-beam guardrail system. *Simulation*, 78(10), 587-599.

-Bullard, D.L., Rohde, J.R., Menges, W.L., & Alberson, D.C. (1995). NCHRP Report 350 compliance Test 3-11 of the modified G4 (1S) guardrail with timber blockouts. *The Texas A&M University Transportation Institute*.

-Marzougui, D., Bahouth, G., Eskandarian, A., Meczkowski, L., & Taylor, H. (2000). Evaluation of portable concrete barriers using finite element simulation. *Transportation Research Record*, 1720(1), 1-6.

Safety Performance Evaluation of two-waves and three-waves W-Beam Guardrails Using Finite Element Simulation

Mohammad Safari, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Massoud Palassi, Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

E-mail: mpalas@ut.ac.ir

Received: September 2003 Accepted: January 2024

ABSTRACT

Due to the limitation of testing equipment on performing in-situ crash tests on the road barriers in the country (Iran) to evaluate the actual performance of the barriers, this study has been conducted with the aid of LS-DYNA software. Two- waves and three-waves W-beam guardrails, concrete barrier and cable barrier have been simulated by defining proper materials and modeling in detail and their safety performance was evaluated under conditions of MASH Test Level 3 requirements. Furthermore, by creating changes in geometry of the performed guardrails in Iran by considering similar cases in AASHTO roadside design guide, in this study the guardrail and vehicle's behavioral parameters in collision with vehicle was easily compared. By considering the criteria of the MASH, two-waves guardrail with U-shape Post, could not successfully redirect the errant vehicle. On the other hand, three-waves guardrail, concrete barrier, cable barrier and also the modified G4(1s) had acceptable performance in preventing the vehicle to penetrate into guardrail back face or overriding the installation. Based on the findings of this study, computer simulations demonstrate an unsuccessful performance of two-waves guardrail used in Iran to meet the requirement of test Level 3 criteria (TL3) in MASH (the main criteria in evaluating of highway safety features) which is the most often used crash test all around the world and according to the fact that the successful performance of road guard to meet these requirements is the required criterion for its usage in urban highways (allowed speed is between 100-110 km/h). More investigations, particularly, performing in-situ crash tests - as a primary means of assessing roadside safety features - are required.

Keywords: Crash Simulation, Finite Element, W-Beam Guardrail, Concrete Barrier, Cable Barrier